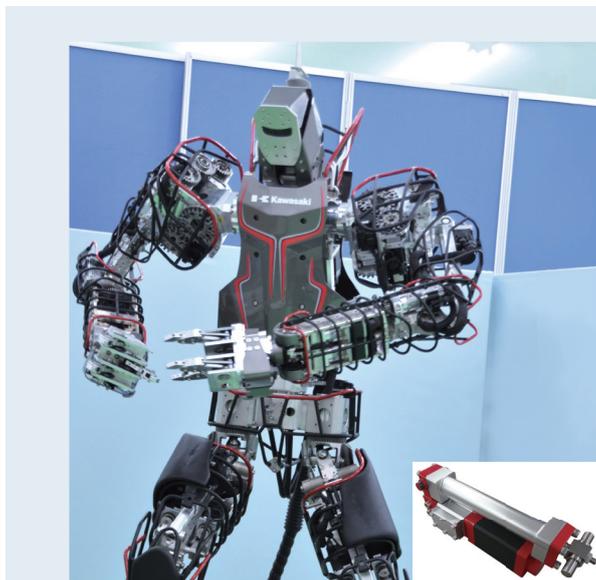


# ロボット向け電油アクチュエータの開発

## Development of Electro-hydraulic Actuators for Robots



田中	英紀 <sup>①</sup> *	Hideki Tanaka
依田	聡 <sup>②</sup>	Satoshi Yorita
尾形	麻里子 <sup>③</sup>	Mariko Ogata
吉村	勇 <sup>④</sup>	Isamu Yoshimura
服部	智秀 <sup>⑤</sup>	Tomohide Hattori
穴田	忠 <sup>⑥</sup>	Tadashi Anada
成田	慎治 <sup>⑦</sup>	Shinji Narita

日本で最初の産業用ロボット（川崎ユニメート）は油圧駆動であったが、1980年代後半より電動モータ駆動への置き換えが進んだ。しかし近年、災害現場などでの作業に期待が高まっているヒューマノイドロボットでは壊れにくさや力強さが求められており、油圧駆動が再評価されている。

当社にて開発中であるヒューマノイドロボット「Kaleido」においても、その脚部への適用を目的として、耐衝撃性・高出力密度という特長を有する電油アクチュエータ「Hydro Servo Muscle」の開発を行っている。

The first industrial robot in Japan (Kawasaki-Unimate) was hydraulically actuated, but since the late 1980s, electric motor actuation has been replacing hydraulic actuation. In recent years, however, humanoid robots, which are increasingly expected to be used mainly at disaster sites, need to be durable and powerful, and hydraulic actuation has been recognized once again.

Kawasaki is developing Hydro Servo Muscle, which is an electro-hydraulic actuator that is characterized by its high impact resistance and output density and is intended to be applied to the legs of Kaleido, which is a humanoid robot Kawasaki is developing.

### まえがき

近年、災害現場や極限環境において、人間に代わって人間用のツールを使いながらさまざまな作業を行う、等身大のヒューマノイドロボットに対する期待が高まっている。

### 1 背景

大出力で耐環境性を必要とする建設機械などには油圧駆動技術が、高速高精度な動きを必要とするロボット分野では電動モータ駆動技術が活用されてきた。しかし近年、ヒューマノイドロボットなど過酷な環境下で力強い動きが必要なロボットに対しては、油圧駆動を適用する動向がある<sup>1)</sup>。

### 2 ヒューマノイドロボット

このような背景の中、当社においてもヒューマノイドロボットの開発を進めている<sup>2)</sup>。現時点のヒューマノイドロボットは全長1.75m、重量84kgであり、脚部や腕部を含む合計32自由度の関節はすべて電動アクチュエータで駆動している。人と同じサイズを実現するためには、各部の小型

軽量化を追求するとともに、他部位との干渉を避けるために人の形状から逸脱する突起物などを無くす必要がある。また、起き上がり時には低速で高推力が、歩行時には低推力で高速動作が必要となる。

このため、アクチュエータには、小型軽量・高速低推力と低速高推力の両立・高信頼性・耐衝撃性が必要となる。

### 3 アクチュエータ概要

#### (1) 開発コンセプト

特に高速と高推力の両立が必要とされる図1に示す脚部に適用することを目的として、アクチュエータの開発を行うこととした。作業中の不意の衝撃などにより、電動アクチュエータは減速機構にダメージを受けるリスクがあるが、耐衝撃性のある油圧アクチュエータでは、油の圧縮性や高応答な圧力リリーフ機構によってダメージを回避する効果をヒューマノイドロボットに付加することができる。

#### (2) 機器構成および仕様

電油アクチュエータの機器構成と油圧回路を図2に、仕様を表1にそれぞれ示す。サーボモータ・油圧ポンプ・バ

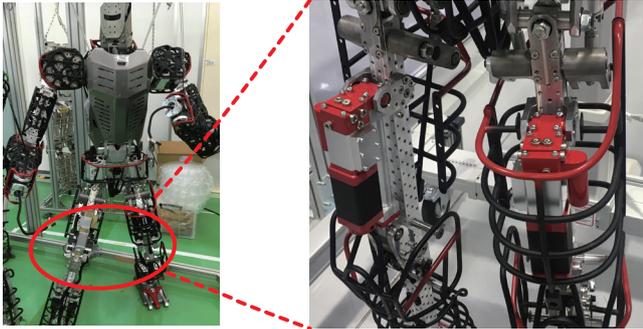


図1 ヒューマノイドロボット「Kaleido」の脚部への適用イメージ  
Fig. 1 Applying this technology to the legs of humanoid robot Kaleido

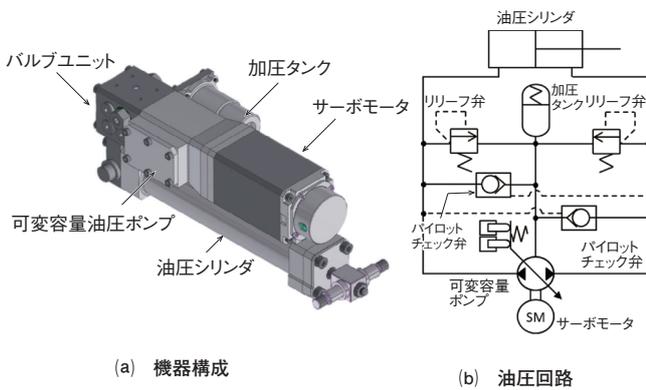


図2 電油アクチュエータ  
Fig. 2 Configuration of electro-hydraulic actuator

表1 電油アクチュエータの仕様  
Table 1 Specifications of electro-hydraulic actuator

最大推力 [N]	6,000
最大速度 [mm/s]	200
ヘッド径 [mm]	22
ロッド径 [mm]	8
ストローク [mm]	156
耐衝撃機能	あり

バルブユニット・油圧シリンダを一体構造とし、油圧機器間において配管を持たないコンパクトな構造とすることとした。また、サーボモータの回転に応じてシリンダに油を送出するクローズ回路構成としている。

本アクチュエータは他の電動アクチュエータと同様にロボットコントローラにて駆動することが可能である。脚部の関節角度を別途エンコーダで検出して、所望の角度を実現するシリンダ位置となるようサーボモータを制御する。

#### 4 開発内容

耐衝撃性に加えて、アクチュエータの小型軽量化・高速低推力と低速高推力の両立・高信頼性化を達成するための開発を行った。

#### (1) 小型軽量化

##### (i) 小型バルブユニットの開発

バルブユニットを最小化するため、要求機能の実現に最低限必要なバルブ数として、専用バルブおよび油通路を含めたマニホールドを新規開発した。図3に示すバルブユニットを構成する各バルブには以下の開発が必要となる。

