

スキルアシストシステムの力覚提示装置用パラレル機構の開発

Development of Parallel Mechanism for Haptic Device of Skill Assist System

○ 小林亮介（日工大） 樋口勝（日工大）

Ryosuke KOBAYASHI, Nippon Institute of Technology

Masaru HIGUCHI, Nippon Institute of Technology

Abstract: This report describes the design of a haptic device for the skill assist system which realizes high performance human operations. We adopted a wire parallel mechanism as this haptic device. This haptic device must not interfere with not only human but also operating objects. There is a high possibility of interference of ordinary parallel wire mechanisms with operating objects. To avoid this interference, we proposed a wire parallel mechanism which substitutes one wire with an extrusion mechanism. And to realize high transparency and large force, the new wire driving mechanism was proposed. It drives wire without reducer. But it has a driving pulley and an idler pulley on which wire are winded many times. Besides the new wire nozzle with low friction loss and high accuracy. The prototype of these elements and haptic device was designed and fabricated.

Key Words: Parallel mechanism, Mechanical design, Skill assist System, Haptic Device, Wire drive mechanism

1. 緒言

人は広いダイナミックレンジの感覚を有し、高い感性、創造力、緊急時の判断力、予期せぬ事態への対応力を有する。しかし、位置や力の精度の高い作業や、同じ作業を高精度に繰り返し行うためには、非常に多くの訓練を必要とする。これに対し、ロボットは人では実現困難な高い運動や力の精度と再現性を有する。そこで、人の作業をロボットでアシストすることにより、人だけでも実現できるが、多くの訓練を必要とし実現が非常に困難である、あるいは人だけ、ロボットだけでは実現困難な精緻かつ創造性の高いスキルを必要とする作業を実現することを考える。本研究ではこのような高いスキルの作業、リハビリを含む人の作業のトレーニング、ヒトの作業の支援などを実現するシステムを「スキルアシストシステム」と呼ぶ。その構成は図1に示すように、力覚、視覚、聴覚等の提示装置と、作業対象や環境の形状・画像認識システム、周囲の音や人の音声指令を認識する音声認識装置等が必要である。本研究はこの中で重要な要素になる力覚提示装置を研究対象とする。力覚提示装置は医療やデザイン用として多くの装置が実用化されている。しかし、これらは仮想現実感を提示することを目的としており、スキルアシストシステムのような実際の作業に適用することを想定していない。そこで、本報告では、このスキルアシストシステム用の力覚提示装置の具体的な機構として著者等が提案した機構を紹介すると同時に、これに用いる要素の提案を行う。さらに、試作・実験を行い、提案した機構および要素の性能を評価する。

2. スキルアシストシステム

スキルアシストシステムの研究としては、自動車のパネル組み立て用のシステムが実用化されているが、人のスキルを高めるよりも作業の安全性を重視している⁽¹⁾。その他は制御方法に関する研究⁽²⁾や、受動関節を用いた機構の研究⁽³⁾があるが、スキルアシストに適した機構の提案やその設計法、あるいは、人のスキルを高めるアシスト方法に関する研究は殆ど無い。

そこで、まず、スキルアシストシステムにより高いスキルの作業を実現する方法について考える。その方法の例としては、まず図2 (a) に示す仮想ツールを提示する方法が考えられる。仮想ツールなので、実際のツールとしては実

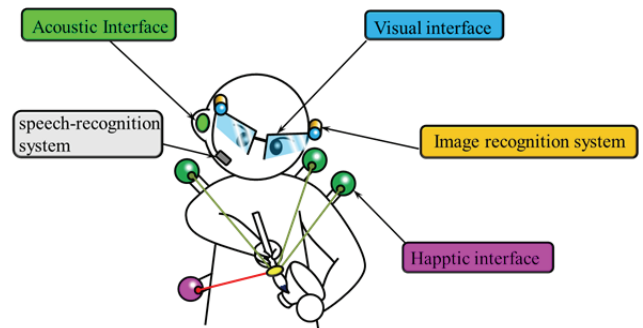


Fig.1 Composition of the skill assist system

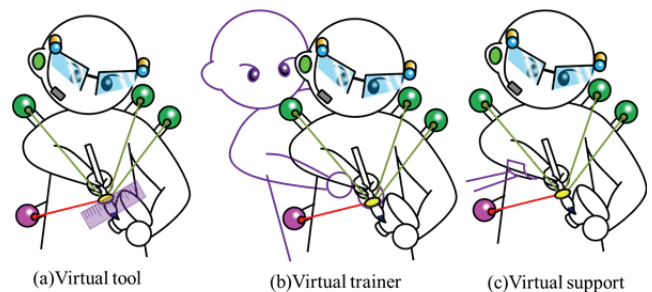


Fig.2 Examples of skill assist method

現が困難な、例えば、任意の曲面に直線や円を描くことのできる定規やコンパス等を提示することができる。また、図2(b)に示す仮想トレーナーのように、実際のトレーナーが密着して行うのと同様に作業をサポートする方法も考えられる。さらに、仮想支持台を提示する方法も考えられる。これは、細かい作業を人が行う場合には、前腕を作業台と接触させて腕を支持し、手首および指先を使用して細かい作業を行うことがあるが、この前腕を支持する台を仮想的に任意の場所に作り出す方法である。この他にも、仮想的なインピーダンスを提示し、人が力を入れ過ぎてしまった場合に、手先がオーバーシュートしてしまうことを抑制する方法等も考えられる。当然、自動車の自動運転や上述のパネル組み立て装置のように、危険な作業を行いそうになった場合にそれを抑止する方法や、熟練者の作業を見本として再現する方法も考えられる。

スキルアシストの方法は、作業者の熟練度や、作業内容、

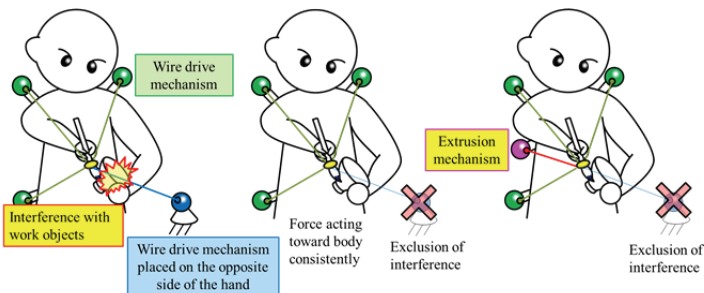
作業環境に対応して適切な方法が存在すると考えられる。本研究では、スキルアシスト方法を限定せず、任意のスキルアシスト方法に対応できる、力覚提示装置の機構を提案する。

3. 力覚提示装置用パラレル機構

力覚提示装置には、力センサを用いて人の操作力を入力とするアドミッタンス型もあるが、多くの力覚提示装置は人の操作により生じた運動を入力とするインピーダンス型である。これは、力センサを必要としないため、安価で安定した動作を実現しやすいためである。本研究もインピーダンス型を採用する。この場合、力覚提示装置には、①人と干渉しない広い作業領域、②安全性だけでなく、③高い機構透明性（バックドライバビリティ）が必要となる。さらに、スキルアシストシステム用の力覚提示装置には、実作業を行うことから、④ヒトだけでなく、作業対象物（ワーク）とも干渉しないこと、⑤実際の作業をしているヒトの運動を拘束する必要があるため、比較的大きな力が発生できること、も必要である。

そこで本研究は、スキルアシストシステム用の力覚提示装置として、パラレルワイヤ駆動機構を採用する。これは、パラレル機構は高負荷・高剛性・高精度・低慣性・高速などのインピーダンス型力覚提示装置に適した特徴を有する⁽⁴⁾からである。さらに、このパラレル機構の中でもパラレルワイヤ駆動機構は、①ワイヤ巻取機構を互いに離れた位置に配置し、ワイヤの長さを長くするだけで、比較的容易に広い作業領域を実現できる、②動節が軽量のワイヤで構成され、ワイヤを巻き取るプーリの径を小さくすることで高減速比の減速機を必要とせずバックドライブ性を実現しやすい、③プーリからワイヤへは摩擦力で力が伝達されるので、ワイヤに過大な力が作用した場合にはプーリとワイヤが滑るため安全性装置としても機能させることができる、等の力覚提示装置に適した特性を有している。このため、パラレルワイヤ駆動機構を用いた力覚提示装置が多く提案されている⁽⁵⁾。しかし、これらのパラレルワイヤ駆動機構は仮想現実感での使用を想定し、作業対象物とパラレルワイヤ駆動機構との干渉を考慮して設計されていない。

一般にパラレルワイヤ駆動機構は機構の自由度+1本のワイヤが必要とされる。そのため、本装置を装着型(ウェアラブル)とする場合には、図3(a)に示すように、任意の方向の力を発生させるために、人の身体から見て手先の向こう側にもワイヤを配置する必要がある⁽⁶⁾。この場合、ワイヤが作業対象物と干渉する可能性が高い。この問題を解決する方法として、図3(b)に示すように、干渉するワイヤを排除し、ワイヤの数を自由度と同じ数とし、常に一定の身体に方向に作用する力を発生させ、この力の作用を重力の作用を人が意識していないのと同様に人に意識させないよう



(a)Interference (b)Virtual force (c)Expansion mechanism
Fig.3 Solution to interference of wire with with work object

にすることで、疑似的に体から離れていく方向の力を人に感じさせる方法がある。しかし、この方法では、本来は作用していないはずの力を常に作用させ続ける必要があり、この力が、高いスキルの実現を妨げる可能性があると考えられる。そこで、この力を必要としない機構として、著者等は、図3(c)に示すようなワイヤのうちの1本を、能動直進対偶有する剛体リンクからなる押し出し機構に置き換える方法を提案した⁽⁷⁾。このように押し出し機構を組み込んだパラレルワイヤ駆動機構として、7本のワイヤのうち、3本をシリンダに置き換えた6自由度の吊り下げクレーン機構がある⁽⁸⁾。本機構は押し出し機構が1本であること、押し出し機構をアクチュエータを用いて能動的に駆動するのではなく、定荷重ばねを用いて、受動的に使用することが異なる。

このようにワイヤだけでなく、剛体リンクを使用した力覚提示装置として、シリアルリンク機構を関節に配置したアクチュエータ駆動するのではなく、剛体リンクに複数のワイヤを取り付け、その張力で剛体リンクを駆動する機構がある⁽⁹⁾。そこで、この考えをパラレル機構に適用することを考え、広い作業領域を有するパラレル機構として著者等が提案した3-USR形パラレル機構⁽¹⁰⁾をワイヤで駆動する図4に示す機構を提案する。この機構は3つの連結連鎖を有し、それぞれ2自由度を有するため、各連結連鎖は3本のワイヤで駆動する必要があり、合計9本のワイヤが必要となるが、そのうちの3本を互いの連結連鎖間を連結する定荷重ばねに置き換えることで、6つのワイヤで駆動される冗長駆動でない駆動系とする。この機構は、装着型ではなく、据置型の力覚提示装置として考えている。

4. パラレル機構の構成要素の提案

4.1 ワイヤ駆動機構

第3章では、装着型・据置型の2種類のワイヤ駆動のインピーダンス型力覚提示装置用パラレル機構を提案した。これらの機構は高いバックドライブ性を有するワイヤ巻取機構が必要である。高いバックドライブ性を実現する方法として減速機を使用せず、小径のプーリでワイヤを巻き取ることを考えた。この小径プーリには、その慣性を小さくするため、駆動モータの出力軸を直接用いることを考えた。この場合、ワイヤとプーリの接触長さが短いため、ワイヤとプーリ間の摩擦力が小さくなり、大きなワイヤ張力を得ることