

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630164

研究課題名(和文) 指紋構造を有した印刷法による触覚・すべり同時検出人工電子皮膚の開発

研究課題名(英文) Tactile, friction, and temperature sensing artificial electronic skin with a fingerprint-like structure

研究代表者

竹井 邦晴 (Takei, Kuniharu)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20630833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「触覚」「すべり」「温度」分布計測可能な電子皮膚デバイスの開発を行った。特に歪みセンサ及び温度センサを大面積フレキシブル基板上に印刷形成することで低価格・多機能フレキシブルデバイスを作製した。歪み工学に基づいた3次元構造をフレキシブル基板上に適用することで、「触覚」と「すべり」応力を同時に検出することが可能であることを確認した。さらに各センサをアレイ状に集積化させることで、人の指先のように「触覚」「すべり」「温度」分布計測可能な電子皮膚デバイスを作製することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed an artificial electronic skin that enables to detect "tactile force", "friction force", and "temperature" distributions inspired by a human skin for a robotic and a prosthesis applications. In particular, macro-scale printing techniques of strain and temperature sensors were particularly developed for low-cost, multi-functional flexible devices. Based on a strain engineering, simultaneous detections of "tactile" and "friction" forces were realized by integrating with a three-dimensional structure on a flexible substrate. Finally, 3×3 array artificial electronic skin was successfully demonstrated.

研究分野：フレキシブルデバイス

キーワード：フレキシブルデバイス 電子皮膚 歪みセンサ 温度センサ 印刷技術

1. 研究開始当初の背景

人間の優れた機能を真似たヒューマンインターフェースとして人工電子皮膚の研究が盛んに行われている。本人工電子皮膚の実用化にはいくつかの課題が残されている。その課題は、(1) ロボット全体を覆う大面積フレキシブル基板上での皮膚機能、(2) 人の皮膚機能の完全模倣、(3) 電子皮膚とロボット又は人とのインターフェース開発などが挙げられる。特に、ロボットや義手等への応用を考慮すると、人の皮膚のように「触覚」に加えて「すべり」センサの実現が必要不可欠である。実際、人の手は、触覚とすべりの検知により物を持つ圧力を決定し、対象とする物の落下や破壊を防いでいる。しかしながら、電子皮膚実現に必要な課題(1)の大面積且つフレキシブル基板上でのデバイス作製という高いハードルから、現状は「触覚」センサアレイのみの開発がほとんどである。本申請者も同様に、触覚を検知可能な電子皮膚や基板の曲げによる歪みを検出するセンサアレイを実現してきたが、「触覚」と「すべり」を同時に検出可能な電子皮膚デバイスの開発は現状出来ていない。

2. 研究の目的

本研究では新たな発想のもと、“指紋”構造を提案し、「触覚」と「すべり」センサ両方を兼ね備えた人工電子皮膚を実現する(図1)。さらに人の皮膚機能として重要な「温度」分布計測も可能にするため、温度センサアレイの集積化も行う。本研究では、デバイスの大面積化及び低価格化実現へ向け、全てのセンサ素子及び電極材料を印刷技術により形成する技術開発も同時に行う。

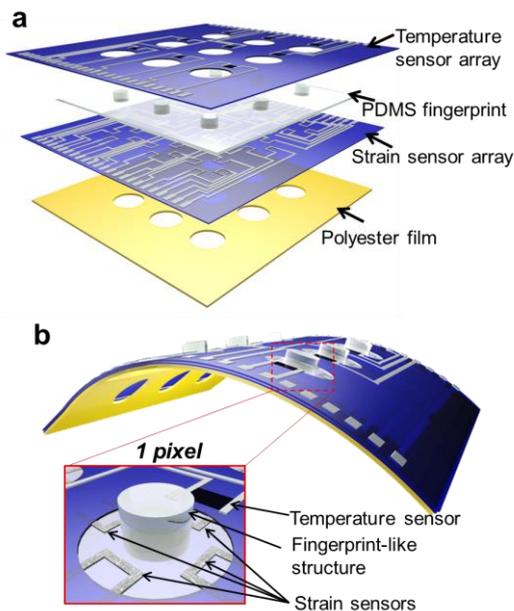


図1 提案する「触覚」「すべり」「温度」分布計測可能な全印刷形成による電子皮膚デバイスの(a)各層の詳細及び(b)最終構造。

3. 研究の方法

本研究で開発した電子皮膚デバイスは、大面積印刷技術によるフレキシブル基板上への「歪み」センサ及び「温度」センサの集積、さらに構造を工夫することで実現する「すべり」検出機能を付与する構造を提案し、実際にそのプロセス開発及び評価を行った。歪みセンサには、カーボンナノチューブ(CNT)インクと銀ナノ粒子(AgNP)インクを重量比 5:3 の割合で混合したインクを開発し、それを実際にスクリーン印刷にて印刷形成した。温度センサは、CNT インクと導電性ポリマーの PEDOT:PSS 溶液を重量比 1:3 の割合で混合したインクを開発し、印刷形成した。共に印刷後、70°Cで焼成を行った。両センサ共に抵抗変化型のセンサである。電気配線は、Ag 電極を同様にスクリーン印刷することで形成した。実際に作製したデバイスを機械的刺激に対する電氣的評価することで電子皮膚デバイスとしての可能性を評価した。

4. 研究成果

図1の構造を実現するデバイスのプロセス開発を行った。新規プロセスにより、実際に作製した3×3アレイの「触覚」「すべり」「温度」分布計測可能な電子皮膚デバイスを図2に示す。「すべり」応力印加時に歪み分布を形成するためにPDMSを用いて三次元構造(Fingerprint-like structure)を形成した。1ピクセルに、歪み分布を計測する目的で歪みセンサを4個、温度センサは1-2個を集積化させた。

(1) 有限要素法による歪み分布解析

電氣的評価を行う前に、まず有限要素法にて「触覚」「すべり」応力がPDMSの3次元構造にそれぞれ印加された場合の、4個の歪みセンサに加わる歪み分布を解析した。図3に有限要素法による歪み分布の結果を示す。歪みセンサは図1に示すPolyesterフィルム上に皮膚膜のように形成されており、図3aに示すように「触覚」応力印加時は、全体が下に押し下げられる。それに対して「すべり」応

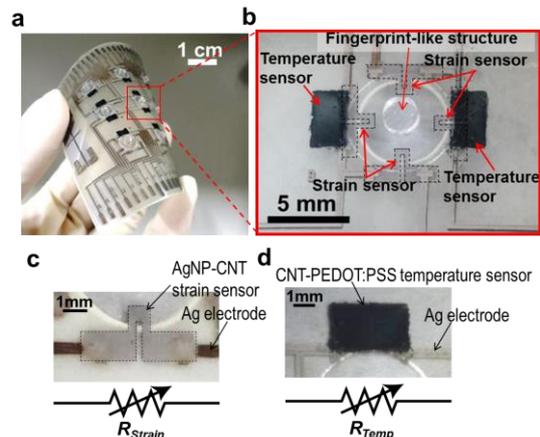


図2 (a) (b) 作製した「触覚」「すべり」「温度」分布計測可能な電子皮膚デバイス。(c) 歪みセンサと(d)温度センサの拡大写真。

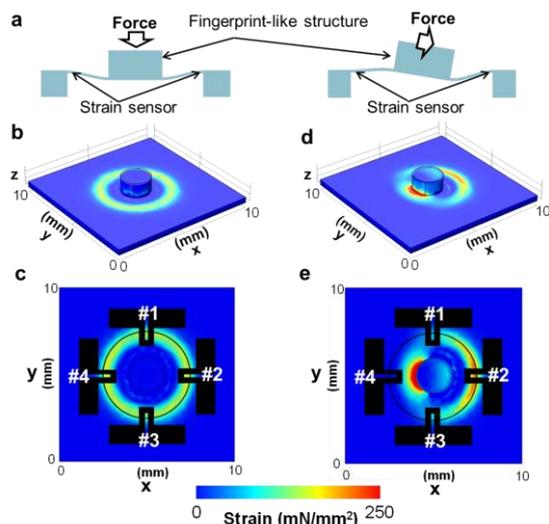


図3 有限要素法による「触覚」及び「すべり」応力印加時の歪み分布結果。(a) 各応力時の断面構造、(b) (c) 「触覚」応力印加時の歪み分布、(d) (e) 「すべり」応力印加時の歪み分布。(c) (e) 中の番号は、歪み分布を計測する歪みセンサ番号を示す。

力印加時は、センサ部分が波打ったような形状となるのがわかる。この時の歪み分布結果を図 3c-e に示す。まず「触覚」応力印加時は、3次元構造を中心に上下左右対称の歪み分布が形成される。よって図 3c に示すように歪みセンサを4個形成した場合は、全ての歪みセンサは同じ歪みを検出することが予想できる。対照的に、「すべり」応力印加時は、図 3d-e のように非対称な歪み分布となる。特に図 3e 中の#2と#4の歪みセンサの出力は大きく異なることが予想できる。また#1と#3の歪み量はほぼ同量であるが、これは「すべり」応力である横方向の応力に加え、「触覚」応力である縦方向の応力に大きく依存する。これらの結果から、4個の歪みセンサで歪み分布を計測することで「触覚」と「すべり」を同時に検出することが可能となる。

### (2) 1ピクセルの電気的評価

「触覚」応力及び「すべり」応力印加時の歪みセンサの抵抗変化について計測を行った。最初に「触覚」応力印加時の歪みセンサ#1の抵抗変化率を図 4a に示す。また本結果には、支持基板である Polyester フィルムの膜厚  $T$  を変化した場合の結果も同時に示している。まず Polyester フィルムの膜厚に大きく依存するが、触覚応力が増大するにつれて抵抗変化率も大きくなっているのがわかる。これは「触覚」応力印加により歪みセンサに引っ張り応力が印加されるためである。また Polyester フィルムの膜厚依存性については、フィルム膜厚が非常に薄いため、一定以上の触覚応力で歪みセンサを形成した PET フィルムが底(土台)に達してしまい、それ以上の応力をセンサに印加出来ないためである。事実、フィルム膜厚を厚くすることで測定できる応力値は増大しているのが

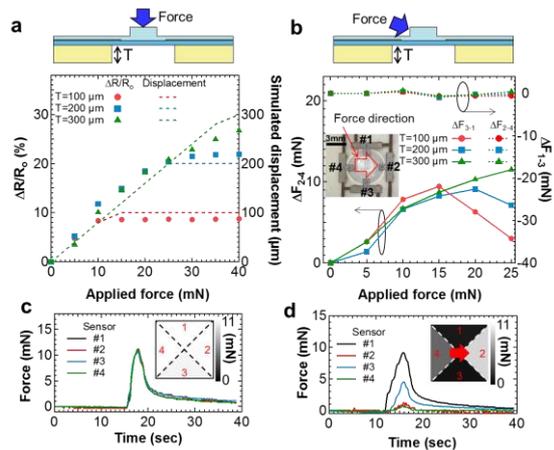


図4 (a) 「触覚」応力印加時の#1の歪みセンサの抵抗変化率。支持基板の厚さ  $T$  を変えた時のそれぞれの結果を示す。(b) 「すべり」応力印加時の#2と#4、#1と#3のそれぞれの抵抗変化。(c) 「触覚」と(d) 「すべり」応力印加時のリアルタイム計測結果。差込み図は、それぞれのセンサの最大値を2次元マッピングした結果を示す。

わかる。これにより、測定対象とする応力により、Polyester フィルムの膜厚を変化させることで、大きな応力が印加された場合においても、デバイスの破壊を防ぐことが可能であることを示している。

次に「すべり」応力印加時の抵抗変化の結果を図 4b に示す。本結果は、図 3 の歪みセンサ#2と#4、#1と#3の抵抗の差分で示す。本結果から明らかなように歪みセンサ#1と#3の差分はほぼゼロであるのに対して、歪みセンサ#2と#4の差分に大きな抵抗変化が生じている。これは図 3 の有限要素法で示したように「すべり」応力印加により#2と#4には歪み量で大きな差が生じているためである。本結果をもとに、「触覚」及び「すべり」応力印加時のリアルタイム計測を行った。図 4c には、「触覚」応力印加時の結果を示し、全ての歪みセンサが有限要素法で解析したようにほぼ同じ歪み量を検出しているのがわかる。それに対して、図 4d に示すように「すべり」応力印加時は、各歪みセンサで歪み量の変化が観測出来ている。本歪み量の変化を2次元分布で表記した結果を図 4d 差込み図で示す。結果から、歪みセンサで計測した歪み分布が有限要素法によって得られた結果(図 3e)と類似した結果が得られていることがわかる。これらの結果から、本研究で提案した全印刷法による3次元構造を有した歪みセンサアレイにて、「触覚」と「すべり」をリアルタイムで同時計測可能であることが確認できた。

### (3) 温度センサ

皮膚機能の一つである温度検出に向け、温度センサの解析を行った。図 5a は温度変化に対する温度センサの抵抗変化率を示す。測定は、3次元構造の上に熱源を形成して行った。結果から明らかなように、温度上昇に対

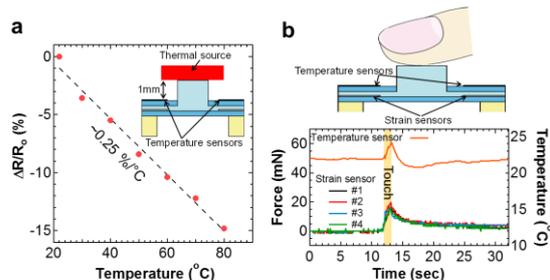


図5 (a) 集積化させた温度センサの温度に対する抵抗変化率。(b) 温度センサと触覚センサ(#1-#4)を同時計測した結果。

して、線形的に温度センサの抵抗が減少しているのがわかる。これは本温度センサが、CNTとPEDOT:PSS界面の電子ホッピング伝導を利用したものであり、高温になるほどホッピング伝導確率が上がるため抵抗が下がる。その感度は、約 0.25 %/°Cであった。同時に、歪みセンサと温度センサを同時にリアルタイムで測定を行った。本実験では、「触覚」応力印加時の全歪みセンサと温度センサの出力結果を観察した。図 5b に示すように、人の指で触覚を印加することで、皮膚温度による温度変化及び触覚による歪み検出ができていたことがわかる。本結果から、温度センサと歪みセンサの集積化により人の皮膚機能を限りなく真似たデバイスを作製可能であることが示唆できた。

#### (4) 「触覚」「すべり」「温度」マッピング

最後に、上述してきた「触覚」「すべり」応力検出センサと温度センサを3×3アレイで集積化させた電子皮膚デバイスを作製した。図 6(a)に「触覚」応力を図 6(b)に「すべり」応力を印加した際の各ピクセルの歪みセンサ及び温度センサの出力結果を示す。なお、実験は指で触覚及びすべり応力を印加した。結果から明らかなように、触覚応力印加時は、1ピクセルの4個の歪みセンサが同等な出力を検出し、すべり応力印加時は、歪みの分布が検出された。本結果から「触覚」と「すべり」応力をアレイ状で計測が可能であることがわかった。また皮膚温度と測定環境の温度差の関係から、センサに応力を印加すると同時に、温度差による温度分布の計測も可能であった。

#### (5) まとめ

本研究では、フレキシブル基板上への歪みセンサと温度センサを印刷形成し、さらに歪み工学に基づいた新規構造を提案することで、初めて「触覚」「すべり」「温度」分布計測可能な電子皮膚デバイスの開発に成功した。また本稿では示さないが、本技術をさらに応用・発展させることで、基板の曲げによる歪みを検知せず、触覚のみを感知する電子皮膚デバイス、さらに本温度センサの高感度化としたフレキシブル回路との集積化などを実現してきた。本成果は、今後のフレキシ

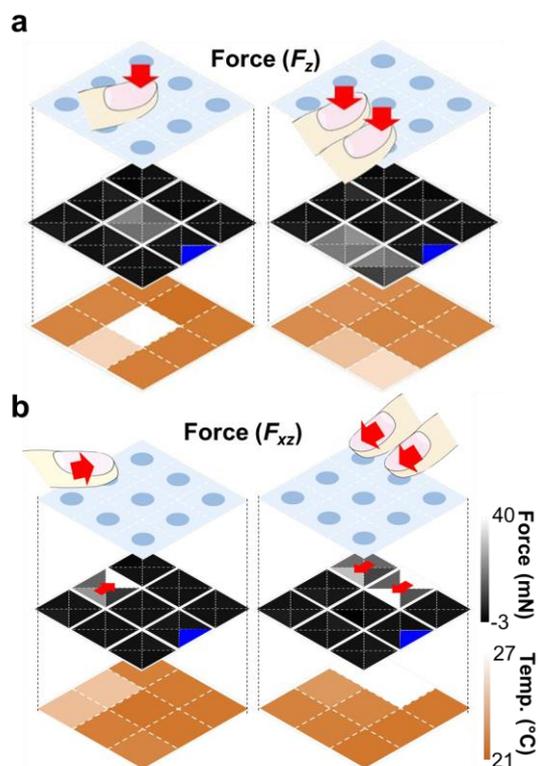


図6 「触覚」「すべり」「温度」分布計測3×3アレイ電子皮膚デバイスのデモ。(a) 「触覚」応力印加時、(b) 「すべり」応力印加時の各歪みセンサと温度センサの出力結果。

ブルデバイス分野において重要な知見となることが期待できる。

#### 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 12 件)

- ① S. Nakata, K. Kanao, S. Harada, T. Arie, K. Takei, An Extremely Highly Selective Flexible Compliant Tactile Sensor Sheet, *Physica Status Solidi A*, 査読有, 13, 2016, in press, DOI:10.1002/pssa.201600078.
- ② W. Honda, S. Harada, S. Ishida, T. Arie, S. Akita, K. Takei, Highly Performance, Mechanically Flexible, and Vertically Integrated Three-Dimensional Carbon Nanotube and InGaZnO Complementary Circuits With a Temperature Sensor, *Advanced Materials*, 査読有, 27, 2015, 4674-4680, DOI:10.1002/adma.201502116.
- ③ K. Takei, W. Honda, S. Harada, T. Arie, S. Akita, Toward Flexible and Wearable Human-Interactive Health-Monitoring Devices, *Advanced Healthcare Materials*, 査読有, 4, 2015, 487-500, DOI: 10.1002/adhm.201400546.
- ④ K. Kanao, S. Harada, Y. Yamamoto, W. Honda, T. Arie, S. Akita, K. Takei,

Highly Selective Flexible Tactile Strain and Temperature Sensors against Substrate Bending for an Artificial Skin, RSC Advances, 査読有, 5, 2015, 3017-30174, DOI:10.1039/c5ra03110a.

- ⑤ W. Honda, T. Arie, S. Akita, K. Takei, Printable and Foldable Electrodes Based on a Carbon Nanotube-Polymer Composite, Physica Status Solidi A, 査読有, Vol. 11, 2014, 2631-2634, DOI:10.1002/pssa.201431481.
- ⑥ S. Harada, K. Kanao, Y. Yamamoto, T. Arie, S. Akita, K. Takei, Fully Printed Flexible Fingerprint-like Three-Axis Tactile and Slip Force and Temperature Sensors for Artificial Skin, ACS Nano, 査読有, Vol. 8, 2014, 12851-12857, DOI:10.1021/nm506293y.

[学会発表] (計 35 件)

- ① K. Takei, Challenge and Perspective of Macro-Scale, Multi-Functional High Performance Flexible Electronics, SPIE Defense+Commercial Sensing, 2016年4月19日, Baltimore, USA.
- ② K. Kanao, S. Nakata, T. Arie, S. Akita, K. Takei, All Solution-Processed Flexible Memory Integrated with Tactile Sensor, 29<sup>th</sup> IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical System (MEMS2016), 2016年1月27日, Shanghai, China.
- ③ S. Nakata, K. Kanao, S. Harada, T. Arie, S. Akita, K. Takei, Flexible and High Selective Pressure Sensitive Rubber for Tactile Sensing, 29<sup>th</sup> IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical System (MEMS2016), 2016年1月25日, Shanghai, China.
- ④ 竹井邦晴, 高性能・多機能フレキシブルセンサシート, 有機エレクトロニクス材料研究会 第215回研究会, 2016年1月22日, 新宿NSビル (東京都新宿区).
- ⑤ K. Takei, Printed High Performance Flexible Device Sheets, 228<sup>th</sup> ECS Meeting, 2015年10月13日, Phoenix, USA.
- ⑥ K. Takei, Flexible and Wearable Sensors, 16<sup>th</sup> International Conference on Human-Computer Interaction, 2015年8月7日, Los Angeles, USA.
- ⑦ K. Takei, Inorganic-Based Heterogeneously Integrated Flexible Transistors and Sensors, 15<sup>th</sup> International Meeting on Information Display (IMID2015), 2015年8月21日, Daegu, Korea.
- ⑧ K. Takei, Carbon Nanotube-Based Printed Flexible Electronics: Materials, Fabrication, and

Applications, 16<sup>th</sup> International Conference on the Science and Application of Nanotube (NT15), 2015年6月28日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市).

- ⑨ S. Harada, K. Kanao, Y. Yamamoto, T. Arie, S. Akita, K. Takei, Flexible, Printed Tactile, Friction, and Temperature sensor array for Artificial Skin, 18<sup>th</sup> International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2015), 2015年6月23日, Anchorage, USA.
- ⑩ W. Honda, T. Arie, S. Akita, K. Takei, Inorganic Material-Based Flexible CMOS Circuit and Optical Sensor, 18<sup>th</sup> International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2015), 2015年6月24日, Anchorage, USA.
- ⑪ 竹井邦晴, ウェアラブルデバイスの開発動向と材料ニーズ, 新化学技術推進協会次世代エレクトロニクス分科会講演会, 2015年3月17日, 新化学技術推進協会 (東京都千代田区)
- ⑫ K. Kanao, S. Harada, Y. Yamamoto, W. Honda, T. Arie, S. Akita, K. Takei, Printable Flexible Tactile Pressure and Temperature Sensors with High Selectivity against Bending, 28<sup>th</sup> IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical System (MEMS2016), 2015年1月20日, Estoril, Portugal.
- ⑬ 竹井邦晴, 印刷形成したフレキシブルセンサシートの開発, センシング技術応用研究会第190回研究例会, 2015年1月30日, 大阪府立大学 I-site なんば (大阪府大阪市).
- ⑭ W. Honda, S. Harada, T. Arie, S. Akita, K. Takei, Printed Wearable Temperature Sensor for Health Monitoring, IEEE Sensors 2014, 2014年11月5日, Valencia, Spain.
- ⑮ K. Takei, S. Harada, W. Honda, T. Arie, S. Akita, Nanomaterial-Based Macroscale Printable Flexible Sensors, 226<sup>th</sup> ECS Meeting, 2014年10月6日, Cancun, Mexico.
- ⑯ K. Takei, Human Interactive Wearable Devices: Applications of Artificial Electronic Skins and Smart Bandages, 16<sup>th</sup> International Conference on Human-Computer Interaction (HCI 2015), 2014年6月27日, Crete, Greece.
- ⑰ K. Takei, Printable Nanomaterial Devices on User-Defined Substrates, Mingdao Forum, Business Technology Fair, 2014年5月28日, Shanghai, China.

[図書] (計 2 件)

- ① 竹井邦晴他, 技術情報協会, ウェアラブルデバイスの小型, 薄型化と伸縮, 柔軟性の向上技術 (分担執筆), 2015, 510 (455-463).
- ② K. Takei 他, Springer, Wearable and Flexible Sensor Sheets Toward Periodic Health Monitoring (分担執筆), 2015, 333 (175-191).

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 触覚センサ及び集積化センサ  
発明者: 竹井邦晴, 原田真吾  
権利者: 竹井邦晴, 原田真吾  
種類: 特許  
番号: 2014-182263  
出願年月日: 2014年9月8日  
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/kuniharutakei/home>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

竹井 邦晴 (TAKEI, Kuniharu)  
大阪府立大学工学研究科・助教  
研究者番号: 20630833