##### ① リリーフ弁

アクチュエータが受けた過大な外力を油圧で即時かつ正確に逃がすため、高い応答性を実現するとともに流量の増加に伴ってリリーフ圧力が上がるオーバーライド特性を低減する。

##### ② パイロットチェック弁

アクチュエータ後退時にシリンダ面積差によるヘッド側流量の余剰分を加圧タンクへ戻すため、低いポンプ吐出圧力で開弁する。また、アクチュエータ前進時にタンクから油を円滑に流入させるため、圧力損失を最小化する。

上記機能と性能を満足する小型カートリッジ型バルブを開発した。マニホールド内の油通路本数を最小化し、また油通路周囲の肉厚が必要最小となるようにバルブを配置することで、マニホールド外形はサーボモータ外形である40mm角以下のサイズを実現した。さらに、油通路は圧力損失が最小となるよう内径・長さ・交差形状を設計した。

##### (ii) バルブユニット・ヘッドカバー・タンクの一体化

一般的な油圧アクチュエータは、バルブ・シリンダ・ポンプ・タンクなどの各ブロックを連結して構成される。これらのブロックを一体化することで、各ブロックの接合面に設けていたシールを省略したり油通路配置の自由度を高めたりでき、さらなる小型化を見込める。

そこで、以下の2点を考慮しながら、バルブユニット・シリンダのヘッドカバー・ポンプのバルブカバー・タンク接続ブロックの4部品を図4に示すように一体化した。

##### ① 各部品間の油通路の最適化

各部品をバルブ油室と直線的につなぐことで、油通路の無駄を無くした。

##### ② タンク容積の見直し

一般産業機械の基準に従うと過大なタンク容積となるの

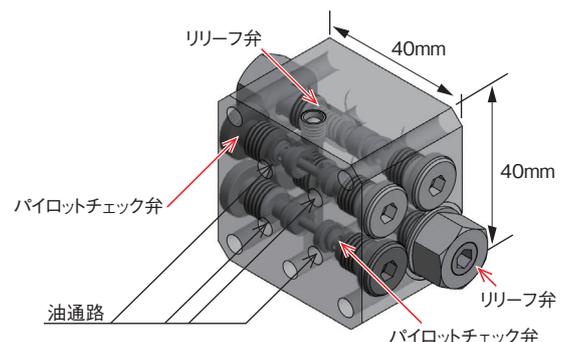


図3 バルブユニット  
Fig. 3 Valve unit

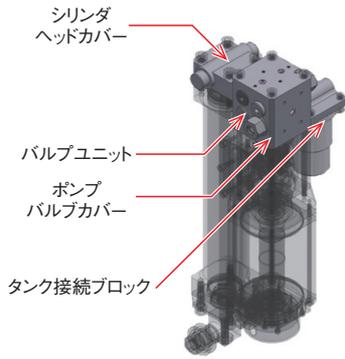


図4 各部品一体化  
Fig. 4 Integration of components

で、ロボットへの適用を考慮し最低必要容積の4.2倍ではなく1.1倍とした。

これらの取組みにより、アクチュエータ取付部とポンプ取付部との間の寸法を大幅に低減することができた。

(iii) 油圧ポンプとサーボモータの一体化

当初は、油圧ポンプとそれを駆動するサーボモータを同一軸上にレイアウトして、軸同士をスプラインによって結合していた。ただし、ベルトや歯車を使用することによる大型化や駆動伝達ロスを防ぐ一方で、結合部の強度が不足するという問題があった。これを解決するため、図5に示すようにポンプとモータの駆動軸を一体化した構造とした。そのため、ポンプとモータを接続するフランジ形状・オイルシール・軸受などを最適化している。

また、ポンプとモータそれぞれに使用する軸受について、中間に位置する軸受を共用とすることで部品点数削減とさらなる小型化を実現した。さらに、軸に応力が発生するのを避けるため、ポンプ軸端側の軸受に滑り軸受を採用した。

(2) 高速低推力と低速高推力の両立

ヒューマノイドロボットに求められる高推力と高速度を両立するため、油圧ポンプは可変容量型である必要がある。建設機械および産業機械向けで培った斜板式ピストンポンプ

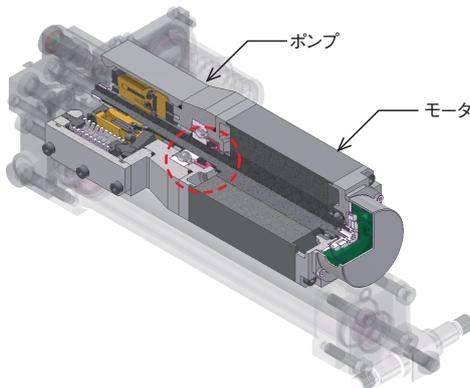


図5 軸の一体化  
Fig. 5 Integration of shaft

の技術を基に、押しのけ容積 $0.75\text{cm}^3$ および $1.5\text{cm}^3$ の図6に示す可変容量型斜板式ピストンポンプを開発した。

アクチュエータの負荷圧力に応じてポンプ容量を最適に制御することで、サーボモータを過負荷状態にさせることなく、アクチュエータに高圧の作動油を供給できる。また、ピストンに生じる油圧力と斜板角を保持するスプリング荷重を最適にバランスさせることで、負荷圧力に応じて無段階にポンプ容量を制御する機構を採用している。これにより、サーボモータからの出力を無駄なく油圧エネルギーに変換できるだけでなく、斜板駆動機構を簡略化して電磁切換弁を省略できたことで小型軽量化にも貢献している。

電磁切換弁による容量2段階切換方式である従来方式では、サーボモータを過負荷状態にさせずに連続使用する場合、圧力が上昇した際に容量を大から小に切り換える必要があり、このとき動力の一部が無駄となっていた。今回開発したポンプでは、圧力の上昇に対して容量を無段階に変化させて制御することで、サーボモータの動力を無駄なく油圧エネルギーに変換でき、より小さい動力で全圧力域にわたり高速/高推力を実現することができている。

(3) 高信頼性化

(i) 油圧シリンダの振動抑制制御

本アクチュエータのサーボ制御システムにおける、位置制御のブロック図を図7に示す。エンコーダを用いて位置実績をフィードバックして、位置指令との偏差を基にモータに速度指令を与えている。高負荷や高速度時における追従性を損なわないように位置比例ゲインを調整しているため、逆に低負荷や低速時には大きい値となり、持続

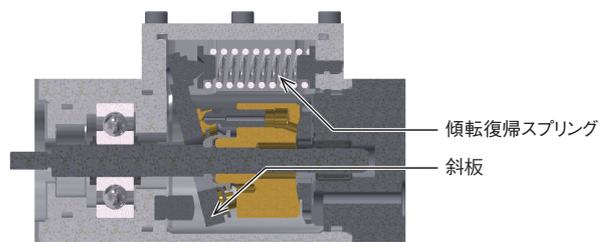


図6 可変容量型斜板式ピストンポンプ  
Fig. 6 Swash plate type variable displacement axial piston pump

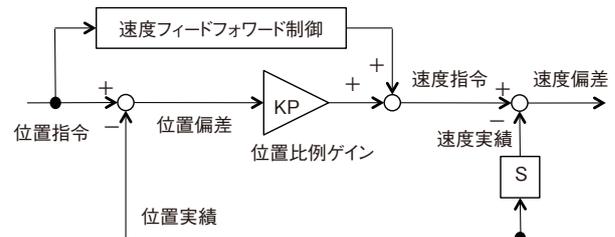


図7 位置制御ブロック図  
Fig. 7 Block diagram of position control

振動やハンチングが発生してしまう。これはサーボモータが動作してから、油が吐出されて油圧シリンダが動作するまでに遅れがあることに起因している。

この対策として、低負荷あるいは低速度時であることをモータ電流とモータ速度から判断して、位置比例ゲインおよび速度フィードフォワード制御におけるゲインを適切に変化させる機能を開発した。低負荷／低速度時における、本制御適用前後の油圧シリンダ速度波形を図8に示す。このように、持続振動を大幅に低減できている。

