

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23603006

研究課題名(和文) 急斜面における作業機械の移動機構に用いる水圧駆動式脚機構の開発とその制御

研究課題名(英文) Development and control of a leg mechanism for a movable working machine on a steep incline

研究代表者

鈴木 健児 (SUZUKI, KENJI)

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号：70322534

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、水圧で駆動する脚機構の構築及び制御を目的とし、その構成要素の開発及びそれらを使用した制御系の構築と制御を行った。まず、水圧用比例制御弁を開発し、それをを用いた水圧シリンダ制御系の構築とシリンダ変位のフィードバック制御を行った。また、水圧シリンダ及び水圧揺動モータを使用した2自由度リンク機構を構築し、各関節の角度制御を行った。さらに、揺動角が270°の水圧揺動モータを新たに開発し、動作させた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is the construction and control of a leg mechanism driven by water hydraulics. In this study, the components of a water hydraulic control system were developed and the construction and control of the control system that use them were performed. First, the water hydraulic proportional control valve was developed. Then, a water hydraulic cylinder control system using it was constructed, and feedback control of the cylinder displacement was performed. Moreover, two degree-of-freedom linkage mechanism which uses the water hydraulic cylinder and the water hydraulic oscillating motor was built, and angle control of each joint was performed. Furthermore, vane-type 270-degree oscillating motor was newly designed for water hydraulics. The designed oscillating motor was fabricated and it was able to operate smoothly.

研究分野：流体工学, 制御工学

科研費の分科・細目：バイオマスエネルギー

キーワード：水圧駆動システム 比例制御弁 水圧シリンダ 水圧揺動モータ リンク機構

1. 研究開始当初の背景

化石燃料依存からの脱却と再生可能なエネルギー資源の創出は、地球環境の維持と人類社会の永続的な発展を両立するための喫緊の課題である。そのためには、風力・太陽光・水力・地熱・バイオマス燃料などによる発電を強力に推進しなければならない。しかしながら、日本においてはこれらは未だ本格的な普及に至っていない。その原因としては、国土が狭い上に山間部が多く、上述した自然のエネルギーを利用しにくいという問題がある。しかし、日本には利用していない森林資源が豊富に残っている。この木材や間伐材を発電などに活用すれば、再生可能なエネルギー資源を創出することができる。

しかし、日本の森林資源の多くは急斜面地にあり、現在の大型機械では移動することが困難なため、伐採作業は人手に頼らざるを得ない。その人件費のため、安い輸入材に需要を奪われ、日本の林業は後継者不足等で衰退の一途を辿っている。その結果、日本は豊富な森林資源がありながらも、木材やパルプの輸入大国となっただけでなく、東南アジアなどの地域において環境破壊などの問題を引き起こしている。

これらの問題を抜本的に解決するためには、日本特有の急斜面地における森林作業を効率的に行うための作業機械を開発しなければならない。解決すべき最大の技術的課題は、その作業機械の移動機構の開発である。本研究は、その開発の第一段階として、移動機構を構成する基本要素の試作を行う。

現在、森林の不整地を移動するための車両には、金属チェーンを装備した大径タイヤの全輪駆動車や、クローラを装備した作業車が多い。これらの大型機械は、北欧の森林地帯のような平野における林業には適している。しかし、日本の森林のほとんどは急峻な山間部であり、上記のような大型林業機械の導入は難しい。

林業用機械の代表的な企業であるスウェーデンの Timberjack 社の子会社で、研究開発を行っているフィンランドの Plustech 社は、六脚の歩行型作業機械を 1995 年に試作した。脚による歩行であるため、地面への影響を最小限にすることができる。移動機構は重心移動及び姿勢制御機構を兼ねており、 30° 近い傾斜地でも歩行できる。また、障害物を跨ぐ動作や、前後だけでなく左右方向への移動も可能である。起伏の穏やかな森林における作業機械としては理想的な特徴を有しているが、日本の山間部のような急斜面で作業するためには、機能不足である。

本研究で開発を目指す移動機構では、 45° 程度の勾配を有する急斜面においても安定した歩行ができるよう、脚先端の運動空間を広く取り、重心移動及び姿勢制御を容易に行えるようにする。この脚は状況に応じて形態を変えることができ、狭い通路を移動時には折りたたんだ状態で歩行し、伐採作業時には

周囲へ広げて安定性を高めることができる。常に安定な歩行となる脚機構には六脚が必要であるが、本研究ではその基礎技術を確認するため、小型の一脚機構を開発する。

さらに本研究の大きな特徴は、脚を水圧によって駆動することである。水圧駆動は、産業界で主流となっている電動、油圧、空気圧の主要 3 駆動様式では困難な、高動力密度かつ環境融和性が求められる用途に適する。電動と空気圧では、作業機械に要求される動力密度を達成できない。油圧は動力密度が高く、大型作業機械の駆動には不可欠であるが、事故等によって作動油が漏洩した場合の環境汚染や、強い燃焼性による火災の危険性がある。水圧の利点は、油圧と同等の動力密度を有しつつ、無害で環境に優しく、安価で入手・廃棄が容易なことである。また火災や爆発の危険性が無いことは、森林火災を未然に防ぐために大きな利点となる。

2. 研究の目的

本研究は、バイオマスエネルギーの利用のための森林作業用移動用に、水圧で駆動する脚機構の構築及び制御を目指し、その基礎技術を確認することが目的である。しかし、水圧駆動システムは油空圧システムに比べて成熟しておらず、特に日本においてはその構成要素（制御弁やアクチュエータ）の市販品は非常に選択肢が少ない。

そのため、本研究ではまず水圧駆動システムの構成要素を開発する。供給圧力を設定するために必要な水圧リリーフ弁は、研究代表者らが開発したものを使用する。ここでは、水圧アクチュエータの運動を制御するために不可欠な、スプール弁形式の比例制御弁の開発を行う。この弁は本研究以前から開発を行っていたもので、既に試作と静特性の測定までは行っている。本研究では、スプール弁変位のフィードバック制御ができるようにする。

また、開発した水圧比例弁を使用し、水圧シリンダ変位のフィードバック制御系を構築する。これにより、脚機構の関節の角度制御を行うための基礎技術を確認する。

さらに、水圧アクチュエータとして、揺動モータを開発する。リンク機構の関節では、揺動運動が最も使用されているが、直線運動する水圧シリンダで揺動運動を得るためには、運動方向を変換するリンク機構を構成する必要がある。しかし、揺動角によってトルクが変化することや、死点の存在により、特に多自由度を構成しようとする機構のレイアウトが非常に困難である。また、高速回転する水圧モータと減速機を組み合わせても揺動運動が得られるが、システムとして非常に高価なものとなる。したがって、揺動運動を直接発生させる揺動モータが望ましい。

最後に、開発した構成要素を組み合わせ、脚機構を模擬したリンク機構を構築し、関節角度のフィードバック制御を行う。

3. 研究の方法

まず、水圧シリンダなどの水圧アクチュエータを制御するための制御弁として、水圧比例弁の開発を行った。この弁はスプール弁形式であるが、ステッピングモータの回転運動をカム機構によってスプール弁の直動運動に変換する構造となっている。スプール端に取り付けられた変位センサの信号をマイコンで読み取り、ステッピングモータへの回転角へとフィードバック制御した。制御則は比例制御とし、比例ゲインを実験的に調整して最適な比例ゲインを求めた。

次に、開発した水圧比例弁を使用した水圧シリンダの変位制御系を構築した。コントローラには比例制御を用い、比例ゲインはシミュレーション及び実験によって定めた。

また、揺動運動を直接得ることができる 90° の揺動角をもつダブルベーン型の水圧駆動用揺動モータを開発した。この揺動モータ内部の圧力は常に回転対称であるため、その位相によらず回転軸を支持する軸受には圧力による偏荷重が発生しない。このモータを脚機構の第2関節に組み込めるよう、小型化した。

これらの技術を用いて、水圧シリンダと水圧揺動モータによる2自由度リンク機構を構築し、それぞれの関節の角度制御を行った。

さらに、 270° の揺動角をもつ水圧駆動用揺動モータを開発した。潤滑性の乏しい水を作動流体とするためには、軸受に作用するラジアル偏荷重を小さくしなければならない。そこで、シングルベーン型と同じ大きな揺動角と、ダブルベーン型の特長であるモータ内部の圧力平衡を実現するために、シングルベーン型揺動モータ3台を同軸上に連結したような構造とした(図1)。両側のベーンは、中央のベーンに対して幅が半分であり、かつ位相が 180° ずれている。このような構造とすることにより、モータ内部の圧力による偏荷重が相殺され、全体としては圧力分布が回転対称になるため、軸を支持する軸受には偏荷重が作用しない。

4. 研究成果

(1) 水圧比例制御弁の開発

本研究で開発した水圧用比例弁の全体写真を、図1に示す。これは、流体の流れを制御するスプール弁とスプール駆動部で構成される。スプール駆動部はステッピングモータの回転をカムによって線形運動に変換している。通常のカム機構ではばねを用いてカムフォロワをカムに押し付けている。この場合、高速応答を実現するためには強いばねが必要となり、過大な力を必要とする。また、偏心カムを用いるとカム回転角とカムフォロワ変位が非線形になるため、必要な変位を得るための計算が複雑になり、制御機の負担が大きい。そこで、本研究では2個のカムフォロワが常に左右からカムを挟み込むような確動カムを用いることで戻りばねを無く

し、ヒステリシスを排除している。さらにカム回転角とカムフォロワ変位とが線形になるようにカム形状を決定したため、必要な変位を得るための回転角は簡単な1次式で計算できる。

スプール変位をステッピングモータ角度にフィードバックする制御系をマイコン上に構築した。ステップ応答を測定した結果、5%整定時間は63msとなった。また、入力振幅を定格の $\pm 50\%$ とした場合の周波数応答のバンド幅は約10Hzとなった。これにより、市販の油圧用比例制御弁と同等以上のステップ応答及び周波数応答を得ることができた。また、弁の静特性を測定した結果、不感帯は観測されず、制御に適した特性であることがわかった。

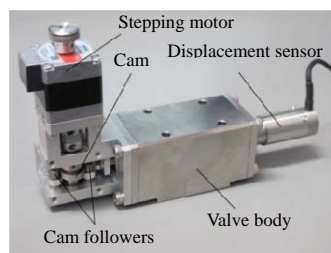


図1 開発した水圧比例制御弁

(2) 水圧シリンダ変位制御

水圧用比例弁を用いた水圧シリンダの位置制御についてのシミュレーション及び実験を行い、比較を行った。研究代表者らが開発した水圧用比例弁と、それに接続した水圧シリンダについて、モデル化を行った。シリンダ変位をフィードバックして比例制御系を構築し、ステップ応答及び正弦波入力に対する応答を、シミュレーション及び実験によって比較した。不確定なパラメータが残っているため過渡応答はあまり一致していないが、静定時間は比較的よく一致した。

(3) 90° 水圧揺動モータの開発

開発した水圧揺動モータとその断面図を、図2に示す。内部構造は、圧力が均衡となるダブルベーン型を採用した。揺動角はベーンが水平の状態から $\pm 45^\circ$ 回転する。また、ベーン側面部には超高分子量ポリエチレン製の円板型シールを挟むことで、金属同士のしゅう動を無くした。

開発した比例弁と揺動モータを含めた数学モデルの妥当性を検証するために、比例弁のスプール変位と揺動モータにおける角速度の関係を測定し、MATLAB/Simulinkを用いて構築したモデルと比較した。開発した比例弁にステップ信号を入力し、スプールをステップ状に変位させて、揺動アクチュエータのベーンが端から端まで回転した時の時間を測定し、角速度を求めた。

図3は実験結果とシミュレーション結果の比較である。スプール変位が中立位置近傍にある時、不感帯が発生している。シミュレーションによる検討の結果、これは揺動モ-

タの内部漏れに起因しているものと考えられる。また、実験値における角速度の飽和は、実験で使用したポンプの流量の制限によるものである。

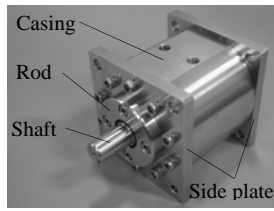


図2 開発した90°水圧揺動モータ

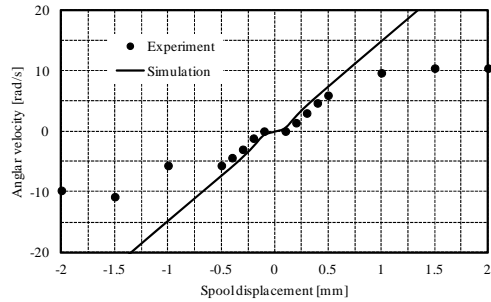


図3 水圧揺動モータの角速度

(4) 2自由度リンク機構の構築及び制御

図4に示すような2自由度リンク機構を構築した。第1関節は水圧シリンダによって駆動し、第2関節は揺動モータによって駆動した。それぞれの関節に取り付けたポテンシオメータによって関節角度を検出し、水圧比例弁によってフィードバック制御を行った。

第1関節の整定時間はシリンダ伸び時約0.3 s、縮み時約0.5 sとなった。第2関節の整定時間は約0.1 sであった。どちらの応答も、シミュレーション結果とほぼ一致する結果となった。

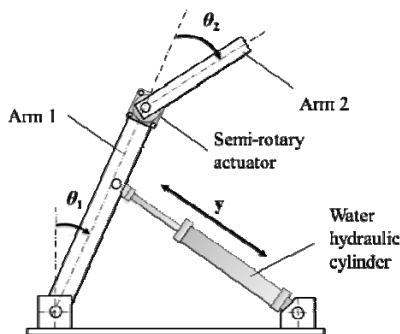


図4 2自由度リンク機構

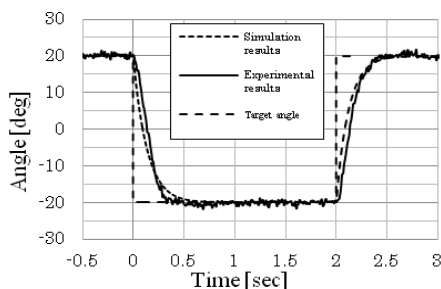


図5 第1関節のステップ応答

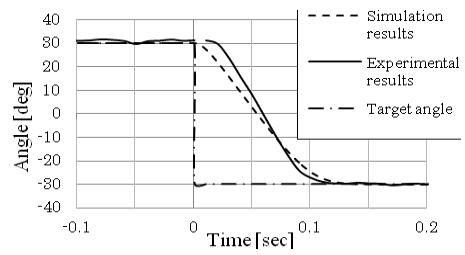


図6 第2関節のステップ応答

(5) 270°水圧揺動モータの開発

開発した揺動モータの構造を図7に示す。一つの軸に取り付けた3枚のベーンが、それぞれの圧力室でシングルベーンとして機能する。各圧力室は、シングルベーン型と同じ構造をしているため、揺動角を270°とることができる。中央のベーンの幅は、両サイドのベーンの幅の2倍である。両サイドのベーンと中央のベーンを180°位相をずらして互い違いに配置することにより、軸にかかるラジアル偏荷重が相殺され、軸受摩擦が軽減される。

主軸を支持する軸受には、樹脂製の市販品を使用した。主軸の両側には、パッキンとダストシールを組み込んだ。しゅう動するベーン先端は、超高分子量ポリエチレンで製作した角型シールを、切断したOリングの弾性によってケーシングに押付ける構造とした。

製作した270°水圧揺動モータの外観を図8に示す。独立した3組の圧力室に給排水を行うため、モータの内部と外部に流路を設けた。3組の圧力室を仕切る2枚の仕切り板の外径は、圧力室の内径よりも大きくしてあり、分割されたケーシングによって仕切り板を挟み込む構造とした。

開発した水圧比例弁を揺動モータに接続して角度制御を行い、滑らかに動作することを確認した。

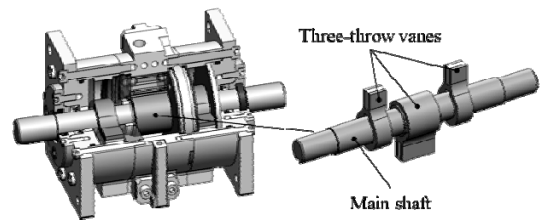


図7 水圧用270°揺動モータの構造

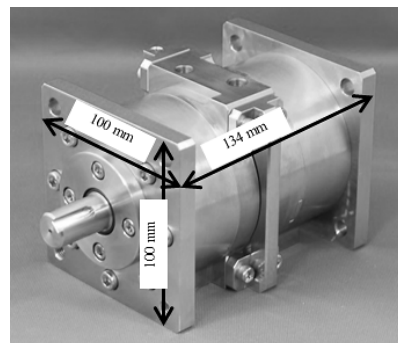


図8 水圧用270°揺動モータの外観

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)

- ① K. Suzuki, S. Akazawa, and Y. Nakao, Development of cam-drive type proportional valve for water hydraulics, Intl. Journal of Automation Technology, Vol. 6, No. 4, pp. 450-456 (2012-7).

[学会発表] (計12件)

- ① 鈴木健児, 鳥居良介, 中尾陽一, 水圧駆動用ベンチ型 270° 揺動モータの開発および性能評価, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 1A1-F06. pdf, (富山市総合体育館, 2014-5-26).
- ② K. Suzuki, S. Akazawa and Y. Nakao, Design of angle control system of water hydraulic semi-rotary actuator of quarter-turn type using a proportional valve, Proc. the 12th Intl. Conf. on Fluid Control, Measurement, and Visualization, OS2-01-3. pdf, (Nara Prefecture New Public Hall, Japan, 2013-11-21).
- ③ 赤澤翔, 鈴木健児, 鳥居良介, 中尾陽一, 水圧用比例弁を用いた 90° 回転型揺動アクチュエータの角速度制御のためのモデル化, 日本機械学会関東支部 19 期総会講演会講演論文集, pp. 501-502, (首都大学東京, 2013-3-16).
- ④ 畑山敏毅, 赤澤翔, 鈴木健児, 中尾陽一, 水圧用比例弁を用いた水圧シリンダの位置決め, 日本機械学会関東支部 19 期総会講演会講演論文集, pp. 497-498, (首都大学東京, 2013-3-16).
- ⑤ K. Suzuki, S. Akazawa, R. Torii, and Y. Nakao, Development and control of water hydraulic semi-rotary actuator of quarter-turn type, Proc. the 5th Intl. Conf. on Positioning Technology, pp. 37-40, (Garden Villa in Kaohsiung, Taiwan, 2012-11-14).
- ⑥ 畑山敏毅, 赤澤翔, 鈴木健児, 中尾陽一, 水圧比例弁を用いた水圧シリンダ制御系のモデル化, 日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集, J113026. pdf, (金沢大学, 2012-9-11).
- ⑦ 赤澤翔, 鳥居良介, 鈴木健児, 中尾陽一, 水圧駆動用 90° 回転型アクチュエータの性能評価, 日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集, J113025. pdf, (金沢大学, 2012-9-11).
- ⑧ 鳥居良介, 鈴木健児, 中尾陽一, 水圧駆動用 270° 回転型揺動アクチュエータの試作, 日本機械学会関西支部第 87 期総会講演会講演論文集, p. 13-11, (関西大

学, 2012-3-16).

- ⑨ 赤澤翔, 鈴木健児, 中尾陽一, カム駆動型水圧用比例弁の動特性の向上に関する研究, 日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会講演論文集, pp. 21-22, (日本大学生産工学部, 2012-3-9).
- ⑩ 鳥居良介, 鈴木健児, 中尾陽一, 水圧駆動用 270° 回転型揺動アクチュエータの設計, 日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会講演論文集, pp. 19-20, (日本大学生産工学部, 2012-3-9).
- ⑪ K. Suzuki, S. Akazawa, T. Hatayama, and Y. Nakao, Development of water hydraulic proportional valves driven by positive cam mechanism, Proc. 8th JFPS Intl. Symposium on Fluid Power, pp. 550-555 (Okinawa Convention Center, Japan, 2011-10-27).
- ⑫ 赤澤翔, 鈴木健児, 中尾陽一, カム駆動型水圧用比例弁の動特性, 日本機械学会 2011 年度年次大会DVD-ROM論文集 (東京工業大学, 2011-9-14).

[その他]

ホームページ等

http://www.mech.kanagawa-u.ac.jp/lab/nakao_lab/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 健児 (SUZUKI, Kenji)

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号: 70322534