

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 11 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760219

研究課題名(和文)二関節筋と並列弾性要素を有する大出力油圧脚機構の研究

研究課題名(英文)Development of High Power Hydraulic Legged Mechanism with Bi-Articular Actuator and Parallel Elastic Component

研究代表者

神永 拓(Kaminaga, Hiroshi)

東京大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号：90571571

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：二脚ロボットを実用化する上での最も大きな本質的課題のひとつである駆動系の問題を解決するために、高パワー密度、バックドライバビリティ、エネルギー蓄積能力、制御性の向上を実現する駆動形を脚構造に適用する設計論を展開した。弾性を有する電気静油圧アクチュエータ(EHA)を並列に配置するEHA-PEを提案し、この概念に則って大出力EHA、エネルギー蓄積アキュムレータを開発。二関節筋脚構造の最適設計を行ったほか、バックドライバビリティの力感受性に与える影響を調査し力制御則を提案した。開発した駆動系は、最大推力1.5kN、制御帯域2.5Hzを発揮し、実用的大出力二脚ロボットを構成するための知見を得た。

研究成果の概要(英文)：The objective of the research is to solve issues of actuators that are the burdens of biped robots to become practical. The main issues are durability, power density, backdrivability, energy storage, and controllability. We proposed the use of redundant Electro-Hydrostatic Actuator (EHA) with elastic components, which we named EHA-PE, based on the fact that the EHA has high backdrivability and impact resistance. We designed high power EHA, elastic differential accumulator for energy storage, and link mechanism. We then studied the optimal design method for legged mechanism with EHA-PE. We developed force controller utilizing properties of EHA. We developed evaluation equipment to measure dynamic property of an actuator output. We confirmed the maximum force of the developed EHA to be 1.5kN and control bandwidth to be 2.5Hz with actuator weight of 1.1kg. From the results above, we developed key technology to construct high power force sensitive biped robots for practical use.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学(知能機械学・機械システム)

キーワード：ロボットアクチュエータ 力制御 バックドライバビリティ 電気静油圧アクチュエータ 二関節筋 エネルギー蓄積

1. 研究開始当初の背景

(1) 二足歩行ロボットは極めて高い移動能力が期待できる一方で、制御の難しさやアクチュエータに求められる能力が高いことから実用に至っていない。このような状況の中で米ボストン・ダイナミクス社は PETMAN という二脚ロボットを開発し、きわめて外乱に強い歩行を実現した。この成功の裏にはアクチュエータのパワーや強度がある。ところが、よりロバストな駆動系を実現するためにはアクチュエータの力感受性も避けて通ることができない。

(2) 近年人の筋配置に着想し、多関節筋を利用しようとする研究が行われており、多関節筋を利用することでアクチュエータの負担を分散し、運動特性を制御なしに改善する効果が期待されている。力感受性という面ではドイツ航空宇宙センター(DLR)において全軸にトルクセンサを搭載した二脚ロボットが開発され、インピーダンス制御を利用した歩行能力向上の効果が期待されている。このように、身体特性の改変は、機構的な問題を解決するばかりでなく、機構的な安定化による制御の簡素化や、それを通して知能の問題にも影響することが示唆されている。

(3) 従来のアクチュエータで多関節筋の脚構造を実現することは難しく、空気圧駆動ロボット以外にあまり例を見ないが、空気圧駆動ロボットは位置の制御性に乏しい、圧縮空気の外部供給が必要などの問題をかかえ、実用化には遠い。

(4) ロボットの駆動系設計という視点からはバックドライバビリティ(アクチュエータの出力側を外力により駆動できる能力)が注目されている。ロボットでは歯車減速機やサーボ弁型油圧駆動が用いられることが多いが、いずれの場合も伝達経路の摩擦が大きく、バックドライバビリティが損なわれる。

(5) Pratt らは弾性要素を駆動系出力部に配置することで従来型の駆動形を用いつつ出力部のバックドライバビリティを改善する駆動機構「SEA(Series Elastic Actuator)」を開発した。SEA は弾性体にエネルギーを蓄積することでエネルギーの再利用や衝撃力の発生などが可能になる一方で共振を抑制することが難しく、多軸ロボットにおいては運動能力を低下させずに用いることが難しかった。SEA の共振特性を制御する試みとして可変剛性アクチュエータが研究されているが、より多くのアクチュエータを必要とし、その制御手法にも課題が多い。

