

機関番号：12401  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20500664  
 研究課題名（和文） 住環境における空調の省力化と個別快適制御のための  
 居住者の温熱的快適感に関する研究  
 研究課題名（英文） Study on Resident's Thermal Comfort for Energy Saving and  
 Individual Comfort Control on Air-conditioning in Living Environment  
 研究代表者  
 小島 一恭 (KOJIMA KAZUYUKI)  
 埼玉大学・大学院理工学研究科・助教  
 研究者番号：60361391

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、ネットワーク上に存在する不特定多数のセンサ情報を選択的に使用するとともに、その選択状況を動的に切り替えながら、空調装置の運転時にオンラインで住環境の温熱特性をモデル化する方法を提案した。また、居住者の温熱環境に対する要求を抽出する方法を検討し、空調を必要とする居住者近傍のみ空調制御を行う方法について検討した。これらの実現のため、(1) 安価な小型高精度快適度センサを開発し、これを数多く用意して、オフィス空間における快適度分布を計測した。(2) その際、不特定多数のセンサ群の中からの必要センサを選択し、選択状況を変更しながら、快適度を推定する方法を検討した。(3) 複数の居住者の温熱環境に対する要求の抽出方法を検討し、要求抽出のためのシステムを構築した。(4) 居住者の要求と快適度モデルとの関連付け方法ならびに空調制御への反映方法を明らかにし、実験、シミュレーションの両面から、本システムの有効性を検討した。

## 研究成果の概要（英文）：

In this study, thermal characteristics was modeled by using many unspecified sensor information which was selected from the network, and the air conditioning system was controlled using the model. The method to predict the resident's thermal demand was developed, and also the method of the air conditioning in the area adjacent to the resident was examined. For these achievement, (1) The low cost, small size, highly accurate thermal-comfort sensor was developed, and the thermal comfort distribution in the office was measured using them. (2) The sensors selected from many unspecified sensors were appropriately switched, and the resident's thermal comfort was predicted. (3) The extraction method of the two or more residents' demands for the thermal environment was developed, and the extracting system for residents' thermal demands was constructed. (4) The usage of the relation between the resident's demand and the comfort model to control air-conditioner were clarified, and the effectiveness of this method was examined from both sides of the experiment and the simulation.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：生活科学・生活科学一般

キーワード：住環境

## 1. 研究開始当初の背景

空調設備は、人間の日常的な生活空間のみならず、医療、福祉や、精密機器、半導体などの製造現場においても必要不可欠なものとなっている。一方で環境負荷低減が叫ばれ、特に地球温暖化対策としての CO2 削減、省エネに対する社会的要求は年々高まっている。「京都議定書」では、温室効果ガスの排出抑制・吸収の量の目標として 1990 年の総排出量を基準として、2008 年～2012 年の目標期間内に日本国において 6%削減することを約束している。ところが、2007 年 5 月発表の「2005 年度（平成 17 年度）の温室効果ガス排出量（確定値）」によれば、2005 年度は基準年比で温室効果ガスの総排出量が 7.8%上回っていることが示され、我が国の 6%の削減約束を達成するためには、8.4%の排出削減を達成する必要がある。温室効果ガス排出量増加の原因としては、オフィスビル等の床面積の増大、パソコンや家電等の保有台数の増加等を背景としたオフィスや家庭におけるエネルギー消費量の増大が挙げられる。特にエアコンによるエネルギー消費の比率は家庭で使用される電気の中で最も大きく、(社)家庭電器文化会「資源・エネルギー」によれば、2004 年度における家庭の電気使用量の実に 4 分の 1 がエアコンに使用されていることが報告されている。

