

博士論文概要

論文題目

人工循環器系による機械システムの
自己修復・自己維持機能に関する研究

Self-repairing and self-maintenance
functions based on artificial circulatory
system

申請者

長濱	峻介
Shunsuke	NAGAHAMA

総合機械工学専攻 知能機械学研究

2016年12月

本研究では、循環系を中心とした自己保存の機能をロボットに組み込むことで、自立的に活動可能な機械システムを目指す。機械システムの自己保存の機能とは何かを考えたとき、「自己修復機能」「自己維持機能」「自立的エネルギー機能」の3つの機能が必要であると考えている。自己修復機能は、導線、センサ、構造部材などに故障が生じた際に、それらを自動的に修理し機能を復帰させる機能のことである。生物でいえば、創傷治癒にあたる。自己維持機能は、ベアリングなどの摺動部の潤滑や、モーターの温度の調節等適切に行う機能のことである。生物でいえば、ホメオスタシスの機能にあたる。自立的エネルギー機能は、エネルギーや材料の自己補充の機能にあたる。生物でいえば、有機物の摂取によるエネルギー生産および身体を構成する物質の生産することであり、代謝の機能にあたる。本研究では、これらの機能を生物が血液循環系を中心として実現していることに着目し、機械システムに循環系を組み込むことで統一的な自己保存の機能の実現を目指す。

血液循環系は細胞のためのシステムであり機械システムで使用するためには、細胞と循環系により実現される機能を機械に落とし込む必要がある。組織の修復において重要なのは、(1)修復に必要な物質(血小板やアミノ酸など)を損傷箇所に運ぶこと、(2)その物質を使って組織を任意の形状(損傷前の状態)に再構成すること、である。これを機械システムに置き換えると、(1)修復に必要な材料(金属などの構成物質)を破損箇所に運ぶこと、(2)その材料を任意の形状(破損前の状態)に再構築すること、となる。(1)に関しては、循環系を使えば材料を運ぶことは可能であるので、容易に実現できる。問題は(2)であり、従来の修復の研究では循環系に組み込める手法がほとんど無い。

そこで、本研究では機械システム内で修復を行うために、(1)『場』を利用した修復手法、(2)境界面での反応を利用した表面の保護手法の2つを提案する。『場』を利用した修復手法では、磁場などの『場』を使って運搬されてきた材料の配列を制御することで、任意の形状を再構築する。境界面での反応を利用した修復手法は、摩耗などの境界面で生じる破損を修復する手法で、境界面に物質を供給することで修復を大行う。どちらの手法も詳細は後述する。本研究ではこれらの手法をベースに電気系部品(導線やセンサ)の修復と、機械系部品(構造部材、摺動部)の修復を行った。

また、同じ経路を流れている物質が反応しないように運ぶことやシステムを不安定にし得る老廃物を除去することなど、循環系システムを備えているからこそ必要な技術がある。本研究では、カプセルを用いて物質を運搬する手法と老廃物を除去する手法を提案する。

1. 『場』を利用した修復手法（電気系部品および機械系部品の修復）

自己修復を実現するためには、(1)破壊後に元の形態・機能を回復するための指針となる要素（設計図）、(2)欠損箇所への材料供給により破壊箇所を埋めることの2点が重要であると考えた。本研究では、供給された材料を設計図に基づき再配列することで、破壊前の形態・機能の回復を実現する手法を提案する。本研究では、設計図として『場』（磁場）を用い、材料には強磁性の粉体、材料供給には人工循環器システムを用いる。『場』に材料を供給することで、材料は『場』の形状に合わせて凝集し、形（実体）を作る。本研究において、まずは『場』として磁場を用いる。材料としては磁場が作用する強磁性体の粉体を用い、材料の供給は人工循環器で行う。

まずは、導線、センサ、構造部材の修復を行った。MPW(Magnetic Powdery Wire)の研究では、断線させた導線に本手法を適用することで、導電率が回復することを確認した。MPS(Magnetic Powdery Sensor)の研究では、破壊状態（センサ部が無い状態）から粉体を供給することで、センサ部が回復することを確認した。構造部材の修復では、亀裂を入れた構造部材に本手法を適用することで、構造部材の靱性値が亀裂の入った状態の材料と比較すると大きくなることを確認した。

2. 境界面での反応を利用した表面の修復手法（機械系部品の修復）

機械システムの材料の摩耗は機械強度を低下させ、また摺動面の表面を粗くする要因となる。摩耗は、物体と物体が接触する箇所で生じ、基本的には材料のバルクではなく表面で生じる。そこで本研究では、摺動している材料の表面へ溶液系から物質供給を行い、摩耗箇所の修復を行う手法と触媒反応を利用して表面に被膜を再形成し続け表面を保護する手法を提案する。

(1)ボールジョイントのように摺動する機械部品の材料や、(2)腱駆動機構（アクチュエータ）の腱を対象に手法を構築した。(1)では、材料をメッキ溶液に浸漬し、金属皮膜を表面に形成し続ける機構を開発した。この機構では、摩耗により失われた材料をメッキ溶液から供給することで補填する。その後、摺動させることで補填した箇所を平坦化する。実験の結果、メッキにより傷を埋めることが可能なことを確認し、またメッキ後の摺動により表面が平坦化することを確認した。(2)では、腱母材（ダイニーマ）の表面に触媒を担持した腱と、その触媒と反応することで皮膜を形成する液体樹脂を使用した。液体樹脂中で触媒を担持した腱を摩耗すると、表面の皮膜がはがれる。その皮膜が剥がれた際に、腱に担持した触媒面があらわれ、皮膜を再形成する。実験の結果、通常の腱と比べると本手法の腱は耐摩耗性が向上していることを確認した。

3. システム維持に関わる技術

循環系を備えたシステムでは、そのシステムの安定的な運用のために、(1) 損傷部や潤滑などの必要な箇所に物質を安定的に輸送する技術(物質の運搬)、(2) 溶液状態の恒常性を維持する技術(老廃物除去)、(3) 循環系中の物質を分離する技術(排泄) 必要になると考えられる。

物質を安定的に運搬する技術としては、物質のカプセル化を行い循環系中で任意の場所に運搬し、フィルタを用いて分離する手法を構築した。運搬対象の物質をカプセル化することで、循環系中で反応したり混合したりしてしまふことを防ぐ。また、内包する物質ごとにカプセルのサイズを調整することで、フィルタ部でサイズの違いを利用して任意の物質を捕捉することができる。

また、循環器系を備えたロボットでは、システム運用上で生じる老廃物を除去する必要が出てくる。本研究では、吸着剤のカプセル化により循環系中の老廃物を除去する手法を提案した。粒径の大きいカプセル化した吸着剤に老廃物を吸着することで、回収を容易にした。回収のために孔径の大きいフィルタ(ミリメートルオーダー)を用い、さらにフィルタ部で旋回流を発生させることでカプセルが孔に詰まるのを防ぐ。最終的には、そのカプセルを回収することで老廃物を除去する。除去後は吸着剤入りカプセルを再び入れることで、再び老廃物の除去が可能となる。吸着剤入りカプセルと旋回流によりフィルタの目詰まりを防止するフィルタシステムを製作し、不純物(食紅)の吸着実験を行い、不純物が除去できることを確認した。

結言と将来展望

本研究では、人工循環器システムによる自己修復機能に関する研究および自己維持(システム維持)に関する研究を行った。自己修復機能の研究では、『場』(磁場)に沿って材料を配列されることによる導線、センサ、構造部材の修復の技術を開発した。また、摺動面での電解析出や触媒反応による樹脂形成を利用した摺動面の修復手法を開発した。自己維持に関する研究では、カプセル化を用いた潤滑油などの物質の運搬技術、および吸着剤を内包したカプセルと旋回流フィルタを用いた不純物の除去機構を開発した。今後は、自己修復機能、自己維持機能を有する要素技術の幅(例えば、皮膚の修復や冷却など)をより広げ、要素技術の特徴に応じて全体設計の一部を変更しながら、自己保存の機能を有する機械システムを実現する。最終的には、物質の取入れから排出までの一連の流れを、自律・自立的に行うことが可能な機械システムで実現する。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 長濱 峻介 印

(2016年12月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	○Development of a dipping wire method to improve the abrasion resistance of a plastic wire、Proceedings of IEEE ROBI02016、pp.743-748、2016年12月、Shunsuke Nagahama, Junichi Tanabe, Shigeki Sugano
論文	○Method to obtain only targeted substances from an artificial circulatory system、IFTToMM World Congress 2015、pp.91-95、2015年12月、Shunsuke Nagahama, Shotaro Iida, Hiroki Yoneyama, Shigeki Sugano
論文	○The Development of Magnetic Powdery Sensor、Proceedings of IEEE SENSORS2014、pp.783-786、2014年11月、Shunsuke Nagahama, Yousuke Kimura, Chyon Hae Kim, Shigeki Sugano
論文	○Signal transmission with magnetic powdery wire in a pipeline、Proceedings of IEEE ROBI02013、pp.1113-1118、2013年12月、Shunsuke Nagahama, Shotaro Iida, Chyon Hae Kim, Shigeki Sugano
論文	Finding and Utilizing Self-preserving Functions in Blood Pulsation -Development for Ethanol Based Artificial Circulation System-、ROBI02012、pp.1034-1039、2012年12月、Chyon Hae Kim, Yuki Nishi, Shunsuke Nagahama, Shigeki Sugano
講演	自己修復機能を有する導電性 HPNIPAAm ゲルの開発、SI2016、2016年12月発表、長濱峻介、右田かよ、菅野重樹
講演	触媒担持ワイヤを用いた腱駆動における腱の修復方法の提案、ROBOMECH2016、2016年6月、田辺潤一、長濱峻介、菅野重樹
講演	金属の電着による摩耗修復機構の提案、ROBOMECH2015、2015年5月、右田かよ、長濱峻介、木村洋介、菅野重樹
講演	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
講演	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、pp.59-62、2014年10月、長濱峻介、木村洋介、金天海、菅野重樹
講演	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、pp.634-637、2014年12月、木村洋介、右田かよ、長濱峻介、金天海、菅野重樹
講演	Magnetic Powdery Wire の自己修復性能と信号伝達特性の評価、第26回自律分散シンポジウム、pp.77-80、2014年1月、長濱峻介、飯田翔太郎、金天海、菅野重樹
講演	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、ROBOMECH2014、3A1-K02、2014年6月、米山大樹、長濱峻介、飯田翔太郎、菅野重樹

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	糖質を摂取する自己充足可能なロボットのための小型食物粉碎システムの提案、ROBOMECH2013、1A2-B03、2013年6月、木村洋介、長濱峻介、金天海、菅野重樹
講演	循環器系システムにおける拍動による自己修復促進とフィルタの目詰まり抑制、RSJ2012、1I2-8、2012年9月、長濱峻介、西佑樹、金天海、菅野重樹
講演	生体の働きを模擬した多機能一体型循環器系システムの開発、ROBOMECH2012、2012年6月、長濱峻介、西佑樹、金天海、菅野重樹

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）