

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 12 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630097

研究課題名(和文) 神経系の働きを含めた模擬循環器系の構成論構築とその応用

研究課題名(英文) Development of the construction theory for an artificial circulatory system including an artificial nerve system

研究代表者

菅野 重樹 (Sugano, Shigeki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00187634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、生物の血液循環器系の働きを工学的に模擬することで、(1)エネルギー供給、(2)老廃物運搬、(3)血液凝固による体組織の保護・修復、(4)温度調整などを含んだ多機能一体型システムを構築し、機械システムに応用することである。研究期間中は、組織の修復と老廃物運搬に焦点をあて、循環器系を利用した機械システムの自己修復および老廃物運搬・除去手法に関する研究を行った。また、物質運搬により修復する導線、センサの開発、構造部材の修復手法の開発、カプセルを利用した老廃物の吸着および除去手法の開発を行った。今後は神経系の働きを模擬することで、修復や老廃物の除去を効率的に行うシステムを構築する。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop an artificial circulatory system for mechanical systems. The circulatory system of living things has following functions: (1) energy supply, (2) waste transport, (3) protection of body tissue by blood clotting and repair, (4) control of body temperature. During the study period, we focused on the repair mechanism of tissues and the waste transport. Therefore, we studied self-repairing functions of mechanical system based on the circulatory system and waste transport and removal techniques. As results of our study, self-repairing conductor (MPW) and sensor (MPS), structural repair method and waste removal and transport method using encapsulated adsorbent were developed. In the future, we develop an efficiently repair and waste removal method with an artificial nervous system.

研究分野：知能機械学

キーワード：バイオメカニズム

1. 研究開始当初の背景

生物の循環器系システムは、生物が生存するために必要な(1)エネルギー供給、(2)老廃物運搬、(3)血液凝固による体組織の保護・修復、(4)温度調節の機能を有する多機能一体型システムである。

循環器系は情動や神経回路網の働きにより繊細な調整が成されている。例えば人が驚いた場合には心拍数を上昇させ、エネルギー供給を増やすことで未知の危険に備える。また平常時にも人の脳は血流により絶えず冷却されることで恒常性を保っている。血流は、前述した(1)~(4)のような異なる要求をバランスよく満たせるように、ハードウェア、ソフトウェアの両面から制御される。一方で、循環器系の工学的構成論ははまだ確立されていない。

本研究では、(1)~(4)の機能を満たす多機能一体型循環器系模擬システムを構築し、生体循環器系の理解や循環器系システムの工学的応用へとつなげる。

2. 研究の目的

上記の(1)~(4)の機能を備えたシステムを実現する上で、(2)と(3)の機能の研究が必要になる。(1)と(4)に関しては、燃料電池や水冷などの機能がすでに世の中に存在している。そのため、本研究の主なテーマは下記の2点である。

2.1 ロボットの部品の自己修復

本研究のシステムの特徴は、エネルギー供給をしながら自己修復の機能を実現することである。上記の4つの機能の内の(1)、(2)、(4)の機能を満たすだけでは、自動車などの現存するシステムでも同様のことが行われており、新規性に欠ける。(3)の機能にあたる自己修復の研究は、多くの研究が世界中でなされているが、本研究の循環器系システムに適合できる修復システムの研究は行われていない。そのため、本研究では循環器系システムを活用した自己修復機能の研究を行う。

2.2 老廃物の運搬および除去

(2)の機能にあたる研究であるが、多くの場合、世の中の製品において老廃物の除去は、フィルターを用いて行う。しかしながら、フィルター(特に微細な孔のもの)を用いると目詰まりが起こる。その結果、除去機能はたたらなくなるため交換が必要となる。本研究では、循環器系中に不純物の吸着機能を有する物質を流すことで、メンテナンスが容易なシステムを構築する。

3. 研究の方法

まずは、自己修復と老廃物除去に関する基盤技術の開発を行う。循環器系システムでの

運用を考慮して、すべての機能は溶液中で運用される。自己修復の機能に関しては、導線、センサ、骨格の修復に着目して、研究を行った。不純物除去の研究に関しては、吸着剤をカプセル化することで、排出が容易な形にした。不純物をそのカプセルに吸着することにより不純物を除去する。カプセルを循環器系に投入することで容易に交換が可能なシステムになる。

最終的には以下のようなシステムを目指す(図1)。

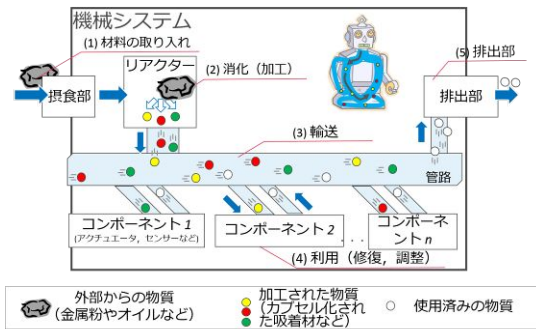


図1 人工循環器系システムの概要図

4. 研究成果

4.1 修復する導線

図2に修復する導線であるMPWを示す。MPWの導線部は磁石と鉄粉で構成されている。磁石を図のようにN極とS極が交互になるように配置し、鉄粉を加える。鉄粉は磁場に沿って整列し、一本の導線となる。ポンプと混合液は、断線時の修復の際に利用する。混合液は、エタノール(95%)100 [ml]と鉄粉(協和純薬工業株式会社、純鉄 #200,) 20 [g]の割合で構成されている。また、ポンプはツカサ電工のTG-85EPU-EB4-KA24Vを24 [V]で駆動して使用した。

MPWは、混合液をポンプで運搬することで破断箇所の修復が可能である。システムのポンプは、常に動き続けており混合液を循環させている。MPWの導線部が破損を受けて断線した際、混合液中の鉄粉が磁場に引き寄せられる(図3)。引き寄せられた鉄粉は、再び磁場に沿って整列し導線となる。これによりMPWは再度導通するようになり、断線状態から回復する。

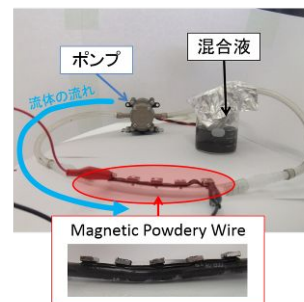


図2 Magnetic Powdery Wire (MPW)のシステム全体図

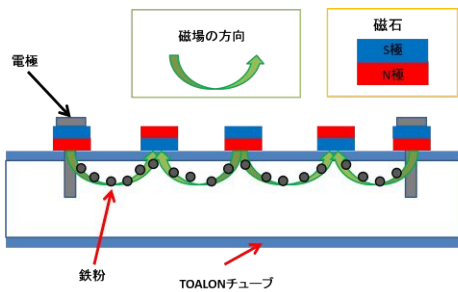


図3 MPWの概要図

MPWが断線時に修復するかを評価するための実験を行った。まず、MPWを図4のように断線状態にした。MPWの導線部の中心の磁石を取り除いた後にポンプを駆動し、鉄粉をその周辺から除去した状態を断線状態とした。その後、磁石を再び取り付けて、ポンプを駆動して混合液を循環させて、導線の修復処理を施した。信号実験と同様に、断線前の状態と断線状態、修復処理を施した状態のパルス信号を計測回路で計測した。パルス信号の電圧は5[V]で、周波数は1[kHz]とした。

図5に、修復後のMPWを示す。図6に、断線前の状態と断線状態、修復処理を施した状態での入力信号に対する出力信号の応答を示す。断線時は、信号が伝達できていない。一方で、修復処理を施した状態では破断前の状態と同様に信号伝達ができていることが確認できる。



図4 断線状態のMPW



図5 修復後のMPW

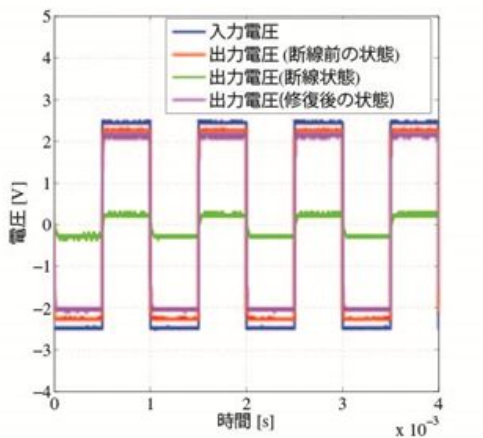


図6 入力電圧と出力電圧（断線前の状態，断線状態，修復後の状態）の比較

4.2 修復するセンサ

図7に修復するセンサであるMPSを示す。MPSのセンサ部は、磁石と鉄粉で構成されている。磁石を図11のようにABSの板に配置し、鉄粉を加える。鉄粉が磁場に引きつけられ、センサ部を構築する。ABS板の4隅には、ばねがついており、ABS板間に変位を加えた後に元の位置に戻るようになっている。

MPSは接触式変位センサで、ABS板の間の距離の変位を測定可能である。変位の測定は、板間の距離の変化した際のセンサ部の電気抵抗値の変化を利用する。板間の距離が変化しMPSのセンサ部の磁石の距離が変化した場合、センサ部の磁場の状態が変化する。その際、センシング部である鉄粉も磁場の変化とともに移動する。板間が近づいた場合は、センシング部の断面積が大きくなり、その高さは小さくなる。この場合、電気抵抗の原理から、抵抗値が小さくなる。板間が遠ざかった場合は、抵抗値が大きくなる。このように、MPSは板間の距離の変化による抵抗値の変化を測定することで、板間の距離の変位を計測可能である。

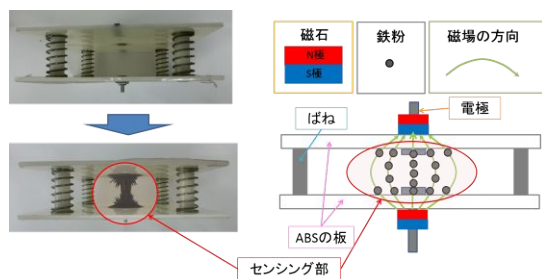


図7 Magnetic Powdery Sensor (MPS)：左図は、MPSの実物。右図は概要図

MPSは、MPW同様に混合液をポンプで運搬することで破断箇所の修復が可能である。システムのポンプは、常に動き続けており混合液を循環させている。MPSのセンシング部が破損した際、混合液中の鉄粉が磁場に引き寄せられる（図8）。引き寄せられた鉄粉は、再び磁場に沿って整列し導線となる。これによりMPSは再度導通するようになり、破損状態から回復する。

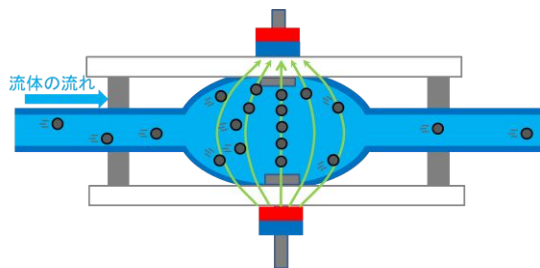


図8 MPSの修復機構

MPS の板間の距離の変位に対する電気抵抗値の変化を調べるための実験を行った。センシング部に鉄粉（協和純薬工業株式会社，純鉄 #200）8 [g]を加え，磁場に吸着しなかった鉄粉は除去した。その後，ABS の板間の距離を変化させ，抵抗値の変化を計測した。電圧はオシロスコープ（Pico Technology, PicoScope2205）で測定した。直流安定電源装置（菊水電子，PWR800L）を用いて，5 [V]の電圧を回路にかけて，距離の変位は，クランプを使って変化させ，変位量はノギスを使用して計測した。距離の変化と抵抗値の関係は繰り返し3回計測した。

図9に，板間の距離の変位に対する電気抵抗値の変化を示す。板間の距離が小さくなるにつれて，抵抗値が小さくなることを確認できる。このことからMPSは変位の計測が可能であるということを確認した。しかしながら，今回の実験では，1回目の計測では板間の距離と抵抗値の関係が線形であったが，変位回数を増やすと線形ではなくなった。

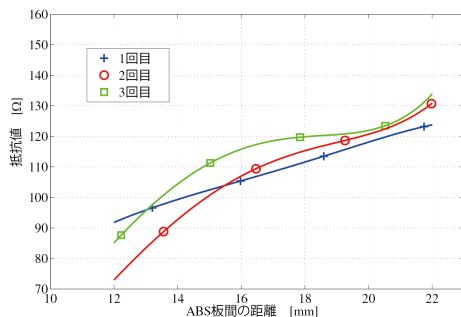


図9 ABS板間の距離と抵抗値の関係

MPS のセンシング部が破損した際に修復することが可能かを確かめるために，図10の装置を作成した。図7の状態では，混合液を流すことができないので，MPSのセンシング部を液体が漏れないようにシールした。最初はセンシング部に何も吸着させない状態にする。その後，ポンプ（WELCO，WP200）を駆動し混合液をMPSに供給した。混合液は，エタノール（95%）200 [ml]に鉄粉（協和純薬工業株式会社，純鉄 #200）20 [g]を加えたものである。ポンプは，インバーター（三菱電機，FREQROL D-700）を使いAC 200 [V]，30 [Hz]で駆動した。実験では，MPSに何も吸着していない状態（破損時）から混合液を供給した状態へ変化した際の電位差の変化を計測することで，MPSの修復の可否を確認した。測定回路や実験条件は上記の実験と同じである。図11は修復実験の結果である。破断時は導通していないので，MPSの電位差が入力電圧と同じになっている。修復が行われると導通して，電圧降下が生じている。この結果から，MPSが修復することが可能であ

ることを確認できる。

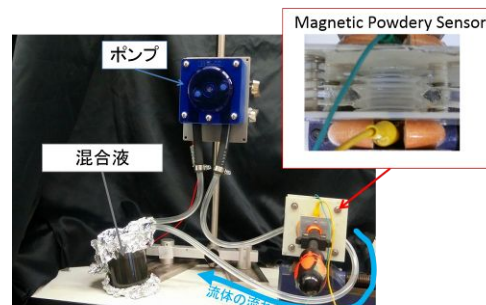


図10 MPSを修復するための装置

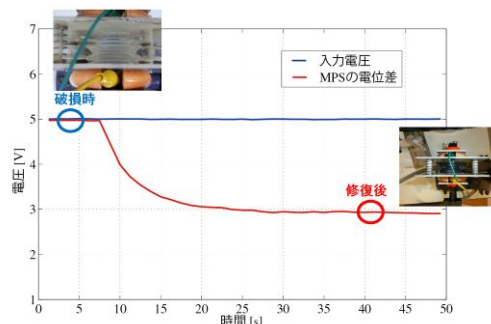


図11 入力電圧とMPSの電位差(出力電圧)の関係

4.3 修復する骨格

亀裂などの損傷を受けた材料の強度を修復する方法を提案する。図12は，提案手法の模式図である。電気めっき法と磁場による鉄粉の吸着を利用する。電気めっき法は，金属イオンを電氣的に還元し，金属を陰極表面に堆積させる方法である。しかしながら，めっきをするには長い時間を要する。また，電気めっきは電極面に一様に堆積するため堆積させる箇所を限定するのが難しい。そのため，傷を修復しようとしても傷以外の場所にも金属が堆積するため，傷を埋めた後に余分に堆積した箇所を研磨する必要がある。提案手法は，磁石に引きつけられ傷口に吸着した鉄粉上に電気めっきを施すことにより，同じ大きさの傷でも鉄粉の体積の分だけ通常のめっきよりも早く埋めることができると考えられる。また，磁場は磁石から遠ざかるほど弱くなるため，材料の厚さに合わせて適切な磁場の強さを持った磁石を選べば，傷が材料に入った際に材料内部周辺のみ鉄粉が堆積する。その結果，材料内部のみで金属が堆積する速度が上がり，傷以外の箇所へのめっきによる金属の堆積量を少なくすることができると考えられる。

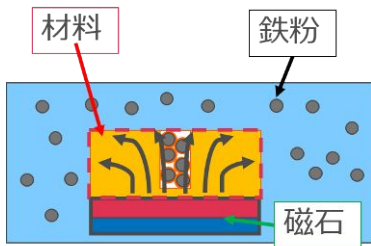


図 1 2 電気めっき法と磁石による鉄粉の堆積を利用した修復

提案手法の有効性を確認するために、修復実験を行った。黄銅板(12×60×t5 [mm])にエンドミルにより深さ4.5 [mm]、幅1.5 [mm]の傷をつけた(図13)。傷をつけたサンプルに対し、無処理、電気めっきのみ、提案手法の処理をそれぞれ行った。その後、それらのサンプルをオートグラフで引張り試験を行い、それらの靱性を比較した。

図14に、3種類の条件の違いによる靱性値を比較した結果を示す。提案手法の靱性値が他と比べると大きいことを確認した。

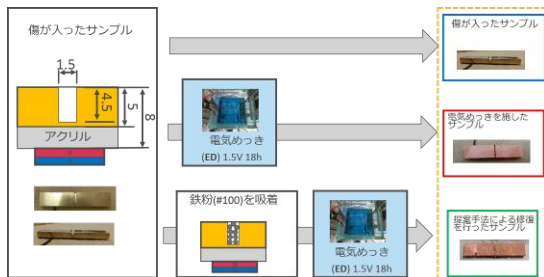


図 1 3 傷をつけたサンプルに対する処理

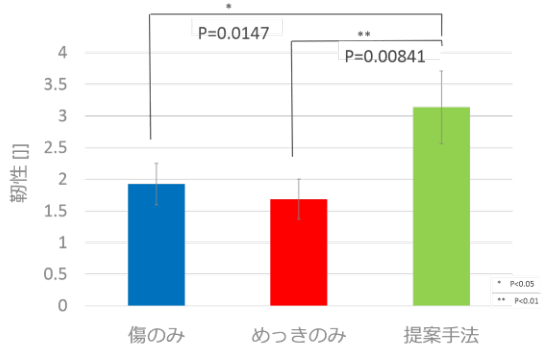


図 1 4 靱性値の比較 (左から無処理, めっきのみ, 提案手法)

4.4 不純物の除去

本研究の人工循環器系システムは、流体を循環させるシステムである。循環している流体中にシステムに障害を与える不純物が混ざっていた場合は、除去する必要がある。本研究では、吸着材をカプセル化することにより回収が容易な形にした上で、フィルターシステムで分離する手法を提案する。

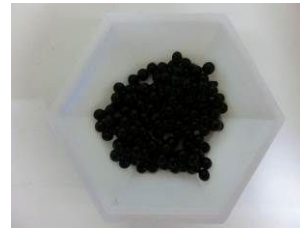


図 1 5 アルギン酸でカプセル化した活性炭

カプセル化した吸着材が流体中の不純物を吸着したとしても、それを流体中から分離できなくては意味がない。そこで、本研究では任意の大きさカプセルのみを蓄えることができるフィルターシステムを構築した(図16)。フィルターシステムの1stフィルターは、径が大きいカプセルなどを通さない。また2ndフィルターは分離対象のカプセルを通さず、それよりも小さい径のカプセルなどは通す。フィルターの径は任意であるため、1stフィルターと2ndフィルターの径を捕獲対象のカプセルに応じて適切に設定することで、捕獲対象のカプセルのみを捕獲することが可能になる。2ndフィルターは、内部で旋回流ができるように設計してあるため、捕獲対象のカプセルが多く蓄えられても、旋回流によりフィルターの目詰まりを防止する。

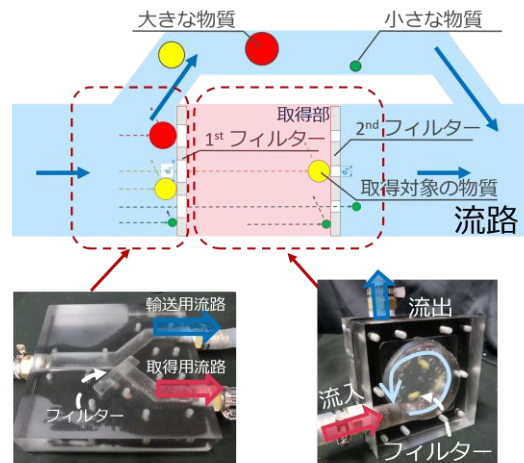


図 1 6 フィルターシステム

図17のような循環器系システムを構築した。実験では2ndフィルターのみを使用した。不純物として食紅0.16 [g]を循環器系システムに投入口から加え、流体中に一様に混ざるまで循環させた。その後、製作したカプセルを11.7[g]だけ投入口から投入した。ポンプを駆動したまま、3日間流体中の食紅の量の変化を観察した。流体中の不純物の濃度は、投入口から少量の流体をサンプリングして、紫外可視吸光度計測計(JASCO, UV-630)を使用して計測した。

図18は流体中の不純物の濃度の時間変化を表す。吸光度が大きいほど不純物が多いことを意味する。特に食紅は波長が500 [nm]付近で吸光度が大きくなるので、その波長で

の吸光度を見てみると、時間がたつにつれて吸光度が小さくなっていることが確認できる。

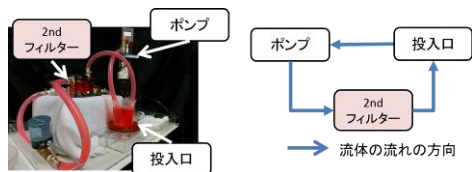


図 17 不純物吸着実験での循環器系システム

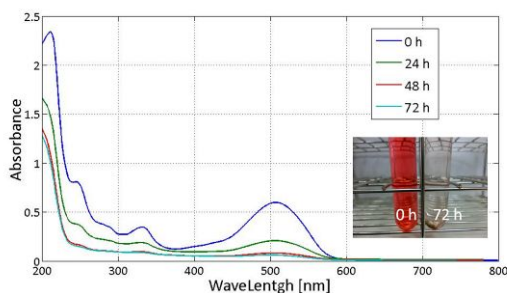


図 18 不純物の濃度の時間変化

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 1 件)

Shunsuke Nagahama, Yousuke Kimura, Chyon Hae Kim, Shigeki Sugano, The Development of Magnetic Powdery Sensor, IEEE SENSORS2014, pp.783-786, 2014 年 11 月, DOI:10.1109/ICSENS.2014.6985116, ISSN:1930-0395, 査読あり

〔学会発表〕(計 8 件)

Shunsuke Nagahama, Shotaro Iida, Hiroki Yoneyama, Shigeki Sugano, "Method to obtain only targeted substances from an artificial circulatory system," IFToMM World Congress 2015, pp.91-95, 2015 年 10 月, Taipei (Taiwan), DOI:10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS1.019, 査読あり

右田かよ, 長濱峻介, 木村洋介, 菅野重樹, "金属の電着による摩耗修復機構の提案", ROBOMECH2015, 2015 年 5 月, みやこめッセ(京都・京都市)

長濱峻介, 菅野重樹, "人工循環器系による物質供給を利用したロボットの自己修復・自己維持システムの提案", 第 24 回バイオメカニズムシンポジウム, 2015 年 7 月, 岩室温泉ゆもとや(新潟・新潟市)

長濱峻介, 木村洋介, 金天海, 菅野重樹, 物質供給により修復する Magnetic Powdery Sensor の開発, 第 35 回バイオメカニズム学術講演会, 59-62, 2014 年

11 月, 岡山大学(岡山県・岡山市) 木村洋介, 長濱峻介, 菅野重樹, 食べる動作を行うロボットが人間に与える印象についての研究, 2014 年度人工知能学会全国大会(第 28 回), 2J1-1, 2014 年 5 月, ひめぎんホール(愛媛県・松山市) 米山大樹, 長濱峻介, 飯田翔太郎, 菅野重樹, 物質を利用して自己修復, メンテナンスを行う機械システムのための物質輸送手法の提案, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 論文集(Robomec'14), 3A1-K02, 2014 年 5 月, 富山国際会議場(富山県・富山市) 木村洋介, 右田かよ, 長濱峻介, 金天海, 菅野重樹, 機械システムの摺動部における摩耗箇所の修復手法の提案, 第 15 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, 634-637(1H4-5), 2014 年 12 月, 東京ビックサイト(東京都・港区)

Shunsuke Nagahama, Shotaro Iida, Chyon Hae Kim, and Shigeki Sugano, "Signal transmission with magnetic powdery wire in a pipeline", Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2013), pp.1113-1118, 2013 年 12 月, Shenzhen (China), DOI:10.1109/ROBIO.2013.6739613, 査読あり

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 1 件)

名称: 配管の液漏れ補修システム

発明者: 菅野重樹

権利者: 学校法人早稲田大学

種類: 特許

番号: 特開 2013-194752

取得年月日: 2012 年 03 月 15 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

未来のロボット勢ぞろい グローバルロボットアカデミアシンポジウムでの紹介: http://news.mynavi.jp/articles/2014/04/17/global_robot_academia/002.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅野 重樹 (SUGANO, Shigeki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 00187634