

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23700226

 研究課題名（和文） 人工マトリクス・スキンと階層型情報処理モデルによる  
触覚知覚に関する研究

 研究課題名（英文） A study of haptic perception of artificial skin matrix  
by hierarchical signal processing model

研究代表者

中本 裕之 (NAKAMOTO HIROYUKI)

神戸大学・大学院システム情報学研究科・システム科学専攻・助教

研究者番号：30470256

研究成果の概要（和文）：人間の皮膚と同様に柔軟かつ順応特性の異なる2種の受容器をもち、多様な触覚知覚を同時に可能とする人工スキンの研究開発を実施した。接触の検出原理として磁気を用いることで、高感度で頑強な構造の人工スキンを実現した。階層型情報処理モデルによって、粗さ感などの触感テクスチャの評価や産業用ロボットの手先であるグリッパへの応用などを検討し、提案する人工スキンの有用性を検証した。

研究成果の概要（英文）：An artificial skin which is soft and includes two sensors, has been proposed. The features of the artificial skin are a high sensitivity and a tough structure by using a changing of magnetic field. The artificial skin has measured tactile textures, and has been applied to a gripper for industrial robots by a hierarchical signal processing model. The results have verified an effectiveness of the artificial skin.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学 ・ 知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：センシングデバイス・システム、人工スキン、触覚情報処理

## 1. 研究開始当初の背景

皮膚は成人において1.6～1.8m<sup>2</sup>の面積と3～5kgの重量を有しており、人間のもつ最大の器官とも呼ばれる。人間はその皮膚を經由して触覚を知覚しており、触覚は人間の日々の生活におけるあらゆる作業に対して利用されている。したがって、対象物との接触時の機械的変形を検出し、それを触覚情報として定量化できる触覚センサや人工スキンが実現すれば様々な応用が可能と考えられる。人間が装着・把持・操作するものに関する使用感の評価や、触覚ディスプレイと組み合わせた触覚フィードバック、ロボットの手先や全身への触覚の付与によるロボットの高機能化などが挙げられ、人工スキンの応用は産業分野にとらわれない広がり期待できる。

この期待を受けて、国内・国外を問わず触覚センサに関する研究例が多くある。主に接触による圧力や表面変形を検出するため、感圧導電性ゴムや導電性塗料、ダイアフラムや梁が変形した際の容量変化、圧電素子、光学素子、音響的共鳴など様々な計測方法が提案されてきた。しかしながら、一部製品化されたものがあるものの、広く普及するまでには至っていない。この原因としては、薄く平板なシート状構造のものが多く柔軟性が無いこと、計測できる対象が限定されていること（例えば、圧力のみ、すべりのみ）や、必ず接触を伴うことから断線や破損の不具合が解消しきれないことなどが挙げられる。

一方、人間の触覚に着目すると、圧力、すべり、テクスチャ（例えば、つるつる感やざ

らざら感など)などを柔軟な皮膚から同時に取得することができる。これについては、人間の皮膚内には速い刺激に発火する受容器と定常的な刺激に発火する受容器が、ともに柔軟な皮膚の浅い層と深い層に適切に配置される構造が重要であるとの指摘がある。さらに、各受容器は皮膚変形という単純な刺激に発火しているのみであるが、脳の体性感覚野における階層的な情報処理が圧力やすべりのみならず、形状や堅さ、テクスチャなどの様々な知覚を行うと考えられている。

## 2. 研究の目的

先行研究の課題と人間の触覚を考慮し、本研究における触覚センサに備えるべき条件は次とした。

- A) 人間の皮膚と同様に柔軟に対象と接触できること
- B) 断線が生じにくく、摩耗のある接触面の交換が容易な単純な構造であること
- C) 接触に関する定常的な刺激(変位・圧力)と速い刺激(振動刺激)を異なる素子で同時に計測できること
- D) 各素子からの出力を統合して扱い、高次の情報処理で知覚を行うこと

A)から C)までの条件を満たすことが可能な触覚センサ、磁気式触覚センサ(以下、ユニットスキンと呼ぶ)を基盤技術としてユニットスキンを構成する。このユニットスキンは主に柔軟層と基板層から成り、シリコンゴムなどの柔軟な素材で成形される柔軟層は永久磁石を内包する。基板層は回路基板であり、磁気抵抗素子とインダクタの2種類の素子を備える。柔軟層と基板層間に物理的な配線が無いことから断線がなく、繰り返しの接触により柔軟層が摩耗しても交換が容易な構造である。動作原理を次に述べる。対象物との接触によって柔軟層が変形し、内包される永久磁石も基板層に対して変位する。このときの永久磁石から受ける磁界の強さを磁気抵抗素子で計測し、その計測値から変位や力を算出する。同時に、磁束密度の変化の速度をインダクタで計測し、その計測値の波形から振動の振幅や振動数、滑りの検出が可能である。ただし、条件 D)を満たすためには、ユニットスキン内の素子の出力から知覚情報へ変換する必要がある。さらには、触覚センサの複数個並べた分布型のマトリクス・スキンを開発することで、時間および空間に対して自由度をもつ情報の取得が可能となる。

そこで本研究では、まずマトリクス・スキンの検出素子となる磁気抵抗素子とインダクタの出力を扱える階層型の触覚情報処理モデルを提案する。このモデルによって、粗さ感の評価、具体的にはサンドペーパーの粗度の違いを識別することが可能なことを、ユニットスキンを用いて検証する。続いて、隣

接するセンサ間がシームレスな構造となるようなマトリクス・スキンを設計・製作する。1点あるいは複数点に変形を与えた場合にマトリクス・スキンが出力する変形や力の精度や空間分解能に関して評価する。次に、先に述べた階層型の触覚情報処理モデルをマトリクス・スキンに適用し、粗さ感の識別の可能性について検証する。最後に、産業用ロボットの手に用いられるグリップにマトリクス・スキンを装着し、マシュマロと金属のブロックといった柔軟性の全く異なる対象物の把持が可能であることを確認する。提案するマトリクス・スキンと分布型触覚情報処理モデルによって、粗さ感の識別やグリップのインテリジェンス化の可能性を検証する。これらのことを通じて、人工皮膚となりうるマトリクス・スキンを実現することを本研究の目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では2で述べた目的を達成するため、3つのサブテーマを設定し研究を推進した。サブテーマは、(1)情報処理モデルの構築、(2)マトリクス・スキンの製作、(3)ロボットへの適用と評価である。各サブテーマの具体的な方法について次に述べる。

(1) ユニットスキンのもつ磁気抵抗素子とインダクタの出力を融合することを目的として、階層型の触覚情報処理モデルを構築した。触覚情報処理モデルの案を図1に示す。この触覚情報処理モデルは、脳の体性感覚野の解剖学的結合が3a野もしくは3b野から1野へ、1野から2野へと階層性を有しており、階層の後方に行くにつれ、より複雑な情報処理をしているという知見を元に構成した。触覚情報処理モデルは入力層、中間層、出力層の3層構造とし、ユニットスキンの各素子の出力を受け、最終的に具体的な粗さ感などの触覚知覚を出力する。入力層は、計測目的に応じて処理に用いる入力を選択とローパスフィルタなどの単純なフィルタ処理を行う。すなわち、情報を選択し整える役割を担う。中間層は、入力層から受けた情報の特徴を定量化(例えば、既知の波形との類似度やインパルス状の急峻な変動の回数など)する。出

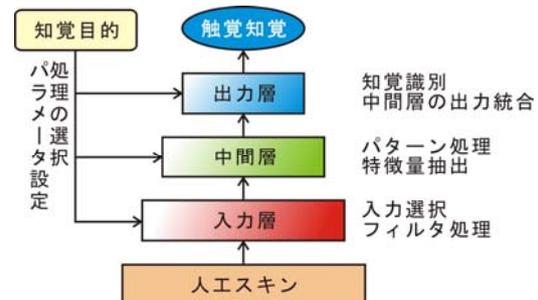


図1 階層型情報処理モデル

力層は、定量化した特徴量に基づいて脆さや粘着性があるなどの意味づけを行い、それを触覚知覚として出力する。このように触覚情報処理モデルは、入力層から出力層へと遷移する過程において、入力された情報を選択・集約し知覚を行う。提案するモデルを検証するため、このモデルを搭載し 1kHz のサンプリングに基づくリアルタイムに処理の可能な計測処理回路とそれに対応したユニットスキンを製作し、提案する階層型触覚情報処理モデルの検証を行った。

(2) ユニットスキンを分布型に拡張したマトリクス・スキンを設計・製作した。その模式図を図 2 に示す。このマトリクス・スキンでは、ユニットスキンを分布させるだけでなく、センサ間がシームレスとなる構造とした。シリコンやウレタンなど柔らかい高分子材料を用いて柔軟層を成型し、その成型の過程で磁石を格子状に配置した。このとき、隣接する磁石の発生する磁界が干渉しないよう、磁界シミュレーションにより磁石の選定、磁石間の距離を決定した。基板層はガラスエポキシ素材の回路基板を用いた。これら 2 つの層にある磁石と素子の位置を合わせ、2 層を張り合わせることで 2 点及び 4 点のユニットスキンからなるマトリクス・スキンを構成した。同時にマトリクス・スキンの出力を取得し、情報処理モデルの動作が可能な計測処理回路を設計・製作した。マトリクス・スキン中のユニットスキン間は高分子材料によって繋がっており、図 2 に示すように 1 点に対する荷重や変位に対して複数のユニットスキンが応答する。そこでユニットスキンに対して評価してきた変位や力の精度などに加えてそれらの空間分解能も評価し、分布型触覚センサとしてのマトリクス・スキンの基礎的な有効性を検証した。

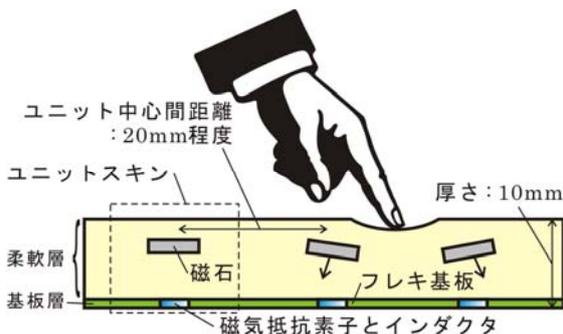


図 2 マトリクス・スキンの断面図

(3) マトリクス・スキンの有効性を検証するため、産業用ロボットの手先となるグリッパに適用し、柔軟な対象物でも破壊せず把持できることを確認する。また、マネキンに 2 つのユニットスキンから成るマトリクス・ス

キンを適用し、靴の締め付けなどの評価が可能なことを示す。

#### 4. 研究成果

(1) 図 1 に示した階層型情報処理モデルの各層に実装を行った。まず、入力層について述べる。電磁気ノイズを発生させるモータ等がマトリクス・スキンに近接している場合、その影響を受けて出力電圧が変化する。そこで、それらの影響を除去するため高周波ノイズのフィルタ回路をマトリクス・スキンの増幅回路に付加し入力層とした。100 Hz 以上のノイズをカットすることで、図 3 に示すようにモータによる磁気ノイズの無い場合、ほぼ一定の値が得られているが、磁気ノイズがありフィルタが無い場合は大きく 0.05 V 程度の変動があることが分かる。一方、磁気ノイズがあってもフィルタを付加した場合、モータがない場合と同様の出力の変動となり、安定した計測が可能なことが読み取れる。

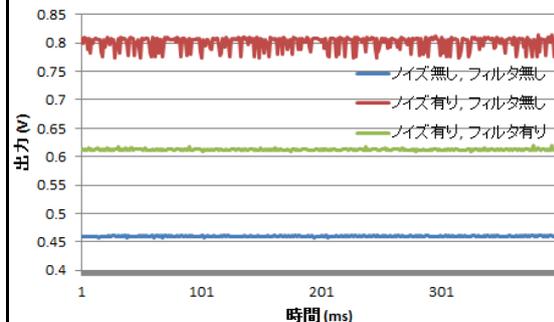


図 3 入力層のノイズ除去効果

次に中間層については、サポートベクターマシン (以下、SVM とする) を用いた触覚識別器を実装した。出力層については SMV から出される出力結果に対してラベリングをすることとした。ユニットスキンに対して、アルミニウム、ボール紙、サンドペーパー (粗度 800、400、240、120、80) の 8 種類の試験片を、0.3 N、0.5 N、1.0 N の 3 種類の接触力で押し付け、20 mm/s、40 mm/s の 2 種類の速度で並進移動、すなわちなぞり動作をさせた場合の出力電圧を各 10 回ずつ計測した。計測結果のうち学習サンプルとして 7 回分を用いて SVM の学習を行い、その後すべての計測結果を用いて識別を行った結果を表 1 に示す。表 1 の各数値は、10 回中の識別の正答数を表しており、最も右の列は接触力と並進速度の条件に対する正答数の合計を示す。今回の実験で用いた試験片に対する識別の正答数は、1.0 N で押し付けて 20 mm/s で並進運動させた場合が最も多く、設定した条件の中で触覚評価に有効な条件であると考えられる。各条件の正答数を確認すると、接触力及びなぞり速度が小さい場合に正答数が多い場合と、逆の場合があり、試験片に対して

表1 8種類の試験片の識別結果

condition	aluminum	pasteboard	copier paper	800	400	240	120	80	total
0.3 N 20 mm/s	6	10	10	9	10	3	6	10	64
0.5 N 20 mm/s	5	7	10	9	9	9	8	8	65
1.0 N 20 mm/s	10	9	6	10	9	10	10	10	74
0.3 N 40 mm/s	9	6	10	10	9	7	10	10	71
0.5 N 40 mm/s	10	6	10	6	8	9	9	10	68
1.0 N 40 mm/s	10	8	6	8	7	7	10	10	66

適切な接触力となぞり速度の設定が必要であることが分かる。人間がなぞり動作をする場合においても、なぞり動作をしながら接触力やその速度を調整して、最も識別しやすい条件に調整をしていると考えられる。本研究で実装した中間層においてそのような傾向が表れたことで、人工スキンとしての可能性を検証できたと考える。

(2) マトリクス・スキンの出力の評価を行った。マトリクス・スキンはユニットスキンを複数個用いて構成するが、図2に示すようにユニット間はシームレスな柔軟層で覆う構造とした。試作した2つのユニットからなるマトリクス・スキンを図4に示す。柔軟層の厚さなどは図2に示した値と同じである。マトリクス・スキン中のGMRの出力電圧からユニット間に生じた接触の位置と深さに関するを求めた。この実験では1辺が10mmの立方体を用いて、図4に示したようにユニット間の中心に対し-10mmから10mmの領域に対して1mm間隔で10回ずつの接触を与えた。接触深さは1, 2, 3mmの3種類である。接触位置及び深さに関する結果をそれぞれ図5と図6に示す。図5では縦軸が目標値、横軸は実験値を示しており、直線が目標位置、直線上を縦方向に引かれた線が計測結果を示す。したがって、縦方向の線が短い方の計測結果が目標値に近いことが分かる。全体を通じて、計測誤差に偏りは無く、最大誤差が2mm程度の結果が得られた。このことから、厳密な接触位置の計測は困難であるものの、2mm程度の誤差を許容できるのであれば接触位置の検出が可能であることが分かった。

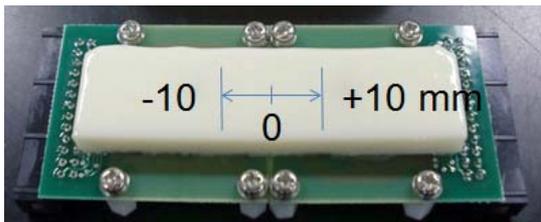


図4 2ユニットのユニットスキン

図6では横軸が接触位置、縦軸が接触深さを示しており、接触深さの計測誤差を示す。この図によると、接触深さが大きくなるにつれて誤差が大きくなるのが分かる。3mm押し込んだ場合では、0.5mmの計測誤差が生じている。この原因としては、柔軟層内の磁石の回転が影響しているものと考えられる。一方、1mmの押し込みであれば0.1mm程度の計測誤差となっており、押し込み深さが小さい場合には精度の高い計測ができることが分かった。

(3) 4(2)で述べたように、マトリクス・スキンは接触深さの浅い場合において高精度にその深さを計測可能である。そこで本研究では、マトリクス・スキンを産業用ロボットマニピュレータの手先として多用されるグリッパに適用して、様々な対象の把持に関する実験を行った。まず、硬度の異なるウレタンを把持させた場合の接触深さ計測の結果

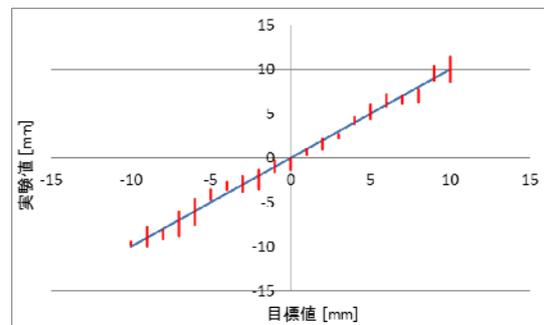


図5 接触位置の結果

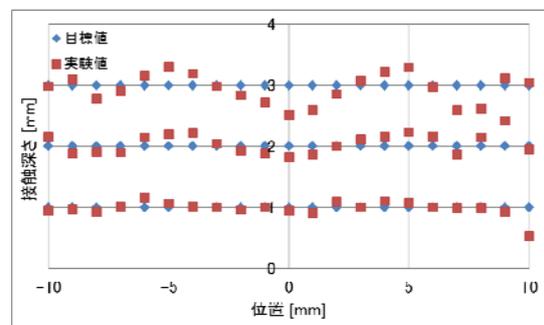


図6 接触深さの結果

を図7に示す。硬度が高いほど硬いことから、同じ把持速度で把持した場合、硬いものは接触深さの変化が大きく、柔らかいものは接触深さの変化は緩やかなことが分かる。このことは、接触した瞬間にその対象物の硬さの計測ができることを示している。接触深さが0.01 mmとなったときの10 msに対する深さの変形量を $\Delta z$ とした場合の把持を停止する接触深さの閾値 $z_{th}$ を式(1)に示す。

$$z_{th} = 0.1e^{5.0\Delta z} \quad (1)$$

この式では変形量が多い、すなわち硬い対象物は接触深さの閾値が大きくなり、しっかりと把持を行う。反対に、柔らかいものは接触深さの閾値場小さくなり、相手を変形させすぎないような柔らかい把持を実現する。この閾値を用いて実施した対象物を把持する実験の様子を図8に示す。この場合の対象物はマシュマロで、重さは3 gであり、閾値は0.1 mmとなった。一方、重さ500 gの真鍮のブロックを把持させた場合、閾値は0.43 mmとなった。同じ式(1)を用いて閾値の算出を

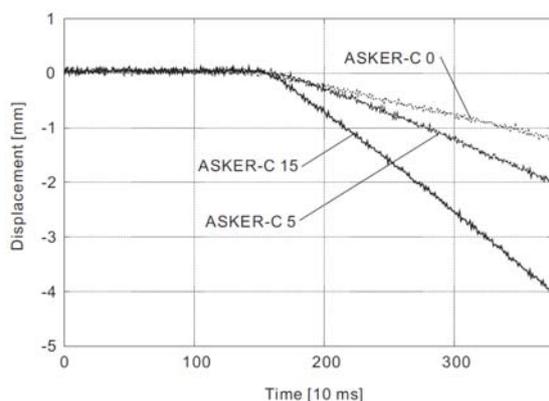


図7 柔らかさの異なる対象物に対する接触深さの計測結果



図8 マシュマロを把持するグリッパ

リアルタイムに行い、マシュマロのような柔らかいものから真鍮のような金属の塊まで容易に把持することができた。

(4) 本報告で述べたように、階層型情報処理モデルの構築と各階層の出力の有効性の確認、触感計測とグリッパへの応用を実施し、

提案するマトリクス・スキンの有効性を検証した。本研究の用途として挙げたマトリクス・スキンを適用した子供体型のマネキンを図9に示す。このマネキンは子供が使用する靴やランドセルの負荷の評価を行うために製作したものであり、特に肩にかかる負荷を評価する。方法としては、図7や図8で示したような接触位置と深さの計測に基づいて、負荷の大きさを評価できることを確認した。ただし、本研究の計画に挙げていなかった官能試験との整合性の確認までは進んでいない。マトリクス・スキンの今後の用途を確立するため、ヒトが知覚している触覚との比較検討が課題として挙げられる。今後は、マトリクス・スキンの高分解能化や高感度化を図りつつ、ヒトの触覚知覚の信号処理の研究へと推進する。

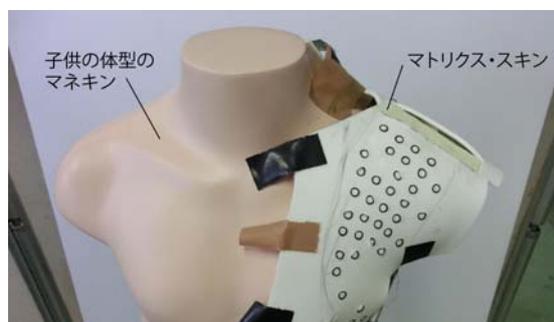


図9 センサを適用したマネキン

## 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3件)

- (1) NAKAMOTO Hiroyuki, GOKA Masanori, TAKENAWA Satoru, KIDA Yasuaki, Performance Evaluation of Magnetic Type Tactile Sensor, Studies in Applied Electromagnetic and Mechanics, Vol. 36, pp. 247-254, (2012) 査読有
- (2) NAKAMOTO Hiroyuki, TAKENAWA Satoru, Displacement and Force Measurement, Vibration Detection by Magnetic Type Tactile Sensor, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 37, pp. 196-210, (2012) 査読有
- (3) NAKAMOTO Hiroyuki, TAKENAWA Satoru, KIDA Yasuaki, Structure and Fundamental Evaluation of Magnetic Type Tactile Sensor, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 39, pp. 1021-1026, (2012) 査読有

〔学会発表〕(計 9 件)

- (1) 中本裕之、小林太、小島史男、ガウス・ニュートン法を用いた磁気式触覚センサの変位及び回転の推定、若林岳人、計測自動制御学会第 13 回システムインテグレーション部門講演会、2012. 12. 18-20、福岡国際会議場。
- (2) 黒田賢、武縄悟、中本裕之、内部磁石の回転を考慮したGMR触覚センサによる接触力計測、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012、2012. 5. 27-29、浜松アクトシティ。
- (3) NAKAMOTO Hiroyuki, TAKENAWA Satoru, Hysteresis Characteristic and Repeat Accuracy of Magnetic Type Tactile Sensor, The 17th International Workshop On Electromagnetic Nondestructive Evaluation, 2012. 7. 29-8. 1, Windsor Atlantica Hotel, Brazil.
- (4) 中本裕之、武縄悟、磁気式触覚センサのヒステリシスと再現性の評価、第 56 回システム制御情報学会研究発表講演会、2012. 5. 21-23、京都テルサ。
- (5) NAKAMOTO Hiroyuki, TAKENAWA Satoru, Displacement and force measurement, slip detection by magnetic type tactile sensor, International Workshop on Simulation and Modeling related to Computational Science and Robotics Technology, 2011. 11. 1-3, 神戸大学。
- (6) 中本裕之、武縄悟、小林太、小島史男、磁気式触覚センサの構造と基礎的評価、平成 23 年度日本設備管理学会秋季研究発表大会／第 3 回検査・評価・保全に関する連携講演会、2011. 12. 14-16、大阪府立大学。
- (7) 黒田賢、武縄悟、中本裕之、磁気式触覚センサ内部の永久磁石の回転角、第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、2011. 12. 23-25、京都大学。
- (8) NAKAMOTO Hiroyuki, TAKENAWA Satoru, KIDA Yasuaki, Structure and Fundamental Evaluation of Magnetic Type Tactile Sensor, 15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2011. 9. 6-9, Royal Continental Hotel, Italy.
- (9) NAKAMOTO Hiroyuki, TAKENAWA Satoru, KIDA Yasuaki, Development of Tactile Sensor using Magnetic Elements, 2011 IEEE Workshop on Robotic Intelligence in Informationally Structured Space, 2011. 4. 11-15, Universite Denis

Diderot, France.

〔図書〕(計 1 件)

- (1) KOJIMA Fumio, KOBAYASHI Futoshi, NAKAMOTO Hiroyuki (Editors), Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, No. 37, Simulation and modeling related to computational science and robotics technology, IOS Press, 2012

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.kojimalab.com/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中本 裕之 (NAKAMOTO HIROYUKI)

神戸大学・大学院システム情報学研究科・助教

研究者番号：30470256