能動自己融解締結構造体の開発と修復構造への応用

中島 慎介^{*1}, 白井 拓磨^{*1}, 浅野 悠紀^{*2}, 垣内 洋平^{*1}, 岡田 慧^{*1}, 稲葉 雅幸^{*1}

Development of active self-melting bolt and its application to self-healing structure

Shinsuke NAKASHIMA^{*1}, Takuma SHIRAI^{*1}, Yuki ASANO^{*2}, Yohei KAKIUCHI^{*1},
Kei OKADA^{*1} and Masayuki INABA^{*1}^{*1,*2} Department of Mechano-Informatics, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Received: 7 March 2018; Revised: 25 May 2018; Accepted: 29 July 2018

Abstract

This paper illustrates the development of active self-melting bolt aiming at self-healing tendon-driven robot with high-load endurance. Recent pioneering research has explored several methods for applying self-healing principles for robotics. For example, exploiting reversible crosslinking bonds are a major approach. They enable conventional robots to gain self-repairing capability from micro damages such as stubs and so on. However, providing a healing module with large load endurance and autonomous healing capability is yet a challenging task. Then, we categorized design challenges to construct such a module. In addition, we introduced some alternatives to overcome the problems. First, we formulated fracture and healing energy ratio to select proper material for active healing structure. The measure leads the authors to the statement that a low melting point alloy is a powerful alternative. Next, the authors insist that bolted joint structure is a candidate for self-healing module with high-load endurance. Finally, we validated the feasibility of the module with tensile tests using motor-driven tendon unit that has been developed by our group. The result showed that proposed structure had healing capability in spite of its low healing ratio. In summary, the paper presents design, manufacturing method and validation for active self-melting bolt.

Keywords : Tendon-driven robot, Self-healing, Bolt, Low melting point alloy, Casting

1. 緒 言

生物は自己修復能力に基づく高い動作継続能力を有しており,このような仕組みをロボットにおいて適用,再現することはロボットの運動能力の拡大に大きく貢献する.例えば外部オペレータが介入できない環境における行動の継続や,致命的な破損を原理的に防ぎつつ自身の能力の限界を有効に活用することが可能となると考えられる.このような着想のもと,自己修復能力をロボットに付与することを目的とする研究が活発化しつつある(Terryn et al., 2017).自己修復可能な機械システムを実現するにあたり,材質レベルで修復能を付与するアプローチが主に試みられてきた.しかしながら,ロボットへの修復能力の付与は,主に比較的軽微な損傷への対応に限られている.背景として,修復構造は従来の構造材と異なり,単に負荷を支持するだけでなく,破断後に原子間,分子間結合を再構

No.18-00123 [DOI:10.1299/transjsme.18-00123], J-STAGE Advance Publication date : 6 August, 2018

本論文は, 第23回ロボティクスシンポジウム講演論文集(2018), No.2A5の掲載内容に基づいた論文である.

^{*1} 東京大学 情報理工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)^{*2} 正員, 東京大学 情報理工学系研究科

E-mail of corresponding author: snakashima@jsk.imi.i.u-tokyo.ac.jp

築するプロセスがロボット体内の環境で自律的に達成されなければならないことを挙げる。この制約を達成すべく、ロボットへの自己修復構造の適用は、主に適切な材料の選定ないし開発と並行して探求が進められている。

まず、空気圧ゴム人工筋に発泡剤を封入することで穴を塞ぎ、小規模なリークに対処する構造が提案されている (Davis et al., 2012)。また、低融点金属 (Low melting point alloy 以下 LMPA) とエラストマーの複合により構成された可変剛性繊維構造体が開発されており (Tonazzini et al., 2016)、エラストマー外殻により漏出を防ぎつつ、加熱に伴う金属の相転移を活用し破断箇所を再結合させる。そして、ある種の熱可塑性樹脂における可逆反応を利用し、一体成型による柔軟性と修復能力を備えた自己修復メカニカルヒューズや柔軟アクチュエータが開発されている (Terry et al., 2015)。また、生体を模した循環系統を再現することにより修復可能なセンサや配管、ワイヤなどのシステムを構築するという独特なアプローチからの研究が進められている (Nagahama et al., 2014)(Nagahama et al., 2016)。

加えて、従来の機械システムにアクチュエータ及び推論機構を実装することで故障診断、復旧機能を備えた制御型自己修復機械が提案されている (梅田他, 1994)。しかしながら、修復システムが最もその効力を発揮しうる高負荷伝達、破断からの復帰の実現や、修復システムの要素を自ら保有するロボットの実現は、未だ困難な課題であり続けている。

ここで、ロボットに限らず、機械一般において破断の起こりやすい箇所の 1 つとして、締結部に着目する。この性質を活用し、特に周期的な撃力に晒される脚移動ロボットの骨格部に優先的に破断されるピン接合部を搭載することで、電装系や機械系への致命的なダメージを防ぐ試みがなされている (Hubicki et al., 2016)。優先的に破断されるのみならず、自ら修復可能な締結部の開発により、あらゆるロボットに修復能力を付与することが可能であると考えられる。そこで本研究では、このような特徴を備えた締結構造体の開発に取り組む。加えて、提案する締結構造の応用として、腱駆動機構への挿入例を示した。根拠として、

- 負荷の受け方として単純であり、評価が容易
- 駆動系の並列冗長化と併用しやすく、一部が破断してもなお動作を継続可能

を挙げる。研究コンセプトを図 1 に示す。冗長腱駆動ロボットにおいて提案締結構造を搭載することで、落下や転倒など予期せぬ撃力に伴う骨格や張力伝達部の破損に遭遇してもなお、該当部の自己修復により復帰、動作を継続するロボットを実現しうる。

Fig. 1 Research concept of active self-melting bolt: (upper) A tendon-driven legged robot encounters fracture of some of the bolted joints (red parts) because of an unexpected landing impact. After waiting a while, the robot gets ready to jump again. (lower) It is because that the broken active self-melting bolt made its rigid uniform structure again by melting and coagulation while waiting.

本稿では、自己修復機能を備えた締結構造体が満たすべき要求を整理し、それらを満たすモジュール構成法を提案する。修復フローと共に実装にあたる問題点を材質及び形状の観点から議論し、材質選定及びねじ構造の利点について説明する。続いて、等身大脚移動ロボットへの適用に向けたモジュールの設計指針及びその製法を述べる。提案モジュールの有効性を、単一筋腱モジュールでの引張試験にて検証する。

以下、2章では本稿で提案するモジュールの概要について述べる。3章にて設計法を想定動作と共に記す。4章にて提案モジュールの製法を説明する。5章では、単一筋腱モジュールを用いた引張試験について示す。最後に6章にて、本論文を締めくくる。

2. 能動自己融解締結構造体

本章では、能動自己融解締結構造体モジュールの動作様式と満たすべき条件を整理する。提案モジュールはモータ駆動腱に直列に接続されており、モータ駆動腱より先に破断することで減速機やワイヤ部分を保護する。すなわち、モータ駆動腱自体が破断することは無いものとする。

2.1 修復フローとモジュール要件

負荷伝達状態を図2に示す。ここで、(a)はモジュール断面図であり、橙の部材が締結構造体を表す。(b)は張力伝達を担う部分の模式図である。締結構造部と復元力発生部（永久磁石及びゴムチューブ）により構成される。(c)のグラフは各々の伝達状態における変位 Δx と伝達張力 T の関係を示す。

Fig. 2 Explanation of load transmission types: (a) Illustration of active self-melting bolt (orange part) on each state (b) Schematic of the components that transmit tension on each state (c) displacement and tension curve as whole module

- I. Stiff transmission state では、(a) に示すように締結構造体はその形状を保ち、モータ駆動腱の張力 T を伝達する。この時、(b) のようにゴムチューブの変位は生じず、また永久磁石の吸着力は締結構造体の伝達張力より十分小さいとして無視する。変位と伝達張力の関係は (c) の通りであり、 $T < T_{MAX}$ である限り本状態が維持される。
- II. Soft transmission state では、(a) に示すように締結構造体は破断し、(b) に示すように、代わってゴムチューブと永久磁石が張力を伝達する。(c) に示す通り、永久磁石の吸引力は変位に応じて減少し、ゴムチューブの復元力

は変位の増加に伴って向上する。破断した締結構造の修復を開始する為には、後述するようにモータ駆動腱を緩め変位値 $\Delta x = 0$ にさせる、すなわち破断部同士及び永久磁石同士を密着させる必要がある。

III. Healing state では、(a) に示すように締結構造体を修復させる。この時、(b) の通り張力の伝達は永久磁石のみが受け持ち、その間に (c) のように締結構造が伝達張力を回復させることになる。したがって、原則としてモータ駆動腱は弛緩したままである必要がある。実ロボットへの導入に当たっては、例えば駆動系ごと並列にしておき、あるモジュールの Healing state においては別の駆動系がその分を補うなどの対策が考えられる。

IV. 締結構造部が伝達張力を回復し、I の Stiff transmission state に戻る。

以上の流れに従って動作実現を図る為の条件について考える。I を実現する為には、締結部の剛性値はモータ駆動腱と同等以上であり、かつ T_{MAX} [N] が十分に大きい必要がある。II において、復元力発生部分は破損してはならない。そこで、当該部分の伸展のみでロボットの可動範囲をカバーできることが必要となる。加えて、変位値を 0mm に戻すだけの復元力を発生させることが必要であるが、ばねによる力のみでは、小変位における復元力が不十分であると考えられる。そこで本研究では、接触及び密閉を確実なものとする為に、磁石を搭載している。III において、破断部を再結合させる反応を励起することが必要である。この際の条件として、比較的短時間かつ再現性良く反応が完了すること、更にシステムが小規模である点が重要であると考えた。そこで本稿では、図 3 に示す熱的刺激による熱分解、再凝固に基づく反応を活用することとした。具体的には、(IIIa) 破断面同士の間隔が十分小さい時に、(IIIb) 加熱により破断面付近の部材を融解させ、(IIIc) 十分な加熱により一体となったところで加熱を終了し、(IIId) 再度凝固させることで締結構造が再構築されるという手順となる。このように、修復過程において液体状態が含まれ、空隙の存在は部材の漏出を引き起こす。したがって、締結構造体は常に磁石によって密閉されている必要があり、これを上回る自重や張力が加えられてはならない。

Fig. 3 Phase transition of active self-melting bolt in healing state: (IIIa) After the bolt structure is cracked, (IIIb) embedded micro heater increases its temperature to make both parts liquidified. (IIIc) After fusion, liquid metal becomes uniform. (IIId) Lastly, the uniform structure coagulates to become its original shape in solid state.

以上に加えて、等身大の腱駆動ロボットに搭載、動作を完了する為の前提として、以下の条件を加える。

- 小型軽量であること
- 一連のシーケンスがロボット体内で完結すること

以上の条件を満たす修復モジュールの開発を目指す。

2.2 材質選定

一般に機械的強度に優れた構造材は、別の手段で分解する際にも大きなエネルギーを必要とする。本研究で意図する締結構造の要求に応える“壊れにくく、治しやすい”材質を選定すべく、破壊しやすさと修復しやすさのエネルギー比率を定量化する。以下、棒材を引張荷重で破壊し、熱融解、凝固に伴う再結合によって修復する状況を考える。機械的に破断させる為のエネルギーの指標として、図 4 に示す応力ひずみ線図の斜線部領域に相当する一般化靱性値を、式 1 のように定義する。本来、機械的強度の指標である狭義の靱性値は式 2 の示す応力ひずみ線図の積分によって定義されるものであるが、本稿では計算の簡単な為、一般化靱性値の比較で十分であると判断した。

$$U_{GT} = \frac{\sigma_{MAX} \times \varepsilon_{MAX}}{\rho} \quad (1)$$

$$U_T = \frac{1}{\rho} \int_0^{\varepsilon_{MAX}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2)$$

ここで, U_{GT} [J/g] は一般化靱性値, U_T [J/g] は狭義の靱性値, ρ は密度, σ_{MAX} は最大応力, そして ε_{MAX} は破断伸びを表す. 一方で, 一定量の物体を室温から融点まで加熱し, 熱融解させる為のエネルギーは式 3 の通りであり, 本稿ではこれを加熱融解エネルギーと定義する.

$$U_{HM} = \frac{C_V \Delta t + H_f}{\rho} \quad (3)$$

ここで, U_{HM} [J/g] は加熱融解エネルギー, C_V は体積比熱容量, Δt は室温から融点までの温度差, H_f は相転移エンタルピーを表す. そして一般化靱性値と加熱融解エネルギーの比率 η [%] を破断再生エネルギー比率と定義する.

複数の構造用金属及び低融点はんだなどの低融点金属を対象に, 一般化靱性と加熱融解エネルギーを図 5 に示す. そして, これらに破断再生エネルギー比率を含めた値を末尾の表 2 に記した. 値の出典として MatWeb™ 及びメーカ参考値などを活用した. また, 繊維強化プラスチックは比強度や伸びでは極めて優れているが, 熱分解/凝固によって繊維構造など結晶性の高い部分を復元することが困難であると考えられた為, 除外した.

Fig. 4 Stress-strain curve of a typical metal. Generalized toughness is defined as hatched area.

Fig. 5 Relationship between generalized toughness and heating melting energy: dashed lines correspond to each metal's inverted value of mean fracture and healing energy ratio.

これらが示すように, 低融点金属は概して他の材質に比べ機械強度に大幅に劣る一方で, 修復に必要な加熱融解エネルギーは極めて小さく, 破断再生エネルギー比率に優れることから, 修復構造への導入に有利であると考えられる. 採用された低融点金属 U-アロイ 47 の特性は表 1 に示す通りである. ロボット構造への導入にあたり, 融点 $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ という値は小さいが, 融点の大きな金属の活用や, 将来的には構造外部への冷媒循環などによる影響緩和が有効であると考えられる.

Table 1 Specification of "U-47"

Melting point	$46.7\text{ }^{\circ}\text{C}$
Density	8.8 kg/m^3
Specific heat capacity	$0.147\text{ J/(g}\cdot\text{K)}$
Heat of fusion	13.986 J/g
Tensile strength	65 MPa
Elongation at break	12.4%

2.3 構造

提案締結構造体及びその周辺部の構成図を図6に示す。上部が能動自己融解締結構造体の本体、そして下部が復元力発生要素も含めた張力伝達モジュールである。本体に関して、低融点金属で成形されたボルト構造に小型ヒータを内蔵した構成となっている。なお、ヒータの配置個数によって1ヒータ構成と2ヒータ構成が存在する。張力伝達モジュールは、本体に復元力発生要素やモータ駆動腱との接続部、コイルチューブを加えた構成である。

Fig. 6 Components of (upper) an active self-melting bolt and (lower) a tendon module using the bolt

自己融解締結構造として、ボルト構造を用いることの利点を以下に示す。

1. 磁力などに比べ大負荷を機械的に支持/伝達可能
2. 大負荷伝達における密閉性と大変位伸展を両立
3. 接合強化の為に熱処理などが不要
4. 手前で応力集中させることが可能

2の性質は、液体金属の大きな比重と流動性に伴い重要となる点である。先行研究 (Tonazzini et al., 2016) では液体金属をエラストマーに封入することで密閉性及びある程度の伸展を許容する構造を提案していた。しかしながら、高負荷伝達の為に棒材部の体積が大きくなると、液体状態では自重によりエラストマーごと沈み込み、元の形状に復元できない。そこで、ボルト形状にし剛体で密閉させ、その外部に伸展可能なゴム被覆を設けることで、高負荷伝達における密閉性と伸展変位のトレードオフを解決する。3の性質は、熱処理の為に加熱により低融点合金構造自体が失われることを防ぐ為に重要である。そして、4により、破断箇所を予め絞っておくことで、所望の加熱溶融箇所に集中して熱を加えることが可能となる。これは、一様加熱よりも迅速な修復を実現する上で重要と考えた。加熱要素を実際に導入するにあたり、ボルト構造の内部にセラミックヒータを鋳造により一体成型する。ここで、ヒータ搭載箇所とねじ頭部分を正確に位置合わせしなければ、加工途中及びボルト破断時にヒータ及び配線ごと破壊してしまうという課題が存在した。この問題を解決する製造方針に関しては後述する。

以下、張力伝達モジュールを構成する周辺部品に関して説明する。

- モータ駆動腱と締結構造体を仲介する継手構造

締結構造とモータ駆動腱は、図6に示すようなステンレス製の継手を介して接続される。ステンレス合金は低融点合金に比べ引張強度に優れることから、継手のめねじ部が破断することは無い。継手は、締結部との接合部のみならず、後述するゴム被覆やコイルチューブ、磁石との接合部としても機能する。

● 高伸展構造の為の天然ゴムチューブ

締結部が破断した後に、可動域をカバーする伸展要素が必要となる。本研究では、種々のゴム材から天然ゴムラテックスが最適であると判断した。引張強度、破断伸びのみならず引き裂き強度に優れる材質であり、極めて薄い構造ながら 300% 以上の伸展を許容する。柔軟密閉構造を取ることが可能であり、冷媒など液体を封入することで、ダンピングや強制冷却の機能を将来的に付与することを狙う。ゴム被覆の厚みは、自重を持ち上げ、且つ自然長に戻る為に十分な剛性を持ちうることに、受動伸展の際に負荷とならないことを目標に決定した。

3. 設 計

本章では、2 章で述べた構成に基づき、腱駆動脚ロボットへの適用を見据えた締結部の設計について説明する。

3.1 要求仕様

腱駆動脚ロボットでの動作から、必要諸元を見積もる。具体的には、破断張力と破断後の許容伸びを概算する。無質量脚を有する単軸ロボットを想定する。質量 $m = 10$ kg, 大腿, 下腿リンク長 $l = 0.25$ m, そして可動域は $\theta [^\circ] \in [30, 150]$ であり、関節モーメントアーム $d = 50$ mm と定義する。

矩形波の加速度入力による跳躍運動を考えたとき、床反力値 $F_z = 200$ N と関節モーメントアームから、安全率 2.0 を見込み筋アクチュエータ張力値 $T = 2000$ N が算出される。従って、この値を張力リミット値と設定する。

続いて、破断後の伸びについて考える。特に弾性エネルギーの解放を目標とした時、単体による伸びだけで可動域をカバーできることが望ましい。したがって、可動域とモーメントアームから、 $\Delta l \simeq 100$ mm を目標に設定した。

3.2 ボルト仕様

モータ駆動腱と同程度の破断強度を満足する為の締結部の呼径と奥行きを見積もった。

一般に、ねじ構造の破断条件として、ねじ頭の破断 (式 4), ねじ山の剪断破壊 (式 5)(図 7) が存在する。

$$F > \frac{\pi d_1^2}{4} \sigma_{MAX} \quad (4)$$

$$F > \pi d_1 L \sigma_{MAX} = \pi d_1 P N \sigma_{MAX} \quad (5)$$

ここで、 d_1 , σ_{MAX} , L , P , N は各々おねじ呼び径, 引張/剪断強度, 奥行, ピッチ, 山数である。

まず呼径の決定に際し、式 4 及び表 1 から、安全率 2.0 程度を見込み M10 に設定した。

一方、奥行きの寸法に関しては、ねじ山の破断を防ぐことが条件となる。式 4 及び式 5 から、理想的には $L > \frac{d_1}{4}$ であればねじ頭の破断が優先する。本研究では、使用した継手部の寸法に合わせ M10 に対し奥行き 50 mm を確保し、この条件を十分に満足した。実際に、ねじ山破断が引き起こされることは無かった。今後、例えば軽量化などを意図するにあたり軸方向を小さくする余地が存在する。

提案構造体の寸法を図 8 に示す。商用のツースクラッチより長さ方向よりの寸法となっている他、軽量であることが分かる。ワイヤ経路上に挿入が可能であり、特に並列駆動系への導入を考慮した時、配置上での利点となりうる。

Fig. 7 Strength of threads: shear force caused by excessive axial force breaks each thread.

Fig. 8 Comparison of the dimensions of a commercial tooth clutch, motor unit, and active self-melting bolt module

4. 製 法

本章では、提案締結構造体の製法について説明する。提案モジュールの作製にあたっては、低融点金属の機械要素とヒータや導線といった電気要素の位置決めを含めた一体成型を要求するものであり、試作を含めて多数のサイクルを回すべく製法自体の工夫が必要となった。

4-1 2段階鋳造による作製

提案締結構造体の作製においては、図9に示す2段階鋳造を用いる。セラミックヒータの正確な位置合わせの為に、(I) ヒータ周囲の配線を固めた構造を先に成型し、(II) これ自体を治具として棒材の注型に活用する。それぞれの工程において、(a) ヒータ本体ないしヒータ治具を型にセットし、(b) 万力を用いて型締め、液体金属を充填し、(c) 一定時間待機、冷却し所望の形状の部材を得る。型の材質は、ABSの熱溶融成型を活用し作製された樹脂型となっている。樹脂型の比熱の低さと表面張力の大きさが要因となり、このような設定で目的とする形状を得ることが可能である。結果として、以下の部品から構成される部材が得られる。

- 低融点金属棒材
- セラミックヒータ

Fig. 9 Manufacturing process of the module is composed of two steps. (I) A heater and its wiring becomes a rigid unit via casting. (II) The rigid part itself works as a jig for casting a bolt structure(Nakashima et al., 2017).

ヒータ治具注型及び棒材注型のそれぞれに用いた型の設計について説明する。はじめに共通事項として、ゲート配置について述べる。鋳造におけるゲート方式としてトップゲートとアンダーゲートなどが存在する。本研究ではヒータ治具型及び棒材型共に気泡の混入などを防ぐ目的からアンダーゲート方式を採用し、所望部材の底部から液

体金属が充填されるように流路を設けている。図 10 に示すヒータ治具型について、Locking area はヒータ本体及び周辺の配線を固定する。Guide area は後にダイスを通すガイドとなる部分であるが、棒材注型の時点でもヒータ治具を型の所望の位置に位置決めする為に必要である。Runner 部は液体金属充填に伴い残った流路の部分で、切り離し、再度溶融した後に原料金属としてリサイクルされる。

図 11 に示す棒材型について説明する。本棒材型は、棒材のダイスによるねじ切りを念頭においた構成となっている。ヒータ治具型と同様に Runner 部を除去し、Dice guide area を通してダイスを棒材に合わせ、Sacrificial area をクランプすることでねじ切り加工が可能となる。Machined area に対して加工を施し、Dice guide area と Sacrificial area を溶融、除去する。加えてシーリングテープを巻くことで締結構造を得る。なお、ヒータ配置にあたっては、図 6 に示したように、片方にのみ搭載する場合と両側に搭載する場合が存在する。図 11 は前者を想定した型であり、両側に搭載する場合は、底面部分も開放された型を用いて棒材を成型する。

4.2 天然ゴムラテックスの浸漬法による弾性膜構造の成型

天然ゴム被覆の成型について説明する。膜厚などに自由度を持たせるべく、天然ゴムラテックスのディップ成型によりゴム被覆を作製した。 $\phi 22$ のステンレス棒材を天然ゴムラテックスに浸し、60℃ のオープン内で乾燥させる操作を 3 回繰り返した。膜厚は 0.5 mm 程度を目安とした。

Fig. 10 Heater casting: a cast part has three major areas; Locking area, guide area and a runner.

Fig. 11 Stick casting: a cast part four main areas; Dice guide area, machined area, sacrificial area and runners.

5. 検 証 実 験

本章では，提案モジュールの有効性を実証する為の実験方法及びその結果について述べる．

5.1 実験システム

本研究グループにおいて開発された筋アクチュエータモジュール (Asano et al., 2015) を活用した引張試験により，提案モジュールの修復機能を検証した．使用した実験システムを図 12 に示す．筋アクチュエータモジュールの減速比を 333 : 1 に設定し，さらにワイヤを一度折り返すことで， $T = 2000 \text{ N}$ の張力を加えることを可能としている．また，データフローを図 13 に示す．制御用 PC からモータコントローラ基板を通しモータ変位指令がモータドライバ基板へ送信される．ワイヤ張力値 $T \text{ [N]}$ は，モータモジュールのセンサ定格値 (500 N) を上回ることから，外部高負荷フォースゲージにより計測させ，ワイヤ巻取り量 $\Delta x \text{ [mm]}$ をモータ回転量から取得する．これらの値はロボット用ミドルウェアを通し送受信される．なお，提案モジュールの片側ヒータ搭載と両側ヒータ搭載のそれぞれについて，一度ずつ実験を行った．

Fig. 12 Overview of experiment apparatus(Nakashima et al., 2017)

Fig. 13 System configuration of tensile test setup(Nakashima et al., 2017)

5.2 実験手順

以下の実験手順により、提案モジュールの性能評価を行った。

1. モータ駆動腱に巻取り指令を与え、締結構造体を破断させた。
2. さらに巻取り指令を与えることで柔軟被覆構造を伸展させた。
3. モータ駆動腱を送り出す指令を与え、破断モジュールの継手部分を結合させた。
4. 内蔵セラミックヒータに 1 つあたり最大 24 V 1.0 A を 30 s の間印加した。
5. 室温ないし低温環境にて 3 min 待機した。
6. 再度引っ張りによる負荷を与えた。

5.3 実験結果

引張試験における締結構造破断後の伸展の様子を図 14 に示す。(1) 伸展開始から (8) 伸展終了時点までに天然ゴムチューブ及びコイリングチューブが 100mm 程度伸展できていることが分かる。ゴムチューブの様な復元力及び対向永久磁石の吸引力により、視認する限りでねじれなどが見られなかったことを付記する。

片側ヒータ及び両側ヒータの場合のそれぞれについて得られた変位、張力関係のグラフに関して以下で説明する。

はじめに、片側ヒータ搭載の場合 (図 15) に関して、初回 (緑線) では 1900 N 程度でテストピースは破断した。締結構造の破断後 (灰線) は、柔軟外殻が 900 mm の伸びを許容することを確認した。また、室温待機による修復後 (赤線) では 200 N 程度で締結構造は破断した。そして、低温環境待機による修復後 (青線) では 140 N 程度で締結構造は破断した。ここで、特に大張力領域においてはモータ駆動腱における高分子ワイヤ自体の伸びが顕著であり、初回及び修復後のワイヤ変位は締結構造体そのものの伸びと一致しないことに注意が必要である。以上より、初回では破断強度と伸びは共に目標の 90 % を達成した。しかしながら、加熱溶融後の強度は元の強度の 10 % 程度に留まっていた。低温環境における待機に関しては、破断強度は室温環境待機時の 1.5 倍程度に大きくなり、冷却の促進が推察される。

一方、両側にヒータが搭載された場合について (図 16), 初回 (緑線) の破断強度は 1900N 程度であったほか、破断後 (灰線) の伸展は 1000 mm 程度であり、各々目標値の 90 %, 100 % を達成した。また、室温待機による修復後 (赤線) では伝達張力は 250 N 程度であった。低温環境待機による修復後 (青線) では 250 N 程度で締結構造は破断した。当初の強度不足の想定として、片側のみの加熱による機械接合を予想していたが、予想に反する結果となった。低温環境での待機において、伝達張力は室温待機時と同程度の値となっており、入力熱の大きさに対して冷却が不足していたことが考えられる。

したがって、提案締結構造体は、片側加熱と両側加熱のいずれにおいても修復効果を得られたものの、修復率は 10 % 程度であることが示された。加熱における温度変化様式、シーラントの過熱による分解、汚染など他の条件を探ることが必要であると考えられる。

Fig. 14 Extension experiment(Nakashima et al., 2017)

Fig. 15 Result of tensile tests of the proposed module with single heater (Nakashima et al., 2017)

Fig. 16 Result of tensile tests of the proposed module with double heater

6. 結 言

本稿では、能動自己融解締結構造体を提案、作製した。応用例として、腱駆動機構に搭載可能な能動腱修復モジュールの開発指針を示し、その方針にしたがった試作モジュールを構築した。さらに、その有効性をモータ駆動腱を用いた引張試験により評価した。現状の提案構造は、ロボット搭載におけるサイズなど諸条件をクリアした他、初回における従来構造を大きく上回る強度を備え、実際に修復機能を有する点を確認した。しかしながら、未だその修復率は小さく、特にロボットにおける脚移動など反復的高負荷の加わる運動へ本モジュールをそのまま適用するには難点が存在することも明らかになった。今後の課題として構成法や作製法などの改善による修復率の向上、自律的修復に向けた電装系やソフトウェアの構築、さらに実ロボット上での有効性の検証が課題として挙げられる。

謝 辞

本研究は日本学術振興会特別研究費 16J09710 の助成を受けたものである。

文 献

- Asano, Y., Kozuki, T., Ookubo, S., Kawasaki, K., Shirai, T., Kimura, K., Okada, K. and Inaba, M., A sensor-driver integrated muscle module with high-tension measurability and flexibility for tendon-driven robots, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(2015), pp.5960–5965.
- Davis, S. and Caldwell, D. G., Biologically inspired damage tolerance in braided pneumatic muscle actuators, Journal of Intelligent Material Systems and Structures(2012), pp.313–325.
- Hubicki, C., Grimes, J., Jones, M., Renjewski, D., Sprwitz, A., Abate, A. and Hurst, J., ATRIAS: Design and validation of a tether-free 3D-capable spring-mass bipedal robot, The International Journal of Robotics Research, Vol. 35, No. 12(2016), pp.1497–1521.
- Nagahama, S., Kimura, Y., Kim, C H. and Sugano, S., The development of magnetic powdery sensor, Proceedings of the IEEE SENSORS conference(2014), pp.783–786.
- Nagahama, S., Tanabe, J. and Sugano, S., Development of a dipping wire method to improve the abrasion resistance of a plastic wire, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (2016), pp.743-748.
- 中島 慎介, 白井 拓磨, 浅野 悠紀, 垣内 洋平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, 大張力伝達, 高伸展可能な能動腱修復モジュールの開発, 第 35 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集 (2017), 2F1-02.
- Terryn, S., Mathijssen, G., Brancart, J., Van Assche, G., Vanderborght, B. and Lefeber, D., Investigation of self-healing compliant actuators for robotics, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (2015), pp.258–263.
- Terryn, S., Brancart, J., Lefeber, D., Van Assche, G. and Vanderborght, B., Self-healing soft pneumatic robots, Science Robotics, Vol.2, No.9 (2017), pp.258–263.
- Tonazzini, A., Mintchev, S., Schubert, B., Mazzolai, B., Shintake, J. and Floreano, D., Variable stiffness fiber with self-healing capability, Advanced Materials(2016), pp.10142–10148.
- 梅田 靖, 下村 芳樹, 富山 哲男, 吉川 弘之, 制御型自己修復機械の構築, 精密工学会誌, Vol. 60, No. 10 (1994), pp.1429–1433.

References

- Asano, Y., Kozuki, T., Ookubo, S., Kawasaki, K., Shirai, T., Kimura, K., Okada, K. and Inaba, M., A sensor-driver integrated muscle module with high-tension measurability and flexibility for tendon-driven robots, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(2015), pp.5960–5965.
- Davis, S. and Caldwell, D. G., Biologically inspired damage tolerance in braided pneumatic muscle actuators, Journal of Intelligent Material Systems and Structures(2012), pp.313–325.
- Hubicki, C., Grimes, J., Jones, M., Renjewski, D., Sprwitz, A., Abate, A. and Hurst, J., ATRIAS: Design and validation of a tether-free 3D-capable spring-mass bipedal robot, The International Journal of Robotics Research, Vol. 35, No. 12(2016), pp.1497–1521.
- Nagahama, S., Kimura, Y., Kim, C H. and Sugano, S., The development of magnetic powdery sensor, Proceedings of the IEEE SENSORS conference(2014), pp.783–786.
- Nagahama, S., Tanabe, J. and Sugano, S., Development of a dipping wire method to improve the abrasion resistance of a plastic wire, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (2016), pp.743-748.
- Nakashima, S., Shirai, T., Asano, Y., Kakiuchi, Y., Okada, K. and Inaba, M., Development of active self healing tendon module with high load transmission and large displacement extension capability, Proceedings of the 35th annual conference of the Robotics Society of Japan(2017), 2F1-02 (in Japanese).
- Terryn, S., Mathijssen, G., Brancart, J., Van Assche, G., Vanderborght, B. and Lefeber, D., Investigation of self-healing compliant actuators for robotics, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (2015), pp.258–263.
- Terryn, S., Brancart, J., Lefeber, D., Van Assche, G. and Vanderborght, B., Self-healing soft pneumatic robots, Science Robotics, Vol.2, No.9 (2017), pp.258–263.

Tonazzini, A., Mintchev, S., Schubert, B., Mazzolai, B., Shintake, J. and Floreano, D., Variable stiffness fiber with self-healing capability, *Advanced Materials*(2016), pp.10142–10148.

Umeda, Y., Shimomura, Y., Toyama, T. and Yoshikawa, H., A Design Methodology for Control-type Self-maintenance Machine, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 60, No. 10 (1994), pp.1429–1433 (in Japanese).

Table 2 Parameters of metals

No	Metal Name	U_{GT} [J/g]	U_{HM} [J/g]	η [%]
1	1460 Alloy, pressed profile	19.2	921.6	2.1
2	Alcoa 7055-T77511 Aluminum Extrusions	24.7	933.8	2.6
3	Aluminum 7001-T6; 7001-T651	21.4	914.7	2.3
4	Aluminum 7001-T75	24.5	914.7	2.7
5	Aluminum 7034-T6	41.5	933.8	4.4
6	Aluminum 7055-T7751 Plate	24.7	933.8	2.6
7	Aluminum 7068-T6; 7068-T651 Rod & Bar	22.0	933.8	2.4
8	Aluminum 7068-T6; 7068-T6511 Rod & Bar	22.4	933.8	2.4
9	Aluminum 7068-T76; 7068-T76511 Rod & Bar	19.4	933.8	2.1
10	Aluminum 7150-T7751 Plate	25.5	933.8	2.7
11	Magnesium AZ61A-F, Extruded Solid Shapes	27.6	782.7	3.5
12	Magnesium AZ80A-F, Extruded	13.2	792.1	1.7
13	Magnesium AZ80A-F, Forged	20.2	792.1	2.5
14	Magnesium AZ80A-T5, Extruded	14.8	792.1	1.9
15	Magnesium AZ80A-T5, Forged	21.1	792.1	2.7
16	Magnesium AZ80A-T6, Forged	9.4	792.1	1.2
17	Magnesium EA55RS-T4, Extruded	30.7	717.0	4.3
18	Magnesium EA65RS-T4, Extruded	13.4	717.0	1.9
19	Magnesium Elektron Elektron [®] 675 Magnesium Wrought Alloy	18.8	717.0	2.6
20	Magnesium HM31A-T5, Extruded Solid Shapes	16.6	788.0	2.1
21	Special Metals Nitinol Chrome-Doped Superelastic Ni-Ti alloy	23.8	749.2	3.2
22	Special Metals Nitinol High-Strength Superelastic Ni-Ti alloy	27.9	749.2	3.7
23	Special Metals Nitinol High-Strength Superelastic Ni-Ti-Fe alloy	22.3	749.2	3.0
24	TIMET TIMETAL [®] 21S Titanium Silicon Carbide Fiber Composite	0.0	749.2	0.0
25	TIMET TIMETAL [®] 21S Titanium Alloy (Ti-15Mo-3Nb-3Al-0.2Si, ASTM Grade 21); 40% Cold Work	20.3	904.8	2.2
26	" ; 60% Cold Work	21.5	904.8	2.4
27	" ; 80% Cold Work	17.2	904.8	1.9
28	" ; ST (843C°) - (900C°) Age (538C°)	47.1	904.8	5.2
29	TIMET TIMETAL [®] 551 (Ti-4Al-4Mo-4Sn-0.5Si) Titanium Alloy; <25 mm	31.5	749.2	4.2
30	Titanium Beta C (Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr ST 815C°, Aged 425C°)	24.9	1068.0	2.3
31	414 Stainless Steel	19.5	959.3	2.0
32	420 Stainless Steel	4.4	973.1	0.4
33	AISI Type S14800 Stainless Steel condition CH900, 49.2% cold reduction	2.5	1002.8	0.2
34	AISI Type S14800 Stainless Steel condition CH900, 59.7% cold reduction	2.6	1002.8	0.3
35	AISI Type S14800 Stainless Steel condition CH900, 72.5% cold reduction	0.5	1002.8	0.1
36	AISI Type S21800 Stainless Steel, 70% cold reduction	19.6	1002.8	2.0
37	AISI Type S24100 Stainless Steel 6.4 mm diameter annealed rod, 60% cold reduction	18.9	1002.8	1.9
38	AK Steel 17-7 PH [®] Precipitation Hardening Stainless Steel, Condition CH 900	4.7	1002.8	0.5
39	AK Steel PH 15-7 Mo [®] Precipitation Hardening Stainless Steel, Condition CH 900	4.7	1002.8	0.5
40	ATI Allegheny Ludlum Martensitic Stainless Steel Type 425 Mod, Hardened 204C° Temper	17.9	1002.8	1.8
41	U47	0.1	17.1	0.4
42	U47'	0.9	17.2	5.0
43	U70	8.9	40.1	22.3
44	U80	8.9	31.1	28.6
45	U124	3.0	29.2	10.3
46	U138	13.4	67.8	19.7
47	U150	14.4	75.7	19.0