空調装置の省エネに対する取組みは、空調装置メーカー各社をはじめ多方面でなされており、近年のエネルギー効率の改善は目覚ましいものがある。しかしながら、空調装置の高効率化よりも空調装置の導入、施工の増加数が著しく、結果としてエネルギーの消費増を招き、このため、温室効果ガスは削減するどころか逆に増加しており、更なるエネルギー効率の向上が求められている。空調装置の更なるエネルギー消費削減の試みとして、空調装置単体でエネルギー効率を高めるだけでなく、オフィスなどにおいて複数台の空調装置を連携、協調制御して効率改善を行う試みや、タスク・アンビエント空調のように必要な空間のみを空調し、不必要な空間は空調せず省力化する試みがなされている。また、デシカント空調のような除湿冷房の試みもある。しかし、このようなシステムで効率的かつ効果的な空調を行うためには、空調装置を構成する多くのセンサ、アクチュエータを、刻々と温熱負荷が変動する環境下において、その温熱環境を適切に把握し、適切に制御する必要がある。しかしながら、現状では、空

調のように非常に多くの要素を含む系の、特性の把握や制御が困難な状況にある。

また、従来の空調装置では居住者の温冷感や快適感として平均予測温熱指標や予測不満足率、有効温度など一義的な快適指標が用いられているが、温冷感や快適感は本来主観的なものである。さらには、主観的な温冷感や快適感と温熱環境に対する要求も一意に決定することはできないと考えられる。つまりこれは、平均化された温熱指標に基づいて空調制御を行っても居住者ごとの快適感を満たすことはできないし、また、居住者の中には「やや暑い」状態で「やや不快」な温熱環境にあっても「我慢できる」居住者も存在する可能性があり、このような居住者に対しての空調を省くことで、更なる省力化が可能であると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、ネットワーク上に存在する不特定多数のセンサ情報を選択的に使用し、空調装置の運転時にオンラインで動的に住環境の温熱特性をモデル化する。また、居住者の温熱環境に対する要求を抽出する方法を検討し、空調を必要とする居住者近傍のみ空調制御を行う。これを実現するため、特に

- (1) 不特定多数のセンサ群の中からの必要センサの選択方法
- (2) 選択されたセンサを用いた温熱環境のモデル構築方法
- (3) 複数の居住者の温熱環境に対する要求の抽出方法
- (4) 居住者の要求と快適度モデルとの関連付け方法ならびに空調制御への反映方法を明らかとし、実験、シミュレーションの両面から、本システムの有効性を検討する。

## 3. 研究の方法

### 3. 1 センサネットワークの構成

図 1 実験環境を示す。約 11m×8m のオフィス室内に温度センサ、湿度センサを多数配置し、室内の温湿度を測定する。図 2 にセンサネットワークの構成を示す。本研究では IEEE802.15.4 / ZigBee に準拠したセンサネットワークを使用する。図中の C, R, E で示されるセンサノードは自律的にメッシュ状の無線ネットワークを構成し、PC に接続したノード C を介して全ノードのセンサ情報を収集することができる。ここで、C, R, E はそれぞれコーディネータ、ルータ、エンドデバイスである。ルータとエンドデバイスには温