(ii) シリンダ軸受の見直し

シリンダ軸受のロッド部とピストン部の見直しを行った。ロッド部は黄銅製ブッシュ・シール部品・ダスト侵入防止用パッキンを組み合わせた構造としていたが、ロッドの軸方向に外部から衝撃荷重が作用した場合に作動油が漏れるリスクがあった。また、黄銅製ブッシュの摩擦抵抗が大きいという課題もあった。そこで、図9に示すように耐圧性能を高めた専用ロッドシールを採用し、ブッシュ材質をPTFEに変更することで上記のリスクと課題を解決した。

また、ピストン部はピストン支持とシールの両方を2つのピストンシールが担う構造としていた。しかし、動作条件によっては2つのシール間に作動油が侵入して圧こもり

が生じ、シール性能が低下するリスクが生じる。これを解決するため、図10に示すようにPTFE製の軸受とピストンシール1つを並べて配置する構造とした。

あ と が き

電油アクチュエータのヒューマノイドロボットへの搭載は、当社が持つ油圧技術とロボット技術のシナジー実現に向けた挑戦である。本アクチュエータはロボットのみならず自律移動体や生産ラインおよび産業機械用途などでも活用可能な製品である。PRの一環として、IFPEX2017、IREX2017などに参考出展するとともに、「Hydro Servo Muscle」の名称で商標登録している。

油圧技術は成熟しているとの意見もあるが、小型軽量化および取扱いの容易さを追求することで、油圧技術と電動技術が併用可能なシステムを実現して、新たな「コト」の創造に寄与していく。

参 考 文 献

- 1) 田中 豊, “油圧駆動ロボットに役立つ油圧要素技術”, 日本フルードパワーシステム学会誌, Vol.50, No.2, pp.65-68 (2019)
- 2) 垣内, 掃部, 下村, 柚木崎, 野沢, 岡田, 稲葉, “転倒起立動作を可能とする耐荷重点点を備えた等身大人間型ロボットプラットフォームRHP2の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.36, No.10, pp.703-712 (2018)

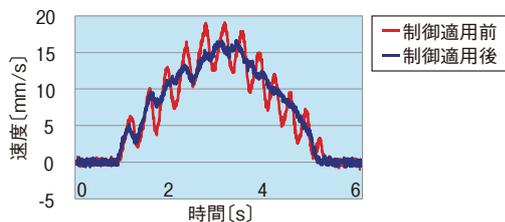


図8 振動抑制制御の効果  
Fig.8 Effect of vibration suppression

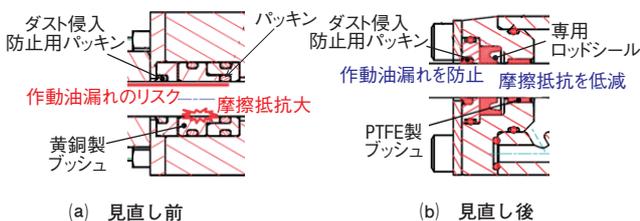


図9 シリンダ軸受のロッド部の見直し  
Fig.9 Modification of cylinder bearing rod

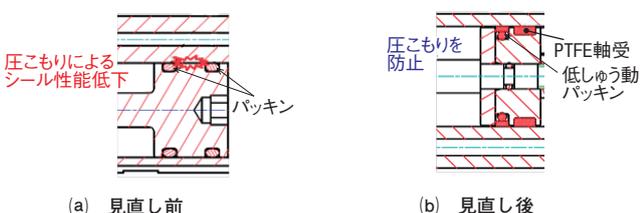


図10 シリンダ軸受のピストン部の見直し  
Fig.10 Modification of cylinder bearing piston



田中英紀



依田 聡



尾形 麻里子



吉村 勇



服部 智秀



穴田 忠



成田 慎治