

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630090

研究課題名(和文) 機電要素一体融着造形方式によるロボット用着脱可能機能組織体の構成法確立

研究課題名(英文) System Architecture for Robotic Removable Tissue based on Molding Mechatronic Components

研究代表者

稲葉 雅幸 (Inaba, Masayuki)

東京大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：50184726

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：機構要素、センサ、アクチュエータ、電装等のメカトロ要素を高密度で配置する必要のある多自由度多関節ロボットにおける機能構造組織を一体で樹脂の融着造形により行う方法の他、樹脂では排熱の問題が大きくなることから、アルミ粉末をレーザー焼結で固める造形により金属の伝熱性を利用する仕組みと、さらに多孔質構造化し、液体を送り込むことで気化させ、気化熱により排熱作用が得られる仕組みを実装し排熱効果の評価を行った。この多孔質液化冷却可能な筋駆動ユニット集合体を構成し、全身が筋骨格ヒューマノイドの肩関節での持続力を必要とする動作を行い通常空気排熱では困難であった持続動作が可能となることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The method of adhesive resin fusing enables the construction of multi-dimensional multi-joint robots with mechanical elements, sensors, actuators and electric devices integrated in a high density arrangement. This research identifies the problem of low efficiency in heat dissipation and solves it by using aluminum laser sintering to build porous structures for the transfer of heat waste through the effect of water vaporization. The effectiveness was evaluated in the shoulder joint of a whole-body musculo-skeletal humanoid where the porous bone is attached to the muscle driving units. The humanoid was able to perform motions for a longer duration, which could not be achieved in the case of air cooling.

研究分野：知能ロボット

キーワード：知能ロボット ラビットプロトタイプ 融着造形 焼結 多孔質構造 気化熱 メカトロニクス

### 1. 研究開始当初の背景

3D プリンタなどのラピッドプロトタイプ (RP) 技術はものづくりに革命を起こす可能性のあるものであるが、ロボットの実現には、RP 構造要素だけでなく、機構要素、センサ、アクチュエータ、電装等のメカトロ要素を組み合わせた機能構造組織を構成し、それらを組み合わせたロボット全体のシステムを組み付ける方式が必要となる。積層成形だけでなく素材の融着を利用すれば、メカトロ要素を接着・包含することで各要素部品を内包したロボット組織を一体で造形できる可能性がある。融着・接着・積層等による強度の違いの解消、重力を考慮した射出圧力の調整、造形経路のプランニング、画像処理による融着状態監視、目標造形形状の監視、排熱性の問題など、全くあたらしい知能ロボットの身体構成法技術としての研究が広がらう。

### 2. 研究の目的

厳しい空間制約条件下で様々な要素をパッケージングすることが求められるロボット設計において、構造要素だけでなく、機構要素、センサ、アクチュエータ、電装等のメカトロ要素を組み合わせた機能構造組織を一体で造形する機電要素一体型融着造形法の実現に対する、積層造形に何種類かの樹脂素材を異種の樹脂・部品に融着・接着における接着物質と樹脂の接着相性、センサメカトロ要素の他、柔軟素材、伝熱素材等の異種部品を一体化する造形方法を試行し、課題を整理し、新しい手法により課題を解決可能とした造形方法に対して、実ロボットに組み込んで評価することを行うことでロボット用着脱可能機能組織体を機電要素一体融着造形方式により構成する方法を確立してゆくことを目的とする。

### 3. 研究の方法

多自由度多関節ロボットでは厳しい空間制約条件下で様々な要素を組み込んで機能構成要素として構成することが求められる。全身で100を超える筋駆動系ユニットそれらを制御する数十枚の制御基板ユニット、張力を計測するセンサ、腱駆動機械要素などを必要とする等身大腱駆動ヒューマノイドでは特にその構成法は重要となることから、腱駆動ヒューマノイドにおいて評価可能なロボット用着脱可能機能組織を考え、求められる機能に対する機電要素一体融着造形方式を明らかにしてゆく。

等身大腱駆動ヒューマノイドにおいては、人の筋、腱、骨、皮膚に対応する要素が必要となるが、ここではモータを用いて回転を減速し筋と腱構造をモータが引くことで張力制御しつつ骨格の動きを作る構成となる。筋に相当するものは強力な紐とし、紐の張力セ

ンサ、モータの温度、回転位置、電流を計測するセンサ、モータ駆動回路と制御回路基板が必要となる。各モータには減速機、紐を巻き取るプーリー、回転軸、ベアリングの機構要素が必要となる。各筋ごとにこれらの機構、電装要素が必要となり、これらを一つの同じ組織ユニットとしてモジュール化することで着脱可能が用意となり、故障時に交換可能となる。骨は、椎骨、肋骨、鎖骨、胸骨、肩甲骨など自由曲面の複雑な形状をもつものが紐で牽引される。また、皮膚に相当する要素として、筋となる紐が外界と接する部分を覆う外装要素、骨や関節を包む外装、椎間板、軟骨組織体などが必要となる。筋駆動ユニット、外装、関節骨構造など機能を構成するうえで重要となる組織体の構成法を考え、異種部品を一体化して構成するだけでなく、一つの機能要素が異なる機能も分担する造形方式の長所短所を比較検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) 関節骨構成法

椎骨、椎間板構造は、機構的な弾性特性が必要となる。造形法としては三次元粉体焼結造形法が利用可能である。必要弾性・強度・耐久性が低くてよい場合には樹脂粉体での造形が可能であるが、より高い弾性・強度・耐久性を満たすためには通常の切削金属とバネ材の融着による造形法が有効である。

図1にバネ材の溶接による椎間板造形を行い、衝撃運動に耐えられる強度と、要求弾性特性を得られている状況を示す。この椎間板として異なる弾性特性をもつものを3種類構成し、頸部を構成している様子を図2に示す。



図1 バネ材の溶接による椎間板の造形

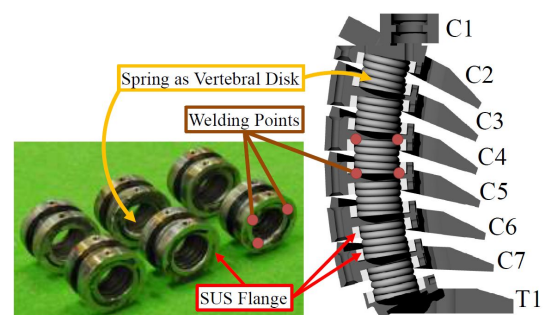


図2 頸部脊椎・椎間板の組織体構成

## (2) 筋ユニット

筋骨格ヒューマノイドにおいて100本以上の筋を駆動する筋駆動組織は着脱可能化させるためにモジュラー化できる構成法として通常メカトロ要素に筋ユニット全体を包む外装を構造化させ、筋を引き出す方向を自由に変更可能な機能要素を構成する。図3に筋ユニットモジュールを示し、図4にその内部構成を示す。



図3 筋ユニットモジュール

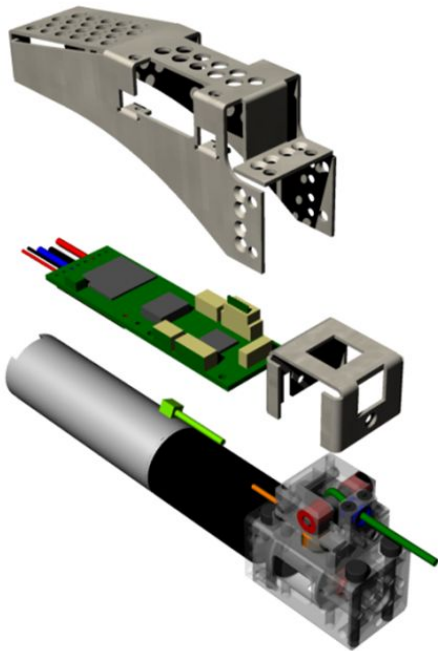


図4 筋ユニットの内部構造

## (3) 非球関節骨構造

人体の関節は骨が骨を覆う構造ではなく、骨と骨との間が離れ、それを腱と関節包が包む形で関節を構成する。例えば、肩関節を構成する上腕骨は肩関節の広い可動範囲と大きな関節トルクを生成するには、上腕骨への筋の取り付け部である腱の位置が重要となる。腱と骨部との接続部の面積、接続方法だけでなく、筋力が関節の回転を連続的に駆動可能となることが重要となり、骨の形状がその機能を担う。図5左は上腕骨の球に棒状の骨を

接続した構造で、右は筋が骨に巻き付く形で連続的な回転トルクを生成可能な骨の形状とした上腕骨となる。楕円領域に筋が巻き付く形となり、筋駆動関節と骨格の一体化が有効となる形状となっている。

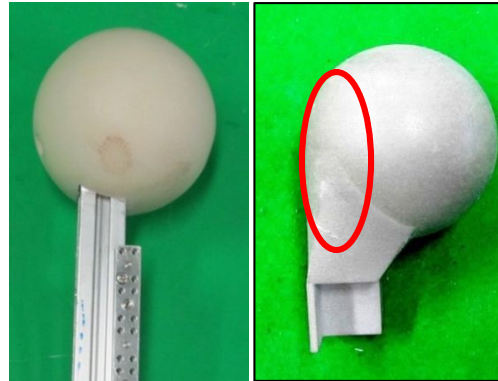


図5 筋巻き付き部を考慮した上腕骨

## (4) 伝熱排熱機能を統合した骨構造

電動モータで駆動されるロボットではモータが発する熱を排熱する構造は重要となる。駆動速度と持続力の両方を必要とする腱駆動ロボットにおいて、筋ユニットのモータからの伝熱と排熱機能として骨を利用することを考えれば、樹脂ではなく伝導率の高い金属を使い、さらに排熱のために水冷循環方式も考えられる。ここでは、骨の構成を金属粉末の焼結により多孔質化させ、水を循環させるだけでなく、気化させることにより気化熱による冷却効果を得る多孔質骨を構成した。図6は、アルミ粉末を焼結して造形した多孔質骨の例である。筋ユニットの円筒形モータ部を配置し、表面の多孔質部から液体の気化によりモータが冷却され、骨内部は気化した液体を補充する液循環部が形成されている。



図6 筋ユニットを配置する多孔質骨

## (5) 評価実験

各組織体構成法の評価として図7に示す等身大筋骨格ヒューマノイドにおける運動評価を行った。頸部の可動範囲と強度、肩関節

の可動範囲と強度，腕立て伏せ動作による持続力の評価などを行い，樹脂では強度不足となっていたものを金属を用いての融着や焼結により，自由な形状の造形を行い，衝撃力に耐えられる強度と，液体気化排熱機能により持続力を求められる運動が可能となることの確認を行った。

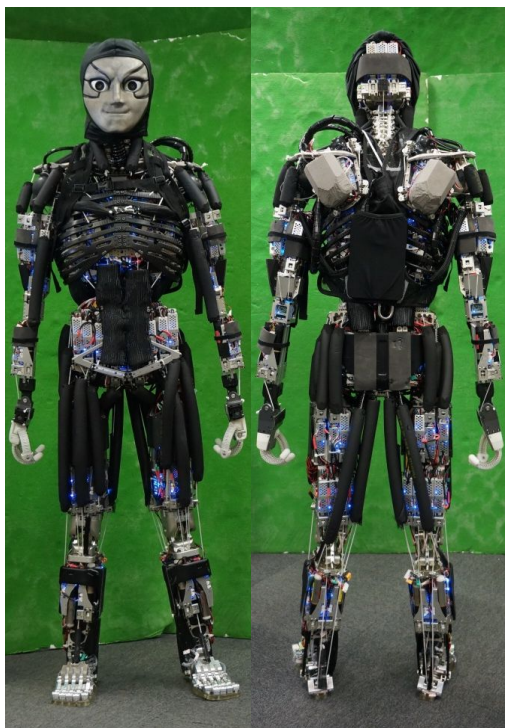


図7 等身大筋骨格ヒューマノイド

#### 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2件)

茂木 陽太郎, 川崎 宏治, 上月 豊隆, 白井 拓磨, 浅野 悠紀, 中西 雄飛, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, 筋骨格ヒューマノイドにおける頸部筋群負荷を支持可能な剛性可変脊椎構造の開発, 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.7, pp.615-623, 2014.

浅野 悠紀, 溝口 弘悟, 上月 豊隆, 茂木 陽太郎, 白井 拓磨, 浦田 順一, 中西 雄飛, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, 終末強制回旋機構を備えた人体模倣膝機構の実装と筋骨格ヒューマノイドによる環境接触下における動作実現, 日本ロボット学会誌 Vol.32, No.10, pp.887-894, 2014.

[学会発表](計6件)

上月豊隆, 廣瀬俊典, 中島慎介, 浅野悠紀, 大久保壮一, 垣内洋平, 岡田慧, 稲葉雅幸, 機電要素一体設計に基づく気化熱冷却可能な機能組織体設計法, 第16回

SICE システムインテグレーション部門講演会講演概要, 2015.12. 14-16, 名古屋(愛知県)

Toyotaka Kozuki, Yotaro Motegi, Koji Kawasaki, Yuki Asano, Takuma Shirai, Soichi Ookubo, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba, Development of Musculoskeletal Spine Structure that Fulfills Great Force Requirement in Upper Body Kinematics, The 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2768--2773, 2015.

Yuki Asano, Toyotaka Kozuki, Soichi Ookubo, Koji Kawasaki, Takuma Shirai, Kohei Kimura, Kei Okada, Masayuki Inaba, A Sensor-driver Integrated Muscle Module with High-tension Measurability and Flexibility for Tendon-driven Robots, Proceedings of The 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.5960-5965, 2015.

Masayuki Inaba, Development of Musculoskeletal Humanoid, Myrobotics Workshop on "Future of Robotics Based on Biological Principles" (招待講演), Cambridge, UK, 2014.12.11-2014.12.12  
Toyotaka Kozuki, Takuma Shirai, Yuki Asano, Yotaro Motegi, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba, Muscle-tendon complex control by "Tension controlled Muscle" and "Non-linear Spring Ligament" for real world musculoskeletal body simulator Kenshiro in The 2014 IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics pp.875-880, 2014.

[その他]

<http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

稲葉 雅幸 (INABA, Masayuki)

東京大学大学院情報理工学系研究科・教授  
研究者番号：50184726

(2)研究協力者

上月 豊隆(KOZUKI, Toyotaka)