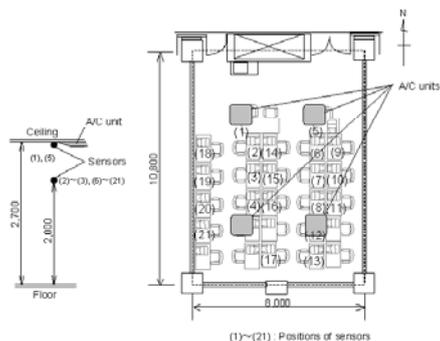


図1 実験環境

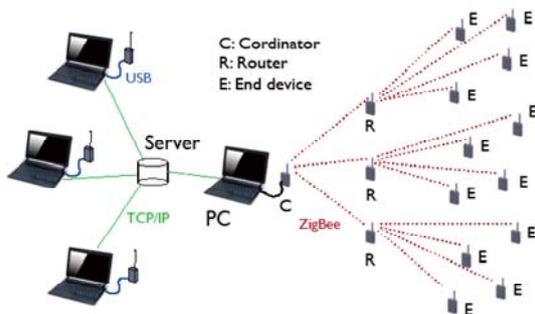


図2 センサネットワークの構成

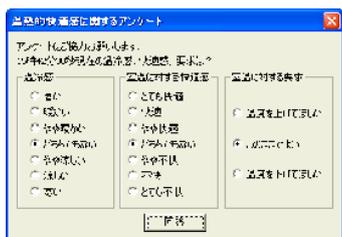


図3 快適度抽出ダイアログボックス

度センサ，湿度センサが取り付けられている。収集したセンサ情報はサーバに蓄積し，他のPCから閲覧することが可能である。

### 3. 2 温冷感と温熱的快適感

温冷感是人間の暑い—寒い，暖かい—涼しい，熱い—冷たいなどの感覚，温熱的快適感はある温熱環境の快—不快の感覚である。温冷感，温熱的快適感は互いに関係するが，一方の決定により一意に他方が決定するわけではない。

近年の空調装置は温度や平均予測温熱指標 (PMV) や新有効温度 (ET\*) などの指標を用いて空調制御が行われている。また，居住者の人数や場所を特定し，人数や位置に応じて気流を変化させる制御を行うものもある。しかし，温冷感や快適感とは本来主観的なものである。さらには，主観的な温冷感や快適感と温熱環境に対する要求（例えば，「温度を上げたい」「温度を下げたい」「このままで良い」などの要求）も一意に決定できないと考えられる。つまりこれは，各居住者の温冷感や快適感を平均化した温熱指標に基づいて空調制御を行っても居住者ごとの快適感を満た

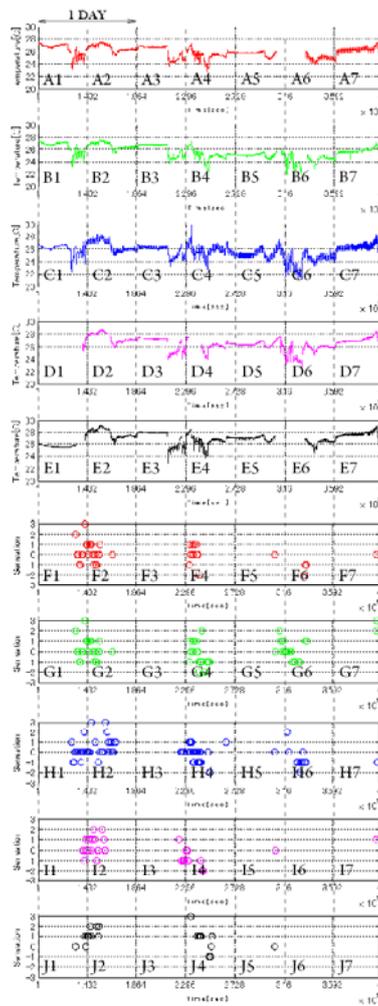


図4 室内温度変化と温冷感申告

表1 相関係数 (F4)

	1	2	3	4	5	6	7
A	0.08	0.04	0.15	0.10	0.09	-0.22	0.06
B	0.08	0.04	0.15	0.08	0.06	0.05	0.06
C	0.04	0.07	0.13	-0.05	-0.01	-0.01	0.08
D	-0.06	0.11	0.15	-0.34	-0.02	-0.04	0.06
E	0.09	0.06	0.15	0.10	0.09	-0.22	0.00
F	-0.05	-0.55	0.00	1.00	0.00	0.21	-0.24

表2 相関係数 (F2)

	1	2	3	4	5	6	7
A	0.18	0.23	0.24	-0.11	0.17	-0.31	0.11
B	0.18	0.23	0.24	-0.23	0.11	-0.27	0.11
C	0.10	0.13	0.22	-0.18	0.00	-0.28	0.10
D	-0.11	0.39	0.24	0.15	-0.01	-0.38	0.11
E	0.16	0.42	0.24	-0.15	0.17	-0.32	-0.01
F	0.01	1.00	0.00	-0.55	0.00	0.26	-0.28

出する。居住者の PC に温熱的快適度抽出用のソフトウェアを導入し，図3のダイアログボックスを使用して，15分ごとに各居住者の温熱的快適感，温冷感，温熱環境に対する要求を抽出する。快適感に関しては「とても快適 (3)」から「とても不快 (-3)」まで7段階，温冷感に関しては「暑い (3)」から「寒い (-3)」まで7段階，要求に関しては「温度を上げて欲しい」から「温度を下げたい」の3段階とする。

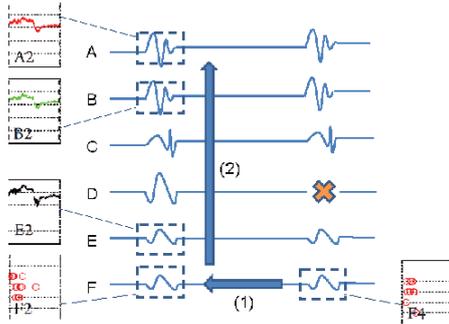


図5 データの選択

### 3. 3 居住者の温熱的快適度の抽出

本研究では複数のセンサ値と居住者の温熱的快適感を関連付け、複数のセンサ値からこれらを予測する。このために、まず、センサ値に対する居住者の快適度、温冷感、要求を同時に抽出する。居住者の PC に温熱的快適度抽出用のソフトウェアを導入し、図3のダイアログボックスを使用して、15分ごとに各居住者の温熱的快適感、温冷感、温熱環境に対する要求を抽出する。快適感に関しては「とても快適 (3)」から「とても不快 (-3)」まで7段階、温冷感に関しては「暑い (3)」から「寒い (-3)」まで7段階、要求に関しては「温度を上げて欲しい」から「温度を下げて欲しい」の3段階とする。

### 3. 4 温度測定および快適度抽出実験

図4に実験結果の一例を示す。上から5段目までが室温の変化を、6段目から10段目までが5人の居住者の温冷感申告を示す。グラフは3.5日間の変化を示している。温度変化のグラフが途切れる区間は、この間、PCの電源が断たれていたことを表す。温度変化のグラフの変化はどれも同様の傾向であるが、温度はセンサ毎に、すなわち、室内の位置により異なることがわかる。また、室温やその変化が同じ場合でも温冷感申告は居住者により異なることがわかる。このことから温冷感や快適度は全体としては一つの温熱指標で表現できる場合でも、居住者毎の個々の温冷感・快適感を一つの温熱指標で表現するのは難しいといえる。

### 3. 5 ニューラルネットを用いた快適度のモデル化

居住者毎の個々の温冷感・快適感を予測するために、本研究ではニューラルネットワークを使用する。温度測定、快適度申告を収集する過程で動的にニューラルネットワークを構成し、温冷感・快適感を予測する。空調制御に応用する場合、初期段階では居住者毎の個々の温冷感・快適感の予測精度は低いと考えられるが、この段階では一般化された温熱指標を利用する。使用期間が長くなるにつれて予測精度が向上するものと考えられ、この段階に至ってニューラルネットワークに

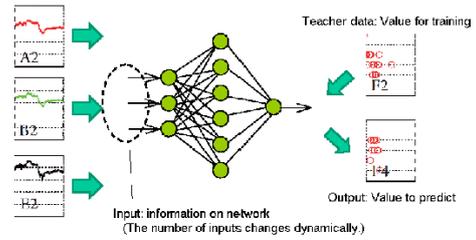


図6 ニューラルネットワーク

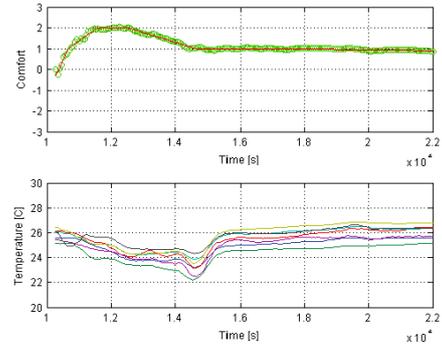


図7 実験結果

よる予測値を使用する。ニューラルネットワークはセンサネットワーク上のセンサ値と居住者の温冷感・快適感申告との相関の強さを考慮して周期的に再構成される。また、既に関連付けられ、温冷感・快適感の予測に使用されていたセンサ値が利用できなくなった場合には、更新周期に関係なく再構成される。

### 3. 6 センサ間の相関係数の算出

説明のため図4の各グラフを0.5日毎の区分で時間軸を分割し、それぞれの区分をA1, A2のように英文字と数字で表すこととする。居住者一人に注目すると、環境がほぼ同じ条件であれば、異なる時刻でも居住者は同じ温冷感を示す可能性が高いと仮定する。そこで、過去の記録から現在の記録との相関の高い記録を見出し、その記録を利用して温冷感を予測する。本論文では、この考えを実現する方法として、時間的に分割された記録同士の相関係数を計算する。

2つの区分の変数をそれぞれ、と表現することにすれば、相関係数は次式で表される。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

ここで  $x, y$  は、それぞれの区分の平均値を表す。

表1に区分F4の値とその他の区分の値の相関係数である。また、表2は区分F2の値とその他の区分の値の相関係数である。

### 3. 7 ニューラルネットの再構成

F4 の直後の温冷感を予測することを考える。このとき、予測するためのニューラルネットが既に構築されていて、ニューラルネットへの入力として必要なセンサ値が揃っていれば、センサ値を直ちにニューラルネットの入力として利用し、予測値を得ることができる。そうでない場合、すなわち、ニューラルネットワークが構築されていないか、あるいは、ニューラルネットの入力として必要なセンサ値が揃わない場合には、ニューラルネットを新たに構成し、学習する。この場合、次の手順でニューラルネットワークへの入力を決定する。

まず、F4 の時系列を F3, F2 と過去に辿り、過去の区分の中から相関係数のもっとも高い区分を選択する (図 5(1))。表 1 を見ると F2 と F4 がもっとも相関が強く、相関係数は -0.55 である。そこで、この場合は F2 が選択される。次に、F2 と他のセンサ値を比較し、相関の強いセンサ値を探す。表 2 の例では、E2 がもっとも強く相関係数は 0.42 である。続いて、D2, A2, B2 の順に相関が強い。故障や電源断など何らかの原因で過去に使用できていたセンサが利用できない場合がある。例えば、この例では D4 のセンサは予測する時点では使用できない。この場合、E2, A2, B2 がニューラルネットへの入力として選択される候補となる (図 6)。

### 3. 8 実験による検証

以上で述べた枠組みを使用し個別快適度予測実験を行った。図 7 に実験結果を示す。上図において実線は被験者の温冷感、丸印は予測を示す。下図は室内 7 箇所の温度変化を示す。約 30℃から約 23℃まで低下し、その後、再び 27~28℃まで上昇し一定の温度になっている。このときの被験者の快適感、ニュートラル (0) から快適 (+2) へと変化し、さらにやや快適 (+1) へと変化している。予測結果と実際の申告はよく一致している。

### 4. 研究成果

センサネットワーク上の不特定の複数のセンサ値を居住者の温冷感・快適感に関連付け、複数の居住者の温冷感・快適感を個別に予測する方法について述べるとともに、実験によりその検証を行った。ネットワーク上の複数のセンサ値と予測する温冷感の相関の強さから温冷感の予測に有用なセンサを選択し、温冷感予測に使用するニューラルネットを動的に構成した。構成されたニューラルネットワークによる温冷感の予測値と実際の申告とはよく一致しており、本手法により居住者の快適度を個別に予測できることを確認した。

### 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 10 件)

(1) K.Kojima, T.Okumura: Development of Sensor Networks for Predicting Individual Thermal Comfort, Proceedings of the 8th International Conference on Networked Sensing System 2011 (INSS2011), (2011), 査読有.

(2) K.Kojima: Sensor Network for Detecting Human's Thermal Comfort Considering of Individuals, Proceedings of 2011 International Conference on Electronic Devices, Systems & Applications (ICEDSA2011), (2011), 査読有.

(3) 小島一恭, 堀竹直: 進化計算による多様な環境に適応する多足歩行ロボットの歩行獲得, 設計工学, (2011), 査読有. (印刷中)

(4) K.Kojima: Study on Sensor Fusion for Detecting Human's Thermal Comfort Considering of Individuals, Proceedings of 2010 10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA2010), (2010), pp.1355-1360, 査読有.

(5) K.Kojima: Dynamic Modeling of Individual Thermal Comfort Correlated with Sensor Networks, Design Engineering Workshop 2009 (DEWS 2009), (2009), 査読無.

(6) K.Kojima: Study on Sensor Networks Correlated with Human's Thermal Sensation, ICROS-SICE International Joint Conference 2009 (ICCAS-SICE 2009), (2009), 査読有.

(7) K.Kojima: VHDL Design Automation Using Evolutionary Computation, Proceedings of 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (IEEE ISIE 2009), (2009), 査読有.

(8) K.Kojima and K.Watanuki: Supporting Air-Conditioning Controller Design Using Evolutionary Computation, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.2, No.1(2008), 査読有.

(9) K.Kojima: Prediction of Individual Thermal Sensation Using Unspecified Sensors in Sensor Networks Proceedings of

International Conference on Control, Automation and Systems 2008 (ICCAS2008), (2008), pp.123-126, 査読有.

(10) K. Kojima, K. Watanuki: Supporting VHDL Design for Air-Conditioning Controller Using Evolutionary Computation, Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control (IFAC'08), (2008), pp.12318-12323, 査読有.

〔学会発表〕(計10件)

(1) K. Kojima, T. Okumura: Development of Sensor Networks for Predicting Individual Thermal Comfort, the 8th International Conference on Networked Sensing System 2011 (INSS2011), (2011.6.12-15, 台湾・澎湖), 査読有.

(2) 小島一恭, 奥村高広: センサネットワークを用いた居住者の個別快適度推定, 2011 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (ROBOMECH2011), No.11-5, 2P1-J11, pp.1-4(2011.5.26-28, 岡山コンベンションセンター), 査読無.

(3) K. Kojima: Sensor Network for Detecting Human's Thermal Comfort Considering of Individuals, 2011 International Conference on Electronic Devices, Systems & Applications (ICEDSA2011), (2011.4.25-27, マレーシア・クアラルンプール), 査読有.

(4) K. Kojima: Study on Sensor Fusion for Detecting Human's Thermal Comfort Considering of Individuals, 2010 10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA2010), (2010.12.1, エジプト・カイロ大学), pp.1355-1360, 査読有.

(5) K. Kojima: Dynamic Modeling of Individual Thermal Comfort Correlated with Sensor Networks, Design Engineering Workshop (DEWS2009), (2009.10.27, 沖縄), 査読無.

(6) K. Kojima: Study on Sensor Networks Correlated with Human's Thermal Sensation, ICROS-SICE International Joint Conference 2009 (ICCAS-SICE 2009), (2009.8.19, 福岡), 査読有.

(7) K. Kojima: VHDL Design Automation Using Evolutionary Computation, 2009 IEEE

International Symposium on Industrial Electronics (IEEE ISIE 2009), (2009.7.6, 大韓民国・ソウル), 査読有.

(8) 小島一恭: センサネットワークを用いた複数居住者の個別快適度予測, 第43回空気調和・冷凍連合講演会, (2009.4.22, 東京海洋大学), 査読無.

(9) K. Kojima: Prediction of Individual Thermal Sensation Using Unspecified Sensors in Sensor Networks Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems 2008 (ICCAS2008), (2008.10.15, 大韓民国・ソウル), 査読有.

(10) K. Kojima, K. Watanuki: Supporting VHDL Design for Air-Conditioning Controller Using Evolutionary Computation, The 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC'08), (2008.7.10, 大韓民国・ソウル), 査読有.

〔その他〕

(1) 人間-環境系における人間の感覚予測のためのセンサグリッドの自己組織化に関する研究, 平成22年度埼玉大学総合研究機構プロジェクト報告書, (2011).

(2) 人間-環境系における人間の感覚予測のための次世代センサネットワーク技術に関する研究, 平成21年度埼玉大学総合研究機構プロジェクト報告書, Vol.8, pp.49-50 (2010).

ホームページ等

<http://human.mech.saitama-u.ac.jp/Faculty/kojima/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小島 一恭 (KOJIMA KAZUYUKI)  
埼玉大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 60361391

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし