

## フレームレスモータを用いた高重量出力比 EHA の設計と バックドライブ性能の評価

中西 貴大<sup>\*1</sup>, 駒形 光夫<sup>\*1</sup>, 山本 江<sup>\*1</sup>, 中村 仁彦<sup>\*2</sup>,

### Design Method of a High Power-to-Weight Ratio EHA with a Frameless Motor and Experimental Evaluation of its Backdrivability

Takahiro NAKANISHI<sup>\*1</sup>, Mitsuo KOMAGATA<sup>\*1</sup>, Ko YAMAMOTO<sup>\*1</sup> and  
Yoshihiko NAKAMURA<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

<sup>\*2</sup> Graduate School of Engineering, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

Industrial robot manipulators and field robots need to have robustness and mechanical backdrivability to provide fail safety and high sensitivity to external forces. An electro-hydrostatic actuator (EHA), a type of distributed hydraulic system, meets those requirements. An EHA has excellent transmission characteristics in situations where mechanical backdrivability and impact resistance are required. However, current EHAs have smaller power-to-weight ratio than actuators with gear reducers because they tend to be heavy and it is difficult to improve their efficiency. To solve this problem, we developed a revolute EHA with high power-to-weight ratio by using a frameless motor and integrating hydraulic components. In this paper, we describe detailed design methods of the EHA and experimentally evaluate backdriving performance.

**Key Words** : Electro-hydrostatic actuator, frameless motor, backdrivability

### 1. はじめに

電気モータを動力源とするロボット用回転型アクチュエータの減速方式には、ハーモニックドライブ<sup>(1)</sup>、遊星歯車<sup>(2)</sup>、油圧システムなどがある。またモータを減速せずに用いるダイレクトドライブ方式<sup>(3)(4)</sup>があり機械的信頼性の高さが特徴だが、モータの重量や大型化の問題がある。これらのうち油圧システムは耐衝撃性に優れることから、外界と相互作用しながらタスクを行う産業ロボットやフィールドロボットに適している。特に油圧システムの一形態である電気静油圧アクチュエータ (EHA)<sup>(5)</sup>は、1つの油圧アクチュエータに1つの油圧ポンプを組み合わせる油圧回路構成であることから制御バルブを不要とし、バックドライブバビリティ（出力側にトルクを与えた際の、出力側や入力側の動きやすさを表す性能指標）が高い。このことから EHA は、油圧システム共通の特性である高い耐衝撃性だけでなく、高い力制御性と信頼性、安全性を備え



Fig. 1: Developed revolute EHA module with high power-to-weight ratio. The weight is approximately 2.8 kg, and the maximum output is estimated to be 300 W.

るため、外界から接触力を受けながら柔軟にタスクを行う場面では理想的な伝達特性を持つといえる。

しかし EHA は 1 自由度に対して電気モータ、油圧ポンプ、油圧アクチュエータを 1 つずつ要するため重量が大きくなりやすい。これを背景として小型高出力 EHA が開発されてきた<sup>(6)(7)</sup>。しかし表 1 に示すように、比較的小型な減速機であるハーモニックドライ

<sup>\*1</sup> 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) nakanishi@ynl.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>\*2</sup> 東京大学大学院工学系研究科人工工学研究センター (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) nakamura@race.t.u-tokyo.ac.jp

ブを用いているアクチュエータモジュールと比べると、EHA は重量出力比では依然として不利となっている。

本研究は、EHA の重量の問題をさらに改善する設計法によって、ハーモニックドライブを採用するアクチュエータモジュールと同等の重量出力比を達成すると同時に、EHA ならではの高いバックドライバビリティを持つアクチュエータの開発を目指す。設計の主軸となるのは、扁平大径なフレームレスモータの採用である。フレームレスモータはブラシレス DC モータの一形態であり、採用すると設計自由度が向上するためアクチュエータの小型化に貢献する可能性があると同時に、高出力な製品も多い。フレームレスモータは歯車減速機と組み合わせられて従来のロボットにも採用されてきた<sup>(8)(9)(10)</sup>。2 章と 3 章では、フレームレスモータの特性の積極的活用による小型軽量構造を主軸とした、高重量出力比 EHA モジュールの設計法を詳細に示す。4 章では、開発された EHA のバックドライバビリティの優位性を実験評価によって実証する。

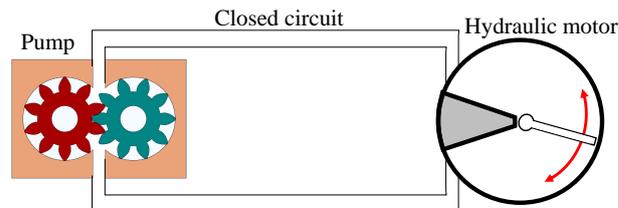
## 2. フレームレスモータ駆動 EHA の設計法

**2.1 設計目標** Hydracer<sup>(6)</sup>では EHA の重量によるマニピュレータの運動性能低下を軽減するために、可能な限りベースリンク側にモータとポンプが配置され、そこから手先のベーンモータまで油圧を導くために、複雑な流路が関節ごとに設計された。一方で、もしも扱いやすい一体モジュールとして EHA を提供できれば、ロボットに搭載する際の複雑な流路設計が不要となる。これによって、耐衝撃性やバックドライバビリティが要求される応用場面において、EHA を選択しやすくなると予想される。これを実現するためには、EHA の重量出力比の改善が必須である。

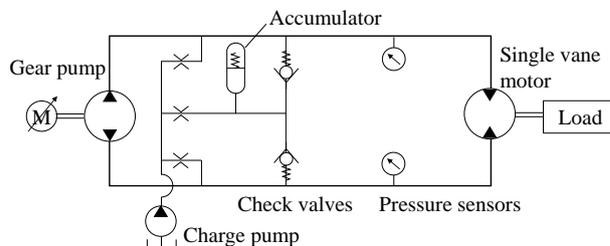
図 1 に示す、開発した回転型 EHA モジュールが目標としたのは、EHA の構成要素の一体化による可搬性、小型さ、高重量出力比である。出力性能は小型から中型のロボットマニピュレータや、ヒューマノイドロボットの肩から手首にかけての搭載を想定し、最大出力トルク 120 Nm 程度、最大回転数 60 rpm 程度、最大出力 300 W 程度を達成する見込みである<sup>3</sup>。

**2.2 EHA の油圧回路** 図 2(a) に、回転型 EHA の概念図を示す。一つのポンプと一つの油圧モータとが閉回路で接続されており、ポンプによって高圧と低圧がつけられ、その差圧によって油圧モータがトルクを出力する。EHA の利点の一つは、制御バルブが不要となることから、外部から油圧モータに与えられ

<sup>3</sup>一例として、産業分野で様々なタスクを行うために目標可搬質量 10 kg として設計されたヒューマノイドロボット ARMAR-6<sup>(11)</sup>の肘関節の最大出力トルクは 123 Nm である。今回設計する回転型 EHA モジュールは類似の用途に用いることができるといえる。



(a) Simplified diagram of a revolute EHA.



(b) Circuit diagram of the proposed EHA.

Fig. 2: Hydraulic circuit of the revolute EHA.

たトルクがポンプに伝わりやすく、バックドライバビリティが高いことである。図 2(b) に、提案する回転型 EHA モジュールの油圧回路図を示す。歯車ポンプとベーンモータが一对一で接続されている。それ以外の要素として、回路に作動油を充填し与圧をかけるためのチャージ機構と、その与圧を保つためのアクキュレータが追加された。

図 3 に、提案する EHA モジュール全体の構成を示す。右側には外接歯車ポンプがフレームレスモータに同軸に内蔵されて駆動される様子が描かれており、その油圧により左側のシングルベーンモータが機械的出力を生む。ポンプは最大吐出圧 14 MPa を想定して設計され、ベーンモータは可動域 310 deg、出力トルクは 120 Nm (差圧 12 MPa 時) を目標に設計された。各構成要素の詳細な設計法について以下に論じる。

### 2.3 EHA 構成要素の軸方向寸法小型化

**2.3.1 フレームレスモータへのポンプ格納** 本研究の設計で主軸となるのは、扁平大径なフレームレスモータの特性を活かしてポンプをモータ内に格納することで、小型化を実現する設計法である。以下のような設計方針を取った。

1. 大トルク出力によるポンプ駆動用減速機の省略
2. 軸受設計の自由度の高さを活かした薄型軽量軸受
3. 回転子の中空部にポンプを内蔵する小型化設計

まず設計方針 1 について説明する。本研究ではポンプの動力源として、フレームレスモータ T-motor RI100<sup>(13)</sup>を採用した。最大トルクは 4.92 Nm、定格回転数は 3100 rpm と、比較的大トルク低速型の特性により、減速機を介さずにポンプを駆動する設計が可能となった。

Table 1: Comparison of robotic revolute actuators. The power-to-weight ratio (PWR) of the EHA is inferior to that of the actuators with Harmonic Drives.

Transmission	Model	PWR [W/kg]	Peak output [W]	Motor output [W]	Weight [kg]
EHA	Hydracer <sup>(6)</sup>	43	98	200	2.3
Gear reducer	ARMAR-6 <sup>(8)</sup>	110	243	270	2.2
Gear reducer	CHIMP <sup>(9)</sup>	60	60	220	1.0
Gear reducer	WAREC-1 <sup>(10)</sup>	64	372	570	5.8

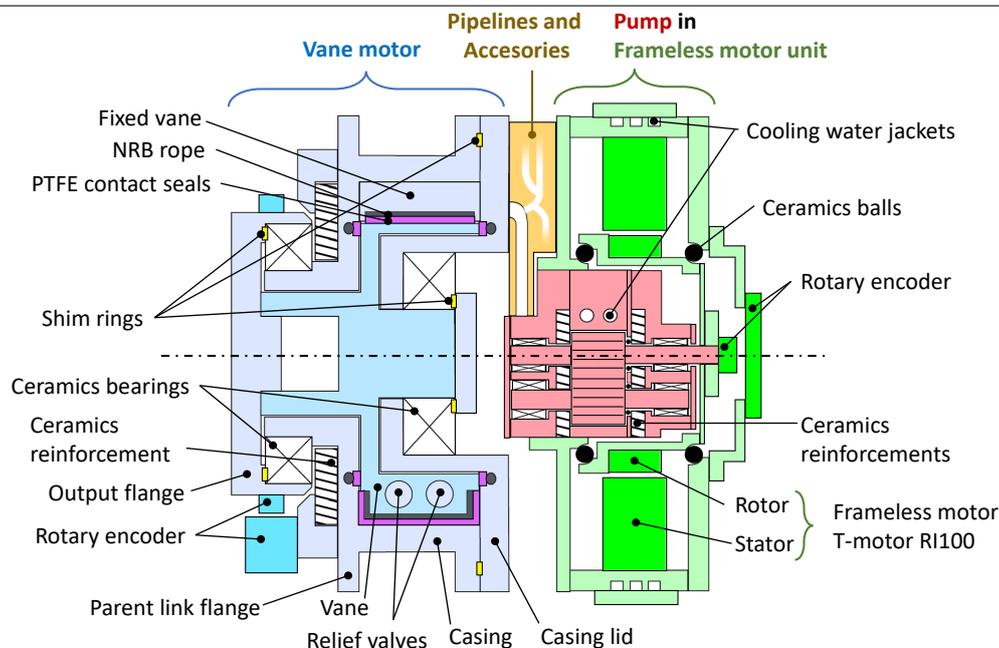


Fig. 3: Simplified section of the proposed EHA module.

減速機の省略により、機械的信頼性と動力伝達効率、バックドライバビリティを向上できる。

次に設計方針2について説明する。歯車やプーリは、モータ軸から半径方向に離れた点で力を伝達するため、伝達トルクに応じてモータ軸受にラジアル荷重がかかる。しかし今回のように減速機を廃した直結駆動では、余計なラジアル荷重なくポンプを駆動できる。そこで軽荷重を前提とし、セラミックス軸受球とアルミ合金製レースによる組み込み型の軽量薄型アンギュラボールベアリングを構成した<sup>4</sup>。アルミ合金製レースには、セラミックス球の転動面の表面硬度と低摺動性の確保を狙って、フッ素樹脂含有無電解ニッケルめっきを処理した。以上のように、ラジアル荷重が小さく転動面の接触応力が小さいことと、表面処理の特性を踏まえると、軸受寿命はある程度確保できると考えられる（寿命を決定するには実験が必要である）。

最後に設計方針3について説明する。扁平大径なフレームレスモータの回転子は、十分にポンプを格納できる直径の中空部を持つ。ここにポンプを内蔵する統

合的設計により、ポンプユニット全体の小型軽量化を実現した。

以上のように、外径の比較的大きいフレームレスモータを採用していながら、中空回転子にポンプを格納し、直結駆動方式と小型軽量な軸受を採用することで、コンパクトで機械的信頼性の高い電動ポンプが実現された。

**2.3.2 扁平なベーンモータの設計法** 可動域310°のシングルベーンモータを開発した。軸方向に小型なベーンモータが設計目標とされたが、一方で、作動油の入る空間であるチャンバ部を扁平化するのは損失増加の観点から好ましくない。理由は、チャンバ部が扁平であると、チャンバ部の内側表面積が大きくなるため、内圧によるケーシング変形量が増大し、内部漏れ損失が増大するためである。よって、チャンバ部ではなく軸受周辺部の工夫によって、ベーンモータを扁平化する以下のような設計を行った。

1. 図3のベーンモータの右側のベアリングをチャンバ部に潜り込むように配置
2. ベーンは回転軸と一体部品とし、それらの締結フランジを排除

<sup>4</sup>提案する軸受は磁化されないため、モータの近傍に配置されてもモータの円滑な回転を保證できるという利点もある。

3. 出力フランジと回転軸との締結は、場所を取る摩擦式締結具等を用いず、ボルトのみによる締結3つめに関して、締結時に機械加工公差を吸収してベアリング内部隙間を適正化しつつ、ベーンとケーシングとの間の微小隙間を調整するために、3箇所 Shim 調整箇所を設けた。

ベアリングとして窒化ケイ素  $Si_3N_4$  製のアンギュラベアリングを採用し、軸受の高剛性化と軽量化を狙った。同じサイズの軸受鋼製ベアリングを用いる場合と比べて、軸受だけで合計約 150 g の軽量化がなされた。

**2.3.3 薄型の流路マニホールド** 図 2 に示すように、EHA の油圧回路には主流路以外にも補助的な流路やバルブ類が存在する。これらはポンプの正常運転、整備性、安全性などを保証するために必須である。しかし高重量出力比を目指す設計においては、これらが大型化、重量化してはならない。

そこでキリ穴方式の薄型マニホールドを製作し、主流路だけでなく全ての補助的油圧要素および油圧センサを集約した。この薄型マニホールドを挟んでポンプとベーンモータが油圧回路的かつ機械的に締結される構成とし、EHA 全体の小型化に寄与した。無理なく機械加工できること、かつコンパクトであることを設計要件として流路レイアウトを検討し、厚さ 15 mm のアルミ合金製ブロック中で三次元的に交差する流路を実現した。

**2.4 油圧要素の一体化による可搬性向上** 軸方向に小型化した電動ポンプとベーンモータを同軸に組み合わせ、薄型の流路マニホールドを介して締結することで、EHA の要素を一体化させた。こうして可搬性を持たせることで、本アクチュエータはロボットへ搭載しやすい一体型 EHA モジュールとして提供される。

### 2.5 高効率化のための設計法

**2.5.1 フレームレスモータの出力特性** 本研究で採用したフレームレスモータ T-motor RI100 は比較的大トルク低速型のモータである。このような特性のモータを用いてポンプを低い回転数で駆動することは、駒形ら<sup>(14)</sup>の EHA の効率解析実験からもわかるように、ポンプにおけるクーロン摩擦損失および粘性摩擦損失を低減するため好ましい。たしかに、例えば maxon EC-4pole<sup>(12)</sup>のような比較的高速型のモータを採用しても、減速機によってポンプを低回転で用いることは可能<sup>(6)</sup>だが、本研究の手法には、フレームレスモータの出力特性により減速機を排除することで、2.3.1 項で述べたような利点がある。

**2.5.2 低損失ポンプの設計法** 図 4 (a) に示すのは駒形ら<sup>(7)</sup>の開発した外接歯車ポンプで、ケーシング

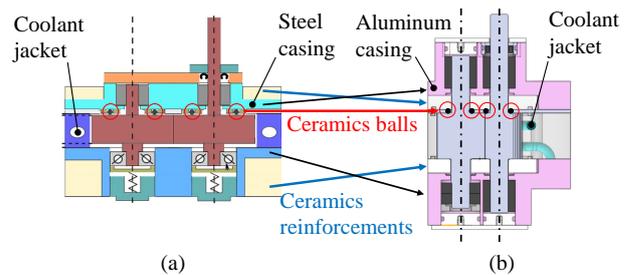


Fig. 4: (a) is the pump developed by Komagata, et al.<sup>(7)</sup>, and (b) is the proposed pump. In our pump (b), the ceramics reinforcements were redesigned to be in contact with oil in order to ensure high rigidity of the pump with smaller radial size.

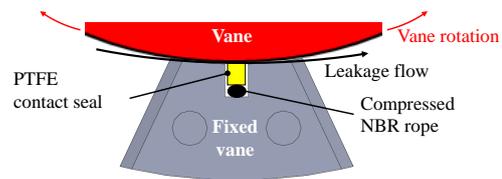


Fig. 5: PTFE contact seal for the gap between the vane and the fixed vane.

の内圧による膨張を抑えるセラミックス補強材と、ケーシングと歯車との間の軸方向隙間を精密に決めつつポンプを小型化するフレームレススラストベアリングを特徴とする。図 4 (b) の提案ポンプも同様の構造を持つが、セラミックス補強材の配置場所が異なる。セラミックス補強材の役割は、ケーシングが内圧により膨張しようとするのを高剛性材料によって抑え、歯車-ケーシング間の隙間増大による内部漏れ増大を低減することであるが、チャンバ部がラジアル方向に小さい提案ポンプでもケーシングの膨張抑制効果が得られるよう、セラミックス板が作動油に接してケーシングとなるよう配置交換した。<sup>5</sup>ことで、より直接的にチャンバ部の内圧による変形を抑え、内部漏れを低減する設計とした。

**2.5.3 低損失ベーンモータの設計手法** 固定ベーンと可動ベーンの間、そしてケーシングと可動ベーンの間における内部漏れへの対処方法として、テフロン製の接触シールを採用した。鈴木ら<sup>(6)</sup>は接触シールをスプリングで押し付ける方法により、半径方向隙間における漏れに対応した。我々が開発したベーンモータでは、半径方向だけでなく軸方向隙間での漏れも抑制するため、想定される全ての内部漏れ流が必ず接触シールを通過する配置とすることで、さらなる損

<sup>5</sup>図 4 (a) のポンプではセラミックス球が回転するケーシングは高硬度が必要となるため鉄鋼製だったのに対し、提案するポンプ (b) ではセラミックス製ケーシングとアルミ合金製軸受ハウジングという構成のため、副次的に軽量化も実現された。

失低減を目指した。図5に示す半径方向隙間のシールを使って動作原理を説明する。水色で示したテフロン接触シールと固定ベーンとの間にはNBR製の丸紐が入ってシール効果を発揮する。一方で押しつぶされたNBR製丸紐の弾性力によってテフロン接触シールは可動ベーンに押し付けられ、この部分もシールされる。以上から固定ベーンと可動ベーンとの間の内部漏れ流に対してテフロン接触シールが堰のように働き、損失低減に貢献する。

**2.5.4 水冷システム** ポンプのケーシングは、チャンバ部を取り囲むように三次元造形された冷却水路を備える。作動油の温度が上昇すると粘性が低下し、内部漏れ損失が増大する。その損失は熱となって、さらに作動油の温度を上昇させる。この悪循環を防ぎ、EHAを高効率に運転するために、ポンプにおける作動油の冷却は必須である。

さらにフレームレスモータの固定子を保持するケースにも、冷却水路を備えさせた。特にモータの定格入力を超えて電流を与える場合に、モータの発熱は大きくなり、モータ効率低下や作動油の温度上昇によるEHAの効率低下に繋がる。それらを防止するために、巻線を取り囲む冷却水路によりモータの冷却を図った。

### 3. バックドライバビリティの評価実験

**3.1 バックドライバビリティの重要性** EHAにおけるバックドライブ状態には、出力バックドライブ状態と全バックドライブ状態の2種類がある<sup>(15)</sup>。ベーンモータの出力トルクを $\tau_m$ 、角速度を $\dot{\theta}_m$ とし、ポンプの角速度を $\dot{\theta}_p$ とする。

**出力バックドライブ状態**  $\text{sgn}(\tau_m \cdot \dot{\theta}_m) < 0$

**全バックドライブ状態**  $\text{sgn}(\tau_m \cdot \dot{\theta}_p) < 0$

出力バックドライバビリティは、アクチュエータの出力側に外力が加わった際の出力側の動き出しやすさを決定する。例えば関節の出力バックドライバビリティが高いロボットマニピュレータは、運転停止中に作業者が誤って身体を接触させたとき、その力を受け流すようにリンクが動きやすいため、安全性が高い。

全バックドライバビリティは、出力側のベーンモータに加わったトルクが入力側のポンプを回転させる容易性である。これが高いほど、出力側に加わったトルクがEHAに与える負担が小さく、減速機としての故障可能性が低いといえる。

**3.2 評価実験の手法** 図6のような計測装置を用いて、出力バックドライブ状態および全バックドライブ状態をそれぞれ作るために必要な、出力側に与えるトルクを計測した。EHA本体は、定盤に固定され

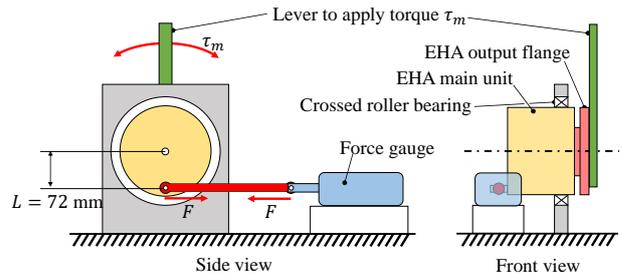


Fig. 6: Experimental setup to measure the level of backdrivability.

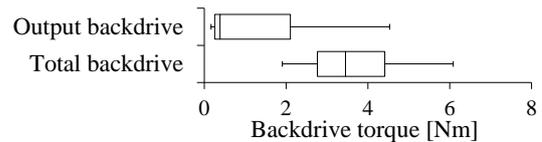


Fig. 7: Distributions of experimentally measured output backdrive torque and total backdrive torque. The maximum value of total backdrive torque is 6.0 Nm.

たクロスローラベアリングで保持され、フォースゲージを用いて回転しないよう拘束されているので、EHA出力側に加わったトルクをフォースゲージによって計測できる。EHA出力側に与えたトルクは、フォースゲージの計測値 $F$  [N]を用いて $\tau_m = FL$ と求められる。

出力バックドライバビリティの計測では、出力側にレバーを取り付け、与えるトルクを0から次第に大きくし、出力側がわずかに回転を始めるまでに与えたトルクの最大値を「出力バックドライブトルク」とした。全バックドライバビリティの計測では、同様の方法を取り、出力側だけでなく入力側（ポンプ）も回転を始めるまでに与えたトルクの最大値を「全バックドライブトルク」とした。

**3.3 実験結果** 図7の箱ひげ図で計測結果を示す<sup>6)</sup>。最小値、中央値、最大値を読み取ることができる。計測値のばらつきが大きいのは、ベーンモータのベーン加工時の歪みが原因で、ベーンモータの角度位置によって図5のテフロン接触シールの押しつけ力が大きく変化したことによる。以下では計測値の最大値（最悪値）を、開発したEHAのバックドライブトルクとする。出力バックドライブトルクは4.5 Nm以下、全バックドライブトルクは6.0 Nm以下であった。

表2で、EHAのバックドライバビリティの計測値をハーモニックドライブと比較評価する。比較対象として、提案するEHAと外径寸法および平均負荷トルクの許容最大値に近いCSF-32-50<sup>(16)</sup>を選んだ。ハーモ

<sup>6)</sup>EHAを実際に運転する際には、差圧による部品同士の接触、作動油の温度上昇による粘性低下等の影響を受け、バックドライバビリティが変化すると考えられる。

Table 2: Comparison of backdrive torque between our EHA and Harmonic Drive CSF-32-50. Our EHA realizes more than 2.7 times the backdrivability of Harmonic Drives.

	Our EHA	CSF-32-50
Outer diameter [mm]	114	110
Maximum permissible average load torque [Nm]	120	108
Backdrive torque [Nm]	$\leq 6.0$	16

ニックドライブのバックドライブバビリティはカタログ値の増速起動トルクで評価でき、これは EHA における全バックドライブトルクに相当する。バックドライブトルクは、ハーモニックドライブ CSF-32-50 の 16 Nm に対して、提案する EHA では 6.0 Nm 以下である。提案する EHA は、競合するハーモニックドライブと比較して、バックドライブバビリティが 2.7 倍以上高いことが示された。

#### 4. お わ り に

フレームレスモータの形状および出力特性を活かして構成要素を一体化した回転型 EHA モジュールを開発した。一般に、EHA は優れた力制御性、頑健さ、バックドライブバビリティを備えるが、バックドライブバビリティについて、開発した EHA が競合するハーモニックドライブの 2.7 倍以上の性能を持つことを実験で確認した。重量出力比についても、現段階での試算では、ハーモニックドライブによるアクチュエータモジュールに匹敵する値が得られている。以上より、提案する回転型 EHA モジュールの設計法によって、建設作業や農作業の自動化のためのロボットアクチュエータとして EHA を用いることがより容易になると期待される。

本研究は、東京大学と株式会社不二越との令和 2-5 年度共同研究「高パワー重量比を有するモジュール型電気静油圧アクチュエータの機構・制御・応用に関する研究開発」の支援を受けた。

#### 参 考 文 献

- (1) Harmonic Drive Systems. <https://www.hds.co.jp/> (visited on 2020/10/14)
- (2) P. M. Wensing, et al. Proprioceptive actuator design in the MIT Cheetah: Impact mitigation and high-bandwidth physical interaction for dynamic legged robots. *Ieee transactions on robotics*, Vol. 33, No. 3, pp. 509–522, 2017.
- (3) H. Asada. Development of a direct-drive robot and evaluation of its control performance. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 19, No. 1, pp. 77–84, 1983.
- (4) Y. Fujimoto, et al. Development of musculoskeletal biped robot driven by direct-drive actuators. In *2011 IEEE International Conference on Mechatronics*, pp. 821–826. IEEE, 2011.
- (5) H. Kaminaga, et al. Mechanism and control of whole-body electro-hydrostatic actuator driven humanoid robot Hydra. In *International Symposium on Experimental Robotics*, 2016.
- (6) 鈴木ら. ベーンモータとマニホールドからなる 3 軸手首構造体を含む 6 自由度電気静油圧駆動ロボットマニピュレータ. 第 24 回ロボティクスシンポジウム, p. 5C1, 2019.
- (7) M. Komagata, et al. Design and development of compact ceramics reinforced pump with low internal leakage for electro-hydrostatic actuated robots. In *IFTOMM World Congress on Mechanism and Machine Science*, pp. 2439–2448. Springer, 2019.
- (8) S. Rader, et al. Highly integrated sensor-actuator-controller units for modular robot design. In *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 1160–1166. IEEE, 2017.
- (9) A. Stentz, et al. CHIMP, the CMU highly intelligent mobile platform. *Journal of Field Robotics*, Vol. 32, No. 2, pp. 209–228, 2015.
- (10) K. Hashimoto, et al. WAREC-1 - A four-limbed robot having high locomotion ability with versatility in locomotion styles. In *2017 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR)*, pp. 172–178. IEEE, 2017.
- (11) T. Asfour, et al. ARMAR-6: A collaborative humanoid robot for industrial environments. In *2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 447–454. IEEE, 2018.
- (12) maxon. EC-4pole. <https://www.maxongroup.co.jp/maxon/view/content/ec-4pole-motors> (visited on 2020/10/14)
- (13) T-motor. RI100 KV95. <http://store-en.tmotor.com/goods.php?id=859> (visited on 2020/10/14)
- (14) 駒形ら. EHA 駆動モジュールを採用した 6 自由度マニピュレータとポンプ・モジュール系のエネルギー効率解析. 第 25 回ロボティクスシンポジウム, 2020.
- (15) H. Kaminaga, et al. Development of backdrivable hydraulic joint mechanism for knee joint of humanoid robots. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1577–1582. IEEE, 2009.
- (16) Harmonic Drive Systems. CSF series technical document. [https://hds-tech.jp/pdf/hd01\\_sougou\\_0101.pdf](https://hds-tech.jp/pdf/hd01_sougou_0101.pdf) (visited on 2020/10/14)