

平成30年6月20日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289023

研究課題名(和文) 完全脱力モードを有するロボット関節用高出力多次元アクチュエータの開発

研究課題名(英文) Development of high power multi-degree-of-freedom actuator for robot joints with torque-free mode

研究代表者

青柳 学 (AOYAGI, Manabu)

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：80231786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：小型ヒューマノイドの肩関節用として、積層圧電アクチュエータにより円環状ステータを強勢に励振し、高トルク・サンドイッチ型球面超音波モータ(SUSM)を考案・試作した。従来型より最大トルクは約25倍(約2N.m)、トルク重量比は約20%向上した。また、球状ステータを用いたSUSMを考案し、試作により動作原理を確認した。さらに、摩擦力を制御し、トルクフリー状態を有するSUSMの可能性を検討した。サーボモータでアーム付き球状ロータを回転させ、圧電クラッチと連結された2つのステータで球を挟み込み、肩関節を模擬した。脱力したアームの振りに瞬間的に摩擦駆動力を与えることで、上肢の自然な振りが実現できた。

研究成果の概要(英文)：As the shoulder joint of a small humanoid, the high power sandwich-type spherical ultrasonic motor (SUSM) excited by multilayered piezoelectric actuators was devised and examined. The maximum torque and torque-weight ratio increased 25 times (approximately 2N.m) and 20% more than those of previous SUSM, respectively. The SUSMs using the spherical stator were also devised, and the operating principle was confirmed by some experiments. Possibility of realization of SUSM with torque-free state generated by the control of friction force between the rotor and stator was experimentally considered. An arm attached on the spherical rotor rotated by a servo motor and two stators jointed by piezoelectric clutches was used as a substitute for the shoulder joint using the SUSM. As a result, the natural swing of the arm was able to be realized by applying momentary friction driving force periodically to the arm while that was swinging in torque-free mode.

研究分野：超音波工学

キーワード：機械要素 アクチュエータ トルクフリー 周期入力 多次元 ヒューマノイド ロボット

## 1. 研究開始当初の背景

ヒューマノイドや機能性ロボットの発展に伴い、複雑化・高機能化が進み、システムの小型化、設計の単純化が望まれている。その解決策の一つとして、駆動部に単体の多自由度アクチュエータの採用が望まれている。そのため、様々な原理を用いた多自由度アクチュエータが研究されてきた。特に、電磁型、圧電型（超音波型）の多自由度モータの研究が多くなされているが、ロボット関節駆動などの高トルクが必要な応用に対して、国内外における他の先行研究では電磁型も圧電型も適したものは見当たらない。特に、電磁型のロータの保持は解決すべき重要課題であるが解決は容易でない。一方、球面超音波モータ(SUSM)では原理的にロータ保持問題は存在しない。つまり、高トルク化が達成できれば、SUSMが実用化に最も近い。著者ら考案した球面超音波モータの1999年頃からの研究成果より、考案した円環形多自由度超音波モータの発展形が最も高トルク実現の可能性が高いと考えられる。

## 2. 研究の目的

主に小型ヒューマノイドの肩関節用の多自由度アクチュエータを開発する。条件として、(1)直接駆動で3軸動作可能であり、(2)歩行時の上肢の自然な振りが得られることである。著者らが考案したダイレクト駆動可能なSUSMの高トルク化を実現し、クラッチ機能を内蔵し、完全脱力モードを備え、自然な歩行動作を可能にし、周期入力制御可能なアクチュエータ・システムを実現する。つまり、研究目的は次の項目を明かにすることである。  
1) 考案したSUSMは励振方法の改善で更に高出力化できること。  
2) SUSMに予圧制御機能を内蔵し、完全脱力モードを実現できること。周期入力制御による滑らかな動作の可能性を確認すること。

## 3. 研究の方法

筆者らの先行研究の成果を基に、次の2つのテーマを実施する。

### (1) テーマ1：サンドイッチ型球面超音波モータの高トルク化

単一で3自由度回転できる2個のステータで球状ロータを挟み込む構造である[1]。電極分割された圧電板を接着し、屈曲振動モード(2種)、径方向伸縮振動モード、面内非軸対称振動モード(2種)を励振する。直交する2つのモードの組合せにより、楕円変位が接触面に発生し、3軸回転が可能である。ロータの保持機構が不要であり、2つのステータの3軸方向の発生トルクの和が得られる利点があり、他の方式よりも大きなトルクが得られる可能性が高い。更にトルクを増大させるため、励振方法の改善を検討する。

1-1) ステータ励振強度の増大：圧電材料の使用方法の変更(圧電横効果→圧電縦効果、

圧電単板→積層化)

屈曲振動モード励振は圧電板の接着による励振は横効果を利用しているため、縦効果に比べて励振効率が3分の1である。圧電縦効果を用いた積層圧電アクチュエータ(MPA)をステータに埋め込み、励振する。縦効果に加えて積層効果で低駆動電圧が実現できる。ステータ形状を有限要素法解析(FEA)により設計し、ステータの設計改善を行う。

### 1-2) 球状ステータの検討

ロータとステータの関係を逆転させた発想による構成である。可動子を小さくできるため、球状ステータの直径を大きくすることができ、駆動点と中心との距離が長くなるため、高トルク化が期待できる。球体のバルクモードを利用する。球体内部へのMPAの配置、または、球体表面にMPAを埋め込むことにより、励振することを試みる。球状ステータの駆動に適した楕円変位を形成できる振動モードを発生できる形状をFEAにより設計する。

## (2) テーマ2：電氣的予圧制御機構の開発と脱力モードの周期入力制御への応用

2-1) 圧電クラッチの設計と実装の検討  
MPAと変位拡大機構から構成される圧電クラッチを2つのステータ間に配置する。または、円環ステータ振動子外周部に圧電クラッチの構成を試みる。MPAが伸びると垂直方向に変位を拡大して縮む。圧電クラッチの上下部にステータが締結されると予圧調整できる。

2-2) 周期入力制御による上肢振り制御  
圧電クラッチを備えたサンドイッチ型SUSMを用いて、歩行時のヒューマノイドの上肢の振りを制御する。上肢の振り角 $\theta$ と駆動トルクの関係の一例を示す。上肢の位置に合わせてパルス入力し、入力時以外のほとんどは脱力モードで上肢の慣性で動くため、エネルギー消費が少なく、また滑らかな自然な振りを実現する。所望の特性のアクチュエータの開発が間に合わない場合は小トルクのアクチュエータを用いて実施する。

## 4. 研究成果

### (1) サンドイッチ型SUSMの高出力化

①動作原理：SUSMは径方向伸縮振動モード[R1-mode]、面垂直屈曲振動モード[B21-mode]、非軸対称振動モード[((1,1)-mode]の3種類の振動モードとそれらに対する直交モードをMPAにより励振させる。これらの振動モードの組み合わせで、任意方向の振動モード回転を得られる[1]。

②SUSMの基本構造：図1に示すようなSUSMを作製した。各ステータはSUS304製で、1つのステータに表裏16個のMPAを埋め込んだ。電気機械結合係数が高いハード材のMPAを用いることで、発熱が少なく、大きな変位量と発生力を得られ、低電圧駆動が可能となる。

また、ロータ接触部の厚みを増やすことで剛性を高め、高トルク化を図った。ここで、高トルク化の実現のため、従来型よりロータの直径を約 2.5 倍 (50.8mm) にし、ステータ主要部も約 2.7 倍大きいステータを設計した。

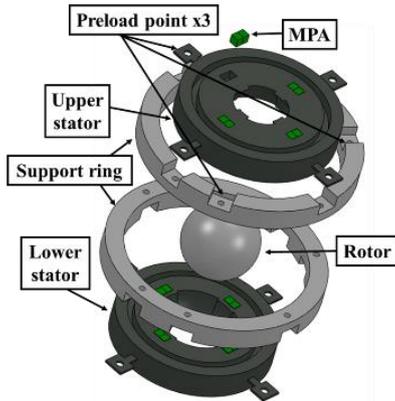
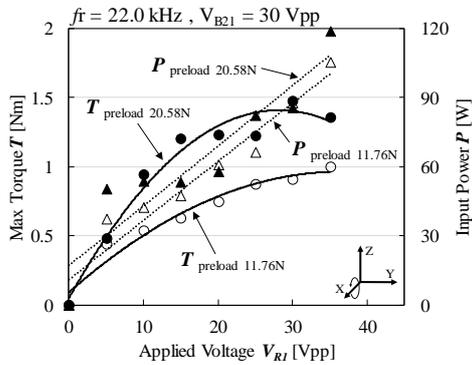


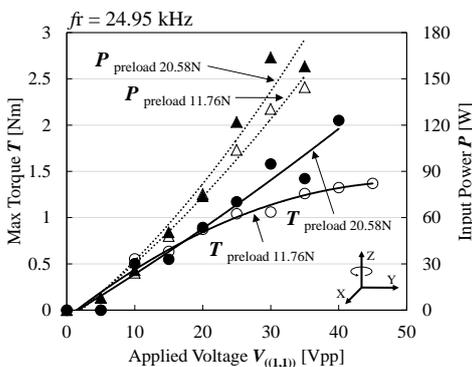
図 1 ハイパワー・サンドイッチ型 SUSM

③従来型との比較

- ・電気特性： R1-mode, B21-mode, ((1,1)-mode のアドミタンスはそれぞれ 0.52S, 1.08S, 1.48S が得られた。また、Q 値は従来型と比較すると、それぞれ 1.7 倍, 2.2 倍, 1.2 倍が得られた。
- ・最大トルク： 図 2(a), 5(b) に予圧 11.76N, 20.58N 時の印加電圧に対する X(Y) 軸, Z 軸回転の最大トルクと入力電力を示す。ここで、X(Y) 軸回転, Z 軸回転の各駆動周波数はそれぞれ 24.95kHz, 22.0kHz であった。また、X(Y) 軸回転で B21-mode の印加電圧を 30Vpp に固定し、R1-mode の印加電圧を変えて測定した。



(a) X(Y) 軸回転



(b) Z 軸回転

図 2 印加電圧に対する最大トルクと入力電力

表 1 に試作機と従来型の最大トルクとトルク重量比の測定結果を示す。最大トルクが Z 軸回転で 2.05N・m, X(Y) 軸回転で 1.48N・m が得られた。従来型の約 25 倍に増大した。また、トルク重量比は X(Y) 軸回転で従来型の約 1.24 倍, Z 軸回転で 1.18 倍の結果が得られた。試作機のサイズが大きいことに加えて、MPA による強力励振が最大トルクおよびトルク重量比が増大した理由と考えられる。

表 1 トルク特性比較

SUSM type		試作品	従来型
最大トルク (N・m)	X(Y) 軸回転	1.48 (30)	0.058 (80)
	Z 軸回転	2.05 (40)	0.084 (140)
トルク/重量比 (Nm/kg)	X(Y) 軸回転	0.87	0.70
	Z 軸回転	1.20	1.02

⑤負荷特性： ロータ回転の過渡応答を測定し、X(Y) 軸回転, Z 軸回転の負荷特性を算出した。結果の一例として、予圧 20.58N において、印加電圧 25Vpp の時、X(Y) 軸回転と Z 軸回転の回転速度はそれぞれ約 26rpm と約 57rpm, 最高効率は 1.2~1.4%程度が得られた。低効率の原因として、ステータの摩擦駆動面が広いことによる摩擦損失とステータに用いた MPA による損失が考えられる。ステータは室温で約 60℃まで温度上昇が確認された。

(2) 球状ステータを用いた SUSM

①動作原理： 図 3 に示すような球体の振動モードである 12m1-mode (1 : 節線総数, m : 経線数) とそれと直交した 12m1'-mode を使用する。この振動モードを使用することで、同図のような 2 つの方法で振動モード回転が可能になる。Type-A では、12m1-mode と 12m1'-mode 間に時間位相差 90deg を与えることで、対称軸が同一面内を回転する振動モード回転, Type-B では、12m1-mode と対称面に直交した 12m1'-mode 間に時間位相差 90deg を与えることで対称軸が歳差運動するように回転する振動モード回転ができる。これらの振動モード回転により、球状ステータ表面に進行波が得られ、接触面に楕円変位が生成され、摩擦力が生じてロータが駆動する。同様に、励振点を切り替えることで、任意軸周りの振動モード回転が得られ、多自由度運動が可能になる。

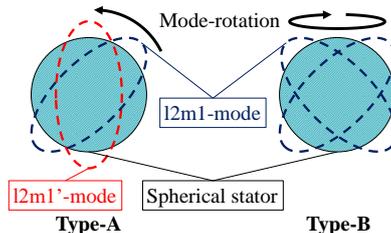


図 3 2 種類のモード回転

②振動解析： 3軸回転が可能となる積層圧電アクチュエータ(MPA)の配置について検討した。図4に示すように1軸回転あたり8個、3軸回転で計24個のMPAを埋め込む構造を考案した。直径50.8mmのSUS304製の球体にMPAを固定部品と共に埋設する。部品を簡略化したモデルでFEAを用いて解析を行った。12m1-mode, 12m1'-modeの両モードが得られ、モード間に90degの時間位相差を与えることで、3軸の振動モード回転がType-AおよびType-Bの方法で得られた。

また、球表面にはMPAとその固定部品や配線が多く存在するため、ロータ駆動用に円柱状突起(駆動点)を球表面に設置する方法を考案した。駆動点の直径および長さ $l$ に対する各駆動点先端の変位軌跡を解析した結果、円柱の直径は駆動点の変位にほとんど影響しなかった。したがって、駆動点の直径をMPAの配置の妨げにならない上限の6mmとした。駆動点の長さ $l = 4.5\text{mm}$ 以下で回転方向が一致したため、 $l = 4\text{mm}$ と決定した。図5のように形状や大きさは異なるが同方向の楕円軌跡が得られた。

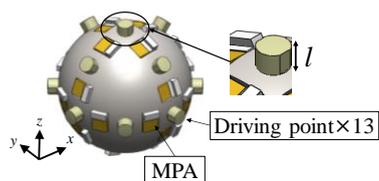


図4 駆動点としての突起の球面上の配置

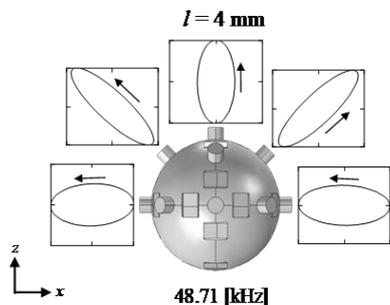


図5 駆動点の変位軌跡 ( $l=4\text{mm}$ )

④性能評価： 図6に示すような球状ステータを作製した。12m1-mode および 12m1'-mode を励振するために、1つのモードにつき4つのMPAを使用する。また、ロータにフィットさせるため各駆動点は球面加工されている。各軸回転および2種類の振動モード回転方法を想定し、励振ポート Port A から Port H まで、各 MPA に 30Vpp (offset 15V) 印加したときの変位を測定した。その結果、多少のばらつきはあるが、12m1-mode および 12m1'-mode を確認した。これらの結果から、各ペアのポート間に 90deg の時間位相差を与えたところ、Type-A の x(y) 軸で 45895Hz, z 軸で 45000Hz, Type-B の z 軸回転で 47688Hz のとき、各軸の振動モード回転をベアリングにより確認した。しかし、Type-B の x(y) 軸の振動モード回転は確認できなかった。また、

各軸回転において、Type-A, B を比較すると、x(y)軸回転では Type-A, z 軸回転では変位の大きい Type-B がロータ駆動に適していた。

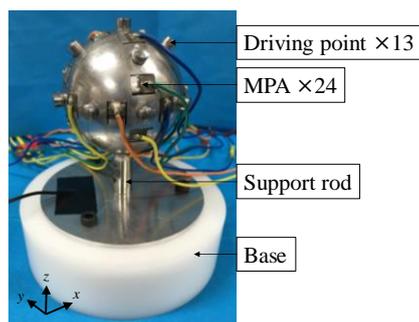


図6 MPA と駆動点を配置した球面ステータ

⑤SUSM の特性： 図7に示すようなカーボン入り PPS 製の球状ステータ用ロータを作製した。下ロータにより左右の予圧、上、下ロータにより上下の予圧調整がバネにより可能である。球状ステータを用いた SUSM の回転速度とそのときの入力電力を測定した。このときの予圧は 0.49N であり、回転方法および駆動周波数は x(y) 軸回転で Type-A の 45750Hz, z 軸回転で Type-B の 47587Hz であった。x(y) 軸回転で 4.23 rpm (60 Vpp), z 軸回転で 4.62 rpm (55 Vpp) の最大回転速度が得られた。入力電力は約 100W であった。今後、さらに性能を上げるため、力率改善および高効率化を図る必要がある。

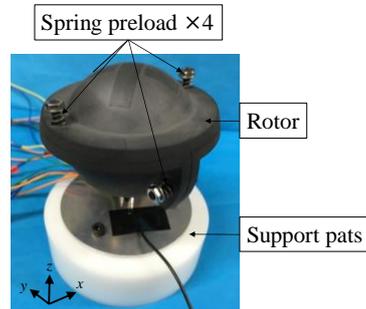


図7 球状ステータを用いた SUSM

### (3) 電氣的予圧制御機構の開発と脱力モードの周期入力制御への応用

人間の関節に近い動きの実現を目的とする肩関節駆動部の試作を行う。なお、AC サーボモータを用いて簡易的に制御した。

#### ① 圧電クラッチ機構の概要：

簡易的な球面超音波モータとなる圧電クラッチ機構の概要を図8に示す。同図より、2つのステータでロータを挟み込み、2つの圧電クラッチがそれぞれステータの側面に固定されている構造である。本装置は球面超音波モータのステータの代わりに樹脂製の球面状のくぼみを設けたブロックを使用しており、球の代わりに球面ロータを使用している。赤線内が圧電クラッチであり、積層圧電アクチュエータ(MPA)、変位拡大機構

(SUS303), 楔と楔受け(SUS303), MPA 固定治具(A7055)から構成されている。楔の締め具合によって初期予圧の調整が可能である。AC サーボモータにより球面ロータを回転させ、球面超音波モータの動作を模擬した。

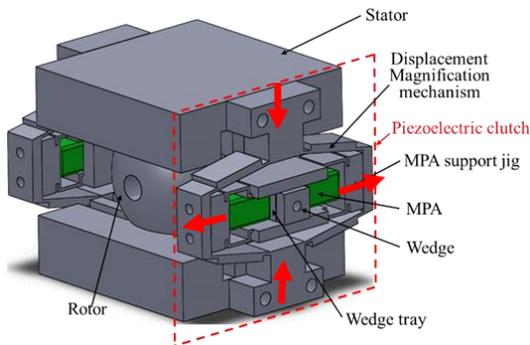


図 8 関節ユニット概要

### ② 圧電クラッチ機構の動作原理

圧電クラッチはMPAを用いてクラッチを動作させるものである。圧電クラッチがON, OFFのときの状態をそれぞれ説明する。

まず、圧電クラッチがONのとき、機構はMPAに電圧が印加された状態である。このとき図8に示すようにMPAが伸び、機構を両サイドに押し広げることで、縦方向に縮むように変位する。これにより、ロータとステータ間の予圧力が増加し、摩擦力が増加する。よって、ロータの回転を伝達する状態(摩擦駆動状態)となる。

次に、圧電クラッチがOFFのとき、機構が図8に示すようにMPAに電圧を印加していない状態である。このとき、ロータとステータ間の予圧力が小さいため、摩擦力も小さい。よって、ロータは空回りする状態(トルクフリー状態)となる。MPAは高速応答特性を有するため、圧電クラッチの高速に動作し、電気的に予圧力を制御することができる。

### ③ 圧電クラッチの拡大変位特性

MPAに印加する電圧を0~150Vまで変化させたときのMPAの変位および圧電クラッチの先端の拡大変位をレーザー変位計(LK-H052, KEYENCE)により測定した。印加電圧に対してMPAおよび圧電クラッチの変位が比例し、MPAへの印加電圧が150VのときMPAの変位が17.68[μm]であったのに対し、圧電クラッチの変位は138.60[μm]であった。これより、最大変位時で2個のMPAの変位の合計に対して、圧電クラッチでは約4倍の拡大変位が得られた。

### ④ 肩関節駆動部を用いた振り子運動制御

#### ・制御方法および実験方法

圧電クラッチ機構を用いて肩関節駆動部を作製した(図9)。作製した肩関節駆動部のアームが振り子運動をするようにACサーボモータ、圧電クラッチの制御を行った。実験手順を以下の(1)~(4)に示す。

- (1) 摩擦駆動を行い、アームを持ち上げる。
- (2) トルクフリーにし、アームを真下付近に到達するまで振らせる。
- (3) アームの振りが減衰しないように瞬間的に摩擦駆動を行う。
- (4) (2), (3)を周期的に繰り返す。

なお、ACサーボモータ、MPAはPC(LabVIEW)上でマイコン(Arduino Uno R3)を操作し、オープンコレクタ出力を行うことでON, OFFの切り替えを行い、制御した。また、圧電クラッチのOFF, ONに対応するMPAへの印加電圧はそれぞれ0V, 150Vとした。タイミングチャートを図10に示す。同図のパラメータ $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ は持ち上げ時間, トルクフリー時間, 摩擦駆動時間である。



図 9 肩関節ユニット

### ⑤ 実験結果

$t_1 = 8[s]$ ,  $t_2 = 0.3[s]$ ,  $t_3 = 0.05[s]$ と設定

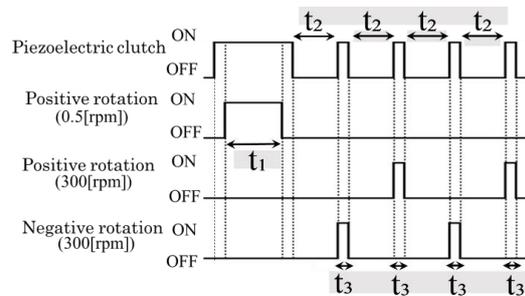


図 10 タイミングチャート

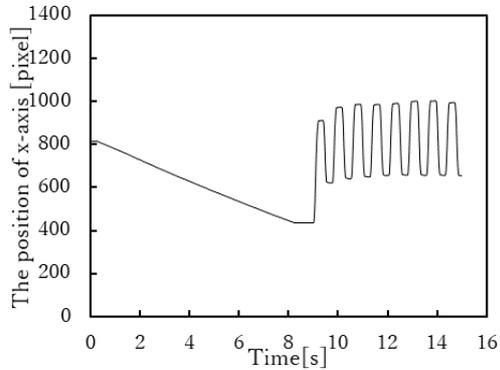
して実験を行った。なお、実験結果を比較し、評価するために圧電クラッチが常にONの場合にして同様の動作、測定を行った。アーム先端の横方向(x軸)の位置の推移を図11(a), (b)に示す。位置は画像より算出している。

圧電クラッチが常にONのとき、図11(a)に示すように、ピーク時が平らであることから、自己保持力が低減されず、機械らしさが残った硬い動きであった。

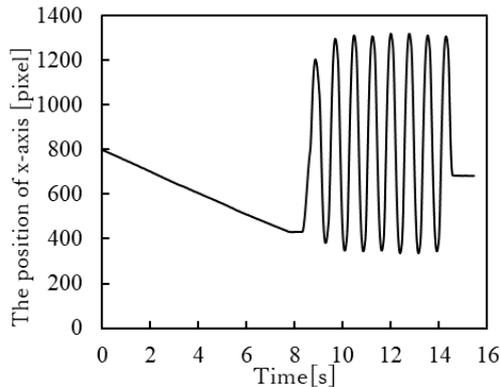
圧電クラッチのON, OFFを制御したときの結果を図11(b)に示す。図11(a)と比較すると、振幅が大きい。これよりエネルギーを効率よく使えていることがわかる。また、波形が正弦的であることからアームが自己保持

力を低減した滑らかな動きをしていることがわかる。

以上よりトルクフリーによって脱力したアームの振りに瞬間的な摩擦駆動を行うことで、人間の腕のような振り子運動が実現できたといえる。



(a) 圧電クラッチ常時 ON 時



(b) 圧電クラッチ制御時

図 11 アーム振れ位置検出結果

<引用文献>

- [1] B. Lu et al., JJAP, 49, 7, 2010, pp. 07HE24-1~07HE24-7.  
 [2] S. Nakajima et al., JJAP, 55, 7S1, 2016, pp. 07KE18-1 ~ 07KE18-5.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Ai Mizuno, Koki Oikawa, Manabu Aoyagi, Hidekazu Kajiwara, Hideki Tamura and Takehiro Takano, Examination of High-Torque Sandwich-Type Spherical Ultrasonic Motor Using with High-Power Multimode Annular Vibrating Stator, Actuators, 7, 1, Article Number:8, 2018, pp. 1-17  
 DOI : 10.3390/act7010008
- ② Shuta Nakajima, Hidekazu Kajiwara,

Manabu Aoyagi, Hideki Tamura, and Takehiro Takano, Study on spherical stator for multidegree-of-freedom ultrasonic motor, Jpn. Jour. of Applied Physics, 55, 7S1, 2016, pp. 07KE18-1 ~ 07KE18-5  
 DOI : 10.7567/JJAP55.07KE18

[学会発表] (計 13 件)

- ① 水野 愛, 青柳 学, 梶原 秀一, 田村 英樹, 高野 剛浩, サンドイッチ型多自由度球面超音波モータ (第 3 報) - 強力励振構成による高トルク化 -, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 2017, pp. 713-714
- ② 水野 愛, 青柳 学, 梶原 秀一, 田村 英樹, 高野 剛浩, 多自由度超音波モータ用球状ステータの駆動点の検討, 日本音響学会 2017 年春季研究発表会講演論文集, 2017, pp. 1059-1060
- ③ 及川 航希, 梶原 秀一, 青柳 学, 田村 英樹, 高野 剛浩, サンドイッチ型円環球面超音波モータの高出力化の検討, 第 36 回超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集, 2015, pp. 4-10
- ④ 及川 航希, 青柳 学, 梶原 秀一, 田村 英樹, 高野 剛浩, 積層圧電セラミックスを用いた強力円環振動子の検討 - サンドイッチ型円環球面超音波モータ (第 2 報) -, 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会講演論文集, 2015, pp. 1077-1078
- ⑤ 中島 秀太, 青柳 学, 梶原 秀一, 田村 英樹, 高野 剛浩, 球状ステータの振動モード設計と励振方法の検討, 信学会技術研究報告, 115 巻, 207 号, 2015, pp. 1-6

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青柳 学 (AOYAGI, Manabu)  
 室蘭工業大学・工学研究科・教授  
 研究者番号 : 80231786

(2) 研究分担者

梶原 秀一 (KAJIWARA, Hidekazu)  
 室蘭工業大学・工学研究科・准教授  
 研究者番号 : 00280313

(3) 研究分担者

田村 英樹 (TAMURA, Hideki)  
 研究者番号 : 90396581