2. 研究の目的

申請者はこれまでの研究で、バックドライバビリティの本質を解析し動力伝達の摩擦を低減することで優れたバックドライバビリティを実現する電気静油圧アクチュエータ(EHA: Electro-Hydrostatic Actuator)を開発してきた。この研究では高い制御性能を実現でき、本質的に力に敏感な機構・制御を実現

できてきた。

一方、エネルギーを蓄積するには回生電力を用いることになり流体の粘性抵抗もあって大きな衝撃力を発生するのは難しいという課題があった。

本研究ではロボットにおける駆動系のエネルギー密度、パワー密度、バックドライバビリティを解決するロボット設計法を論じることを目的とし、バックドライバブル EHA の力制御技術に基づいた構成論を開発する。背後には、バックドライバブルな EHA を用いることで弾性要素を並列に配置することができ、振動抑制とエネルギー蓄積を両立できることを期待している。さらに、多関節筋を冗長アクチュエータとして用いることで、運動に対して最適な筋配置が可能になることが期待できる。そこで、

(1) 多関節筋を用いた駆動系のキネマティクスの改善および関節駆動能力の増大

(2) EHA アクチュエータの力感受性と弾性体のエネルギー貯蓄性能を生かしたアクチュエータの開発

を基本テーマとし付随する技術を開発することを目的とした。

また、本研究においては脚・アクチュエータ系の設計、開発に留まらず、バックドライバブルな多関節筋の制御に与える効果の検証や、弾性並列駆動のエネルギー蓄積効果や衝撃力発生に関する制御論を展開し、有効性を、実験的に検証する。

3. 研究の方法

本研究では、多関節筋を用いた駆動系のキネマティクスの改善および関節駆動能力の増大および EHA アクチュエータの力感受性と弾性体のエネルギー貯蓄性能を生かしたアクチュエータの開発を基本のテーマとする。

そのために以下の具体的な内容を設定した。

(1) EHA を用いて多関節筋を実現する設計法

(2) 多関節筋を用いた脚機構の最適設計

(3) エネルギー蓄積型 EHA の設計・評価

さらに、ロボットの力感受性を高め、エネルギー蓄積型 EHA の並列接続時の性能を最大化するために

(4) EHA のバックドライバビリティを高めるポンプの設計法

を設定した。過去の研究の EHA では、その容積効率の低さから、大出力を EHA で得ることは容易でなかった。そこで、

(5) 容積効率を高め、高出力を実現する直動型 EHA の開発を行った。

また EHA を力制御するために

(6) EHA のダイナミクスを考慮した力制御アルゴリズムの研究

を行った。このような力感受性を高めたアクチュエータを設計するうえで、力感受性にアクチュエータの性能がどのように影響を与えるかを知ることが重要である。そこで、力感受性を実現する上で

(7) バックドライバビリティと力計測能力が力制御性能に与える影響の研究を行うとともに、
 (8) 力に敏感なアクチュエータの運動性能評価方法の開発を行った。また、総合する技術として
 (9) 脚機構の設計を行った。これらの9つの具体的なテーマを研究することで本研究の目的を実現することとした。

4. 研究成果

以下、各テーマについて成果を示す。
 (1) 通常 EHA は1個のポンプに対して1個の油圧モータもしくはシリンダを接続し、ポンプの回転により油圧モータを制御する。本研究では、EHA が圧力による動力伝達を行っていることを利用し、油圧モータを並列に接続することで EHA を推力分配装置として用いる方法を考案した。この方法では並列に接続する油圧モータの断面積を設計することで任意の推力分配率を設定できる。二関節筋は機械的に実現するには図1に示す構造を用いることが多い。これに対して、本研究で提案する構造は図2に示すものである。この構造を採用することでオーバーハングにより支持される質量が減少し、機構的な剛性を高めることも可能になるほか、筋構造による特異点を回避することも容易になる。さらに、各関節に用いるアクチュエータの方式を変えることができ、可動域に応じて直動・回転を組み合わせたことが可能になり設計の自由度が大きく広がった。これにより、二関節筋を用いる上での設計上の課題のひとつが解決された。

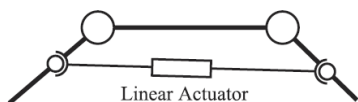


図1：通常二関節筋実現法

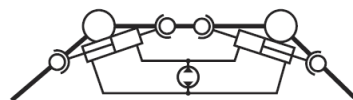


図2：提案する二関節筋構造

(2) EHA を用いた多関節筋を用いた脚機構の最適設計を行うために図3、図4に示す基本構造を考案した。足首は3自由度の平行リンク駆動とし、膝はベーンモータにより駆動するものとする。二関節筋は膝と足首にわたりトルクを発生する構造を想定し、膝は回転型アクチュエータ、足首には直動型アクチュエータを用いた二関節筋とする。最適化の評価関数としては次式を用い、評価関数の最小化を行った。

$$f(\phi) = \sum_{k=1}^{N_F} \sum_{i=1}^{N_a} \{w_i^2 + \alpha q_i^2 + \beta g_i + \gamma \sum_{(i,j)} (w_i - w_j)^2\}$$

右辺第一項は各アクチュエータの発揮する瞬時パワーであり、第二項は粘性ロスを最小化するための項である。第三項はモータの速度・トルク特性を考慮するためのペナルティ項である。第四項はアクチュエータ間での発揮パワーのばらつきを最小化することでアクチュエータの共通化を行うための項である。最適化パラメータには各アクチュエータの配置と断面積が含まれる。

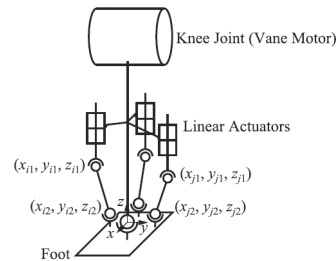


図3：足首・膝駆動系構造

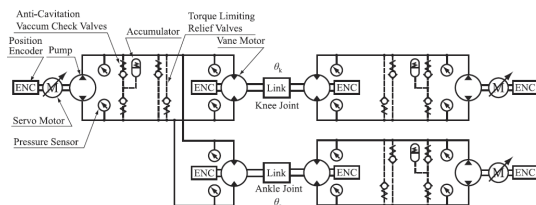


図4：単関節・二関節筋による関節駆動の油圧駆動回路（実際には足首関節はパラレルリンクとなっており、単関節筋と二関節筋の駆動関節は1対1に対応しない）

この評価関数は二関節筋間の力の分配を陽に扱っていないが、これは最適化の次元が大きくなることを防ぐためであり、そのために図4に示す逐次最適化問題によりトルク分配を扱うこととした。

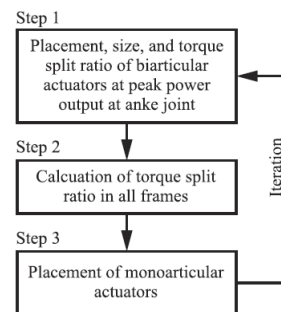


図5：逐次最適化の流れ

最適化は、多用する動作の中でも速度に対する要求が厳しい歩行を対象とした。最適化した後のポンプ駆動パターンを図5に示す。実線はポンプの連続最大運転領域である。シリアルリンクの単関節筋アクチュエータのみで運動を実現するためには最大のアクチュエータで400W以上の瞬時パワーが必要だったのに対して、提案した構造により最大の瞬時パワーが283Wに低下したほか、二関節筋アクチュエータが90W弱の負荷を負担すればよいことがわかった。さらに、得られた知見として、足裏を床面に接地させる歩行に関しては、最適化により得られた二関節筋の

力発揮方向が人と逆になることである。すなわち、人では該当する二関節筋は腓腹筋であるが、足首の底屈と膝の屈曲を司る。これにたいして、最適化により得られる筋配置は足首の底屈と膝の伸展を行う方向になる。これは生物の進化過程では人の筋配置が元来はつま先歩行をしていたことに由来する可能性を示唆している。

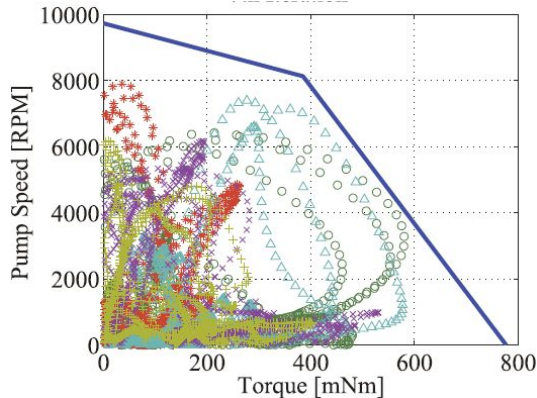


図 6：最適化後の各 EHA ポンプ駆動パターン

(3) エネルギー蓄積を行うには、弾性要素を駆動系に組み込む必要がある。本研究では弾性要素を図 7 に示すように油圧回路内に取り込む構造とした。こうすることで、弾性体と出力軸の間に減速比を設定することができ、弾性体の設計自由度が高まる。

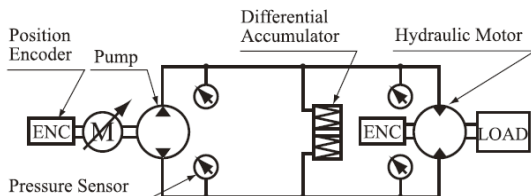


図 7：エネルギー蓄積型 EHA の構造

図 8 に示す構造の差動アクムレータを開発した。ピストンの変位は油圧回路内に含浸したリニアエンコーダにより行い、蓄積エネルギーを測定できるようにした。

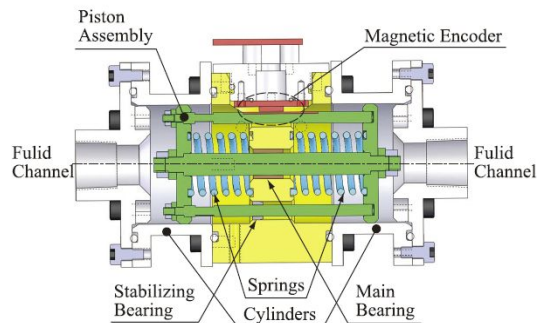


図 8：差動アクムレータの構造

アクムレータを用いてリンクに加えられたエネルギーをどの程度蓄積・回収できるかを評価した。実験はリンクに角度変位を与えた後、開放することで、リンクがどの程度もとの位置に復元するかで評価できる。実験結果の一例を図 9 に示す。このグラフには 3 回の試行の結果が示されている。結果、運動の時定数にもよるが 70% 程度のエネルギーが回収可

能であることがわかった。

一方、課題としてわかったことは、EHA に用いたポンプはバックドライバブルであったため、アクムレータに大きなエネルギーを蓄えようとしてもポンプが逆駆動されてしまうことがわかった。すなわち、このような構成でエネルギー蓄積を行うには

ポンプの断面積

<<作動アクムレータの断面積

<油圧モータの断面積

と設計することが望ましいことが知見として得られた。

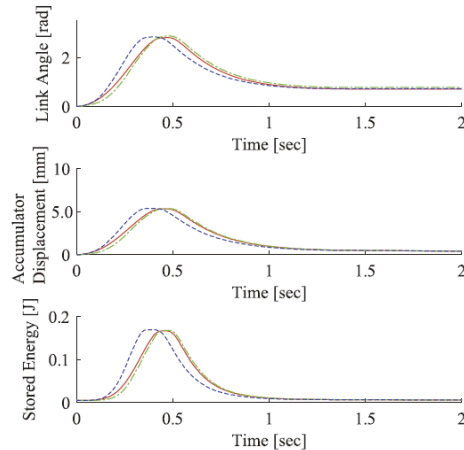


図 9：差動アクムレータを用いた EHA のエネルギー蓄積・開放実験

(4) 差動アクムレータは、振動抑制の観点から二関節筋アクチュエータに配置することが望ましい。図 4 に示す構造を採る場合、エネルギーを有効に蓄積・開放するには単関節筋アクチュエータには高いバックドライバビリティが求められる。アクチュエータを駆動するポンプにターボポンプを用いると容積型ポンプに対し固体接触を最小化でき、バックドライバビリティを高めることが期待できる。ところが、遠心ポンプなど、流体の運動量を用いるポンプは本質的に逆駆動特性を持たないため、粘性スクリーブポンプを用いた。粘性スクリーブポンプは図 11 に示す構造を持ち、ネジ溝にと流体間に働くせん断応力を用いてネジの両端に差圧を発生するものである。

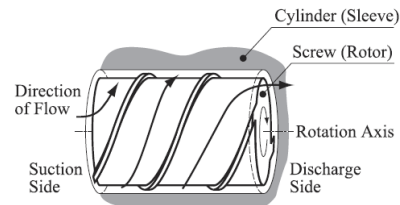


図 11：粘性スクリーブポンプの原理

図 12 に示すスクリーブポンプを開発し、バックドライバビリティを評価したところ、出力軸に外力を加え、ポンプが逆駆動を開始するのに必要なトルクがトロコイドポンプに比べ 30% 程度に低下し、高いバックドライバビリティが得られることがわかった。また、

脈動がトロコイドポンプに比べ 70%に減少し、安定した圧力を実現できることもわかった。一方で、高いパワーを得ることが難しく、高効率な溝形状の考案が必要であることがわかった。

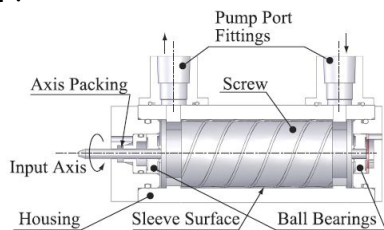


図 1 2 : スクリューポンプの断面図

(5) EHA の内部漏れはバックドライバビリティを高める効果があるが、効率や発揮パワーを低下させる原因となる。現在の EHA 構成法ではポンプは高速に回転するため、ポンプの内部漏れは摩擦低減の見地からも許容することが望ましい。回転型のベーンモータは可動部が矩形をしており、低摩擦にコンタクトシールを用いて内部漏れを抑制することが難しかった。これに対して直動型のアクチュエータでは断面を円形にすることができ、低摩擦オイルシールを用いることができる。開発したシリンダを図 1 3 に示す。

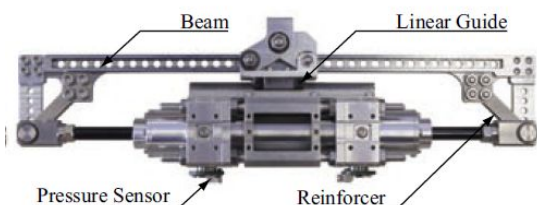


図 1 3 : 低摩擦シリンダ

ピストンの支持は高精度かつ低摩擦が実現できるボールプッシュを用い、ピストンでのウェアリングによるすべり支持を避けた。ピストンロッドの細径化は摩擦特性に大きな影響があるため、細径のピストンロッドを使用可能にするため、モーメント加重はシリンダと並行に取り付けたリニアガイドで支持し、推力ははりを介してピストンロッドに伝達する構造を考案した。

低摩擦化の結果として、最大推力に対するバックドライバビリティが 25%改善し、コンタクトシールを使用しつつバックドライバビリティを犠牲にしていなかったことがわかった。また、200W モータとこれまでに開発したトロコイドポンプを用いた結果シリンダ重量 444g に対して最大推力 1500N、最大速度 0.27m/s、負荷質量 30kg 時の位置の制御帯域 2.5Hz の高出力・高応答特性を得、極めて高いパワーウエイトレシオを実現した。制御帯域の評価には後述の評価装置を用いた。

(6) 過去の研究で、EHA のダイナミクスが速度項で結合された 2 本の運動方程式で記述できることを示してきた。この関係式を陽に

$$\dot{\theta}_1^d = \frac{k_{22}}{k_{21}} \dot{\theta}_2 - \frac{1}{k_{21}} C(s) (p_2^d - p_2)$$

用いることで、ポンプモータのトルク制御を行わずにシリンダの推力もしくは油圧モータのトルク制御ができる制御則を考案した。具体的にはある安定化制御器 $C(s)$ を用いて次式の計算式で与えられるポンプ速度をポンプモータの速度制御で実現すれば所望の推力 p_2^d を実現できる。

この制御を行った結果外乱存在下での力追従性能が 93% 改善した。この制御則は力制御を安定に、簡単に行う方法として期待できる。

(7) アクチュエータの力感受性は力計測能力とバックドライバビリティの影響を受ける。前者は主に能動的性能を決定し、後者は受動的性能を決定する。通常力に敏感な駆動を行う際には力制御を行うので、両者の影響を受けているが、その寄与を定量的に評価する方法に欠けていた。本研究ではバックドライバブルな EHA にトルクセンサを取り付け、圧力センサ、トルクセンサを用いた場合の力応答の比較を行うと同時に、ハーモニックドライブとの比較も行った。その結果、EHA の摩擦トルクがハーモニックに比べ 36%少ないこと、トルクセンサを用いることでさらに摩擦トルクを 1.2%まで減少できることなどがわかった。また、力の安定性から、EHA では力フィードバックゲインをハーモニックの 2 倍以上に上げられることや、官能的評価として、EHA ではハーモニックに比べコギングの少ない滑らかな感触を得られることがわかり、環境との安定したインタラクションが可能になることが示された。

(8) 力に敏感であることはすなわち外力の影響を受けることに他ならない。外力の影響下でのアクチュエータの振る舞いを再現性良く評価することは難しい。特に他のアクチュエータを用いて外力を与えると、そのアクチュエータの性能も評価結果に混入してしまう。本研究では再現性が高い質量に計測再現性の高い加速度を印加することで反力を得、これを外力として用いる方法を考案し、図 1 4 に示す装置を直動アクチュエータ用に開発した。加速度から反力を計算できるだけでなく、フォースゲージを用いて直接反力を測定できるようにした。

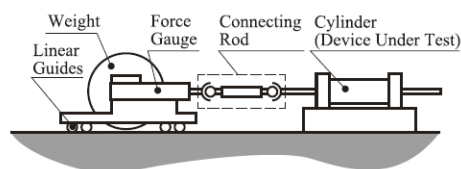


図 1 4 : 質量を負荷とする動特性評価装置
この装置を用いて直動型 EHA を評価した(前述)。

(9) 開発したアクチュエータを用いた脚のモデルを設計した。足首 3 自由度で膝が 1 自由度である。設計の計算には前述の項目(2)の結果を用いた。設計から、提案する手法を

用いて高出力で力に敏感な脚メカニズムが実現可能であることを示し、脚ロボットの実用性を高める設計法を提案した。

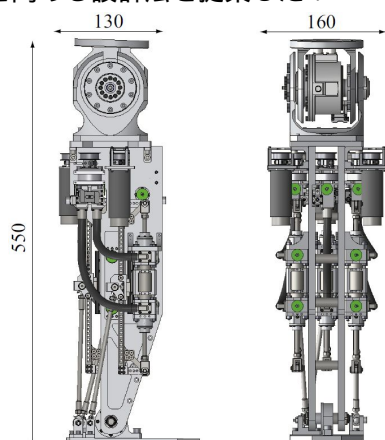


図 15：設計した脚機構

本研究を通して力に敏感な機構を、EHA を用いて実現する方法、EHA にエネルギー蓄積を実装する方法、多関節筋アクチュエータを含むパラレル・シリアルメカニズムを最適設計する方法、力に敏感な駆動系を評価する方法に関する工学的知見を得たのと同時に、多関節筋の最適配置と生物的進化の違いの示唆といった科学的知見を得た。

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 1 件)

中村仁彦, 神永拓: “高バックドライブビリティを実現する油圧駆動システム”, 日本ロボット学会誌, 査読有, 第 31 巻, 6 号, 2013.

〔学会発表〕(計 19 件)

H. Kaminaga, K. Odanaka, Y. Ando, S. Otsuki, and Y. Nakamura, "Evaluations on Contribution of Backdrivability and Force Measurement Performance on Force Sensitivity of Actuators," Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4472-4477, Tokyo, Japan, November 3-7, 2013. (査読有)

H. Kaminaga, S. Otsuki, and Y. Nakamura, "Design of an Ankle-Knee Joint System of a Humanoid Robot with a Linear Electro-Hydrostatic Actuator Driven Parallel Ankle Mechanism and Redundant Biarticular Actuators," Proceedings of International Conference on Humanoid Robots, pp. 384-389, Atlanta, U.S.A., October 15-17, 2013. (査読有)

H. Kaminaga, H. Tanaka, K. Yasuda,

and Y. Nakamura, "Viscous Pump for Highly Backdrivable Electro-Hydrostatic Actuator," Proceedings of International Conference of Robotics and Automation, pp. 3751-3756, St. Paul, USA., May 14-18, 2012. (査読有)

神永拓, 康天毅, 中村仁彦: “モータの速度制御を用いた電気静油圧アクチュエータの力制御”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-I04, 富山総合体育館, 5月26日 - 5月28日, 2014.

神永拓, 安藤雄太, 大月智史, 小田中浩平, 中村仁彦, “出力軸トルクセンサを用いたバックドライブ静油圧アクチュエータの力感応制御”, ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 28-34, かみのやま温泉, 3月14日 - 15日, 2013. (査読有)

神永拓, 安藤雄太, 田中宏和, 中村仁彦: “エネルギー蓄積のための差動アクキュレータを備えた電気静油圧アクチュエータ”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A1-E11, アクティシティ浜松, 5月27日 - 29日, 2012.

大月智史, 神永拓, 中村仁彦: “足首関節機構のための直動型電気静油圧アクチュエータの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-I06, 富山総合体育館, 5月26日 - 5月28日, 2014. 大月智史, 神永拓, 中村仁彦: “直動型電気静油圧アクチュエータの二関節駆動方式を採用した脚機構の開発”, ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 355-360, かみのやま温泉, 3月14日 - 15日, 2013. (査読有)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ynl.t.u-tokyo.ac.jp/~kaminaga/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神永拓 (KAMINAGA, Hiroshi)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教
研究者番号: 90571571

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし