

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04153

研究課題名（和文）中小企業におけるスマートファクトリー実現のためのワイヤ駆動デルタロボットの開発

研究課題名（英文）Delta-type parallel wire drive mechanism for smart factory

研究代表者

樋口 勝（HIGUCHI, Masaru）

日本工業大学・先進工学部・教授

研究者番号：40293039

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：中小企業のスマートファクトリー化を目的とした、導入費用が安く、ティーチングが容易なロボットとして、デルタ型パラレルワイヤ駆動機構を開発している。まず、パラレル機構で問題となる特異点を少ない機構を実現するために、チルト機構とプーリを組み合わせたワイヤ巻取り機構を2種類提案している。次に、広い実作業領域を有するデルタ型パラレルワイヤ駆動機構を設計するための評価指標として、従来提案されている運動伝達指数をデルタ型にも適用できるように修正した指数を提案し、これを用いて試作機を設計・製作した。そして、修正運動伝達指数と位置繰り返し精度の関係を実験で把握し、提案した指標に有効性について検討している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案したパラレルワイヤ駆動機構は、ロボットのコスト増につながる高減速比の減速機を必要とせず、ワイヤを用いて駆動できるので、大きな作業領域のロボットを実現する場合には、特に安価にロボットを製作でき、また、高減速比の減速機を用いないので、バックドライブ性を有しており、手先に特別な機構やセンサを取り付けることなくダイレクトティーチングを実現できると考える。これにより、従来困難であった中小企業でのロボットの導入および活用が容易になると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Delta type parallel wire driven mechanism (DPW) has been proposed. The mechanism can be fabricated with low price and its motion can be easily taught. To realize large workspace, modified transmissibility index for DPW was proposed and prototype of DPW was designed by using proposed index. Besides two type of the wire driven mechanism for DPW were proposed with large workspace. By using prototype, relationship between proposed index and repeatability was experimentally investigated.

研究分野：機構設計

キーワード：パラレル機構 ワイヤ駆動機構 機構設計 パラレルワイヤ駆動機構

1. 研究開始当初の背景

労働人口、特に熟練作業者の減少に対する解決方法として、インダストリー4.0を始めとするスマートファクトリー化に向けた取り組みが行われている。スマートファクトリーなどを含む産業IoTで成果を出す仕組みは基本的には「サイバーフィジカルシステム(CPS)」だとされている[1]。これは、現実世界の情報をサイバー空間に送り、最適に処理した情報を現実世界にフィードバックするという「サイクル」を意味する。情報をIoTなどで「収集」し、サーバやクラウドで「蓄積」する。そしてそれらをビッグデータ分析やAIで「分析」し、その結果となる知見などを現実世界にフィードバックして「活用」という流れである。大企業ではこのCPSが効果的に行われている場合がある。しかし、製造業の基盤となる中小企業においては、「収集」「蓄積」「分析」までの「見える化」までは行われているが、最後の「活用」が行われていない。これは、「活用」に必要な、作業の自動化、つまりロボットの導入が困難だからである。

その理由としては大きく3つ考えられる。1つ目の理由は、導入コストが高い事である。申請者も中小企業向けのロボットを用いたスマートファクトリー化の研究を行っているが、ヒアリングでは必ず対象とする企業の規模や導入コストの問題が指摘される。2つ目の理由はロボットシステムインテグレータ(SIer)が不足していることである。産業用ロボットメーカは、各企業で異なる手先効果器の運用を含めたシステムの構築は行わない。また、ロボットの動作のティーチングも、オフラインティーチングソフトがロボットメーカから提供されるものが高価であると同時に、手先効果器を含めたシステム全体の動きとして使用するためには、実システム構築と同様のスキルが必要となる。ロボットを導入する中小企業にはこれらスキルを有する技術者はいないため、外部からSIer雇う必要があるが、優秀なSIerの人数が不足しており、その雇用も高コストであり雇用も難しい。そもそも、SIerが必要であるとの認識がない場合もある。このように、仮にロボットを導入できたとしても、それを有効活用できない場合も多い。3つ目の理由は多関節型の産業用ロボットのティーチングが困難なことである[2]。ティーチングが困難な理由としては、ペンタブレットを用いた操作性の悪さと、作業領域内に存在する特異点である。前者については、手先に力センサや、ワイヤパラレル機構を取り付けることで、ロボットの手先を人が直接操作するシステムが提案、実用化されている。しかし、特異点は、現場の作業にはわかりにくく、手先効果器の取り付け方、作業内容、設置環境などロボット本体以外の要因が大きく影響を及ぼすことから、ロボットメーカで事前に対応することが困難であり、基本現場で対応することが一般的である。

2. 研究の目的

本研究では、中小企業でのスマートファクトリー化を実現するために、安価でSIerを必要としないために導入が容易で、かつ、ティーチングが容易なために導入後の活用ができるロボットを開発することを目的とする。

この目的を満たすロボットを考えるために、まず、導入コストについて着目する。産業用ロボットアームの原価割合は、減速機が35%、サーボ25%、コントローラ15%と、減速機がその大部分を占める[3]。これに対して安価な3Dプリンタは、減速機を使用していない。これは、ロボットアームはモーメントアームが大きいために大トルクが必要なのに対し、3Dプリンタは径の小さいプーリーを介したワイヤ・ベルトで直接出力を駆動しているため小さいトルクで駆動できるからである。そこで、3Dプリンタを参考にロボットを低価格化するために、①ハーモニックドライブのような高価減速機を使用しないワイヤあるいはベルトによる出力の直接駆動、②高価なACサーボもモータではなく安価なステッピングモータの使用、を考える。さらに、3Dプリンタは作業領域を大きくする場合には、シャフトのたわみも大きくなり、高精度かつ低価格のロボットの実現が困難となるので、③直進案内の不採用、を考える。そして、これら全てを満たす機構として、パラレルワイヤ駆動機構を採用する。

次に、ロボットのティーチングが困難な理由について考える。この原因としてペンタブレットを用いた操作性の悪さと、作業領域内に存在する特異点が考えられる。前者については、ティーチングのためのばねを並列に配置したパラレルワイヤ駆動機構を手先に取り付けることで、ロボットを人が直接操作するシステムが提案されている[4]。本ロボットはそもそもパラレルワイヤ駆動機構なので、④別途ティーチングのための機構を必要としない直接ティーチング可能なロボット、を考える。ただし、人の操作量を検出するためのセンサとばねが必要になると考える。後者の特異点は、手先効果器、作業内容、設置環境などロボット本体以外の要因の影響を大きく受けるため、ロボットメーカで事前に対応することが困難である。そのため、現場での対応となるが、特に姿勢の特異点は予想しにくく、現場の作業者がこれを予測してティーチングを行うことは困難である。そこで、本研究では、特異点が少ない、あるいは、特異点がわかり易いロボットを開発することを考える。現場では、デルタロボットやSACARA型ロボットのように、出力が姿勢変化しない6軸と比較して安価な3自由度(3軸)ロボットも多く用いられている。そこで、本研究では出力姿勢変化の無い空間3自由度ロボットを対象とし、空間3自由度のパラレル機構である、デルタロボットをベースとした機構を考える。空間パラレルワイヤ駆動機構は自由度に関係なく最低7本のワイヤが必要ないため、3自由度の機構は開発されていないが、⑤2本の

ワイヤを同期させる駆動システムを用いることで、駆動アクチュエータの数を減らし、3自由度機構としてのメリットを活かす、ことを考える。なお、ロボットの対象作業としては、パーツの搬送、工作機械へのワークのローディング・アンローディングを始めとして、人が行ってきた作業の代替を行うことを考える。以上のような平行ワイヤ駆動の3自由度並進運動機構を本研究では、ベースとなった機構にちなんで、デルタ型平行ワイヤ駆動機構(DPW)と呼ぶことにし、本研究では、これを開発することを目的とする。

なお、従来の平行ワイヤ駆動機構の多くは、機構自由度が5自由度以上である[5]~[7]。これは、出力節を空間的に完全に拘束するためには、機構自由度が少なくてもアクチュエータで駆動される7本のワイヤが必要だからである。ワイヤを用いた空間3自由度の平行機構としては、ワイヤと剛体リンクを組み合わせたハイブリッド機構のデルタ機構があり、本研究と同様に平行機構の短所である特異点の少ない機構としてプーリを介してワイヤを節に取り付けている[8]。空間3自由度のワイヤのみからなる平行機構としては、本研究と同様にデルタ機構と同じ姿勢が一定の位置の3自由度機構[9]があるが、ワイヤ張力の等配分を考慮したため、出力節から上下左右にワイヤが伸びている。

本研究は、空間3自由度のワイヤのみからなる平行機構であり、実作業をすることを考えたワークとワイヤの干渉しにくい機構としている。また、ワイヤのみからなる平行機構でありながら、特異点を回避するために、プーリを介してワイヤを節に取り付けている。さらに、上述のハイブリッド機構のワイヤ・プーリ系は2次元構造であったのに対して、本研究では3次元構造を提案している。また、本研究では機構の精度に直接関係するにも拘らず従来の研究では余り着目されていないワイヤ繰り出し部とワイヤ巻取り機構として、デルタ機構の平行リンク構造に着目することでワイヤの代わりにタイミングベルトを用いた高精度な機構を提案している。さらに、高精度でありながら低コスト化を実現する方法として、冗長機構でありながら、高価な減速機を必要とせず、安価なステッピングモータを用いた機構・制御系を提案している。さらに、ダイレクトティーチングを行う方法として、ロボット手先に取り付ける平行ワイヤ機構[10]の構造を参考にして、平行ワイヤ駆動機構そのものにダイレクトティーチングする機能を組み込むことを考える。

3. 研究の方法

3.1 プーリとワイヤを用いた平行ワイヤ駆動機構の評価指標と設計方法の提案

図1に示すプーリとワイヤからなるワイヤ駆動機構は、従来のワイヤ間の角度に基づく運動伝達性評価だけでは、その評価が不十分であるため、直接ワイヤの張力と出力節の剛性を評価する評価指標を提案する。この場合、出力節に作用する負荷の大きさや、本提案機構のように、故意に特定のワイヤだけ張力が大きくなることを許容する設計を行っている場合に対しても、適切な評価を行うことができるように、評価する前提条件の明確化や、標準化の方法を含む評価指標を提案する。

3.2 ワークとワイヤの干渉を考慮した広い実作業領域を有する機構とその設計法の提案

従来の平行ワイヤ機構は、ワイヤの干渉は考慮しているが、ワークとワイヤの干渉を考慮した設計は行われていない。そこで、上述の評価指標とワークとワイヤの干渉を考慮した機構の提案および設計法の提案を行い、これらを用いて、具体的な機構を複数設計・製作する。そして、実験により提案した機構の価格、運動性能、精度などを評価し、提案した機構・手法の有効性を明らかとする。

3.3 タイミングベルトとプーリを用いた、ワイヤ繰り出し部・ワイヤ巻取り機構とその設計法の提案

図2に示すタイミングベルトを用いたワイヤ駆動機構を用いた特異点の存在しない平行リンク機構の提案・設計を行う。また、2つのプーリを反転させて同期して駆動するシステムの提案・設計を行う。特に、出力が同軸の場合の機構の提案、伝達トルクの大きい、サイズの小さい機構を実現するためのプーリの配置などを検討する。なお、対になるプーリの軸が一致する機構が最も運動伝達性に優れると考えるが、実現が困難な場合には、実現が容易な一致しない機構についても検討し、これら機構の設計方法を明らかとする。

3.4 ワイヤとプーリからなる3D平行リンク機構とその設計法の提案

平行リンク機構を互いに垂直に組み合わせることで、空間的に平行を維持する機構の提案・設計を行う。これについても、対になるプーリの軸が一致する場合と一致しない場合の両方について検討し、運動伝達性に優れた空間平行リンク機構の設計方法を明らかとする。

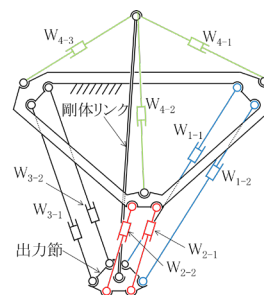


図1 DPWの構成

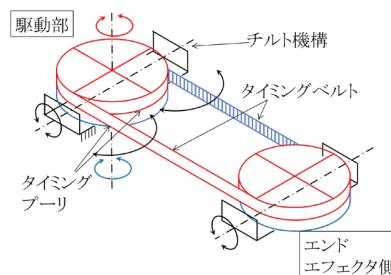


図2 同軸型ワイヤ巻取り機構の構成

4. 研究成果

4.1 デルタ型パラレルワイヤ駆動機構の提案

デルタ型 PWD 機構のワイヤの配置を考えるにあたり、本研究では、ワークとワイヤとの干渉を考慮して機構の大きさに対する実作業領域の大きさが大きい機構を設計すること考える。まず、剛体リンクからなるデルタ型パラレル機構と同様の配置になるように考えたデルタ型 PWD 機構の構成を図 1 に示す。図では、ワイヤ巻き取り機構により伸縮するワイヤを直進対偶で表しており、下側の 3 対の色が同じ平行する 2 本の直進対偶 ($W1-1 \cdot W1-2$, $W2-1 \cdot W2-2$, $W3-1 \cdot W3-2$) は長さが常に一致するように、同期して 1 つのアクチュエータで駆動するものとする。重力加速度を超えない加速度での運動を行う場合は、出力節の重力により、常にこれら 6 本のワイヤに張力を与えられるが、それ以上の加速度での運動を行うためには、これら 6 本のワイヤに張力を与えるためにもう一本のワイヤが必要となる。これは図 1 の下側つまりワーク側に配置することとなり、このワイヤがワークと干渉することが考えられる。そこで FALCON[11] のように剛体リンクを出力節に取り付けることで、ワーク側にワイヤが存在しない構成とする。本機構では、剛体リンクを剛に出力節に取り付けた FALCON とは異なり、球待遇を介して剛体リンクを出力節に取り付ける。この剛体リンクで出力節を押し出すことで、張力を与えるワイヤの代わりとする。そしてこの剛体リンクの押し付け力は、1 本のワイヤで駆動できるが、この場合、直進案内が必要となることから、これを必要としないように 1 つのアクチュエータで駆動される 3 本のワイヤ ($W4-1 \cdot W4-2 \cdot W4-3$) を用いて与えることとする。

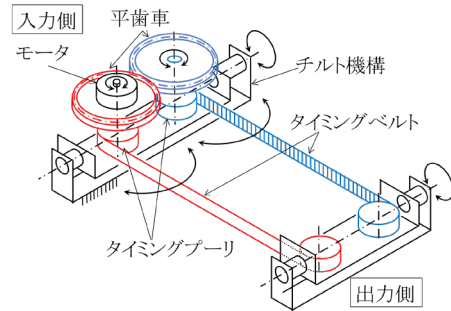


図 3 2軸型ワイヤ巻き取り機構の構成

4.2 タイミンングベルトを用いた平行ワイヤ駆動機構の設計

4.2.1 パラレルワイヤ駆動機構の課題 本ワイヤ駆動機構には、以下の 3 つの課題ある。

- ①ワイヤ繰り出し部のガタと摩擦の僅少化
- ②巻き取りドラムの径の変化の僅少化
- ③リンク長の制御が可能な平行リンク機構の実現

まず、ワイヤ駆動機構では、ワイヤが繰り出される穴であるワイヤの繰り出し部は、金属の板に穴をあけただけの単純な構造（スロート）が用いられることが多い。しかし、ワイヤと穴との間の隙間（ガタ）により、ワイヤの繰り出し位置が変化し、さらに、穴はワイヤにより摩擦するため、穴の径や、出口のフィレットの半径が拡大する。また、穴とワイヤとの間の摩擦力は高精度に把握することが困難である。しかし、高精度にワイヤの長さおよび張力を制御するためには、これらの問題を解決する必要がある。

次に、ワイヤ巻き取り機構には、電磁モータ駆動の巻き取りドラム（プーリ）にワイヤを巻き付ける機構が多く用いられている。しかし、この機構では、ワイヤがプーリに重ねて巻き付くに従い、実質的なプーリの径が大きくなる。プーリはその回転軸方向に幅を持ち、この軸方向のワイヤの巻き付く位置は再現性が低いために、実質的なプーリの径を予測は困難である。また、ワイヤの巻き付くプーリの軸方向の位置により、繰り出されるワイヤの長さも変化する。

最後に、これらの課題の他に、ワイヤ駆動デルタ機構においては、3 対の直進対偶（ワイヤ）は、それぞれ平行を維持して長さを任意に制御できる必要があり、それぞれ、1 つのアクチュエータで駆動できる必要がある。これを実現するワイヤ巻き取り機構が必要である。

4.2.2 プーリとチルト機構を用いたワイヤ繰り出し部一体型平行ワイヤ巻き取り機構の提案

以上の課題を解決する機構として、図 3 に示す、ワイヤ繰り出し部を持たず、タイミンングベルトとパン・チルト機構を提案する。まず、プーリにワイヤが重ねて巻き付かないようにするために、ワイヤと巻き取りドラムではなく、タイミンングベルトとタイミンングプーリを用いる。これにより、ワイヤの軸方向の巻き取り位置の変化も小さくすることができると思う。

次に、ワイヤ繰り出し部を無くすために、この機能をパン・チルト機構に置き換える。そして、この機構を単純化するために、パン軸の機能はタイミンングベルトとタイミンングプーリに持たせる。このプーリは軸を平行にして径が等しいものを入力側、出力側のチルト機構にそれぞれ 2 つずつ配置する。そして、タイミンングベルトが平行になるように、タイミンングプーリの軸間距離は入力側と出力側とで等しくする。なお、ベルトはプーリの外側に配置し、出力側の 2 つのプーリはチルト機構に固定し回転させず、入力側の 2 つのプーリは互いに逆方向に回転させる。

この機構の 2 本のタイミンングベルトを 1 つのアクチュエータで同期して駆動するために、タイミンングプーリと同軸でタイミンングプーリと一体となった 1 対の歯車列を使用する。なお、ワイヤ駆動機構なので、歯車列に作用するトルクの方法は変化しないため、歯車のバックラッシュを考慮する必要が無いと考える。

4.2.3 基本特性把握実験

提案したワイヤ駆動機構の運動精度を評価するために、モータの角変位とワイヤの長さの関係および、入力側の姿勢角に対する出力側の姿勢角の関係を実験により把握した。製作した実験装置の構成を図 4 に示す。運動を計測するために、出力側はリニアガイドと回転関節により、ワイヤ方向の直進運動とパン軸の回転のみ行えるように拘束する。パン軸の角変位は 1024pulse/round のロータリエンコーダで、出力の位置は分解能 0.005 mm のリ

ニアエンコーダで測定する。入力側は MTL 製の DD モータ MDH-70 (最大トルク:3.1N・m、最高速度:200rpm) を用いて駆動する。また、入力側は 1° 毎にパン軸の割出がおこなえる。タイミングベルトは 2GT (ピッチ 2 mm、幅 6 mm)、タイミングプーリは歯数 60、歯車はモジュール 0.5、歯数:90、歯幅:5 mm、を採用した。これにより軸間距離は 90 mm となる。また、タイミングベルトに常に張力を与えるため、手に入る最も荷重が小さい 1.94N の定荷重バネを採用した。測定結果の一例として、入力側の姿勢角 (パン角) $\theta_i = 0^\circ$ に設定し、5 次両停留曲線を用いて初期位置 (タイミングベルトの長さ mm) からストローク 240 mm の往復運動を行った場合の、出力の姿勢変化 (ワイヤの長さ) $\Delta\theta_o$ の変化を図 5 に示す。誤差 $\Delta\theta_o = \pm 0.3^\circ$ の精度で平行を維持できている。なお、直進運動の精度は誤差 $\Delta x_o = 0.4\text{mm}$ であり、入力側の姿勢角 (パン角) θ_i の変化 ($-30^\circ \sim 30^\circ$) に対する出力側の姿勢の誤差は $\Delta\theta_o = \pm 0.2^\circ$ で平行を維持することができた。

4.2.4 タイミングベルトを用いたデルタ型平行ワイヤ駆動機構の実験機の設計 提案した PWD 機構およびワイヤ巻き取り機構の有効性を検討するために、図 3 に示す形式のワイヤ巻き取り機構を用いて図 1 に示す基本形式のデルタ型 PWD 機構の実験機を設計・製作した。実験機の外観を図 6 に示す。実験機はフレームの大きさが底辺の三角形が 1 辺の長さが 1.15m 高さ 1m である。本実験機ではモータのエンコーダの値や実験装置用のエンコーダの値を読み取るため Interface 社のカウンタボード PCI-6205C を使用している。またモータへの指令値を電圧指令としている為、同社 DA ボード PCI-3341A を使用している。これらのボードに接続する端子台と DD モータドライブ基盤、スイッチ、24V 電源を配線した。

制御は PID 制御により時々刻々の目標位置に追従するように軌道追従制御を行う。制御プログラムは Windows 環境上で開発が行えるように VisualBasic.Net を用いて作成した。実験機に XYZ 各軸方向の並進運動および Pick and Place 動作を模した運動を行わせたとこ姿勢を維持した運動を実現した。

文献

- [1] 岩野 和生、高島 洋典、“サイバーフィジカルシステムと IoT (モノのインターネット)”、情報管理、pp.826-834, Vol.57, No.11 (2015)
- [2] 近畿経済産業局次世代産業・情報政策課、“中小企業におけるロボット導入促進研究会第 1 回資料”、平成 29 年 8 月 25 日
- [3] 中国投資銀行部中国調査室、“中国産業用ロボット市場の発展は好機を迎える～自主ブランドの強化が期待される”、BTMU (China) 経済週報、pp.1-14、第 314 期 (2016)
- [4] 酒井昌夫、佐藤徳孝、森田良文、“ロボット教示用平行ワイヤ機構の開発”、日本機械学会論文集 (C 編), pp.4321-4329, Vol.79, No.807 (2013)
- [5] 川村貞夫、崔源、田中訓、木野仁：平行ワイヤ駆動方式を用いた超高速ロボット FALCON の開発日本ロボット学会誌、Vol.15 No.1 pp.82-89, (1997).
- [6] 金時学、長谷川晶一、小池 康晴、佐藤 誠：7 自由度力覚ディスプレイ SPIDAR-G の提案’、日本バーチャリアリティ学会論文誌、Vol.7, No.3, pp.403-412, (2002).
- [7] 野本悠香梨、梶田晃司：3 次元ワイヤ駆動による遠隔超音波診断のための力覚付き操作ハンドルの開発、生体医工学、Vol.44, No.1, pp.213-220, (2006).
- [8] 江口広聡、妻木勇一、多田隈理一郎：ワイヤ・プーリ型デルタ機構、第 29 回日本ロボット学会学術講演会講演集、RSJ2011AC1E3-4、(2011).
- [9] 山本 元司、神田宗一郎：2 本ペア型 3 自由度完全拘束平行ワイヤロボットの機構と制御、第 32 回日本ロボット学会学術講演会 RSJ2014、(2014).
- [10] 酒井昌夫、佐藤徳孝、森田良文、“ロボット教示用平行ワイヤ機構の開発”、日本機械学会論文集 (C 編), pp.4321-4329, Vol.79, No.807 (2013).

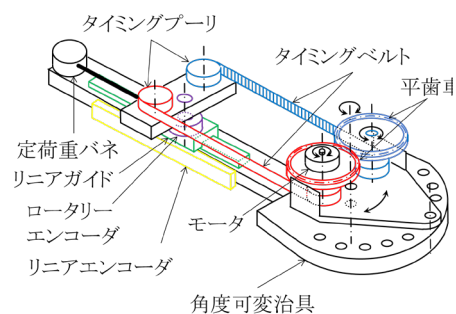


図 4 特性測定用実験装置

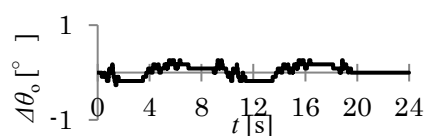


図 5 ワイヤ巻き取り機構の運動精度



図 6 試作機

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小野木慎也、樋口 勝、山本達也
2. 発表標題 高い運動精度を有するデルタ型パラレルワイヤ駆動機構の設計
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会2020 講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本 達也、樋口 勝、中里 裕一、滝田 謙介
2. 発表標題 ティーチングが容易で安価なワイヤ駆動デルタロボットのワイヤ駆動部の設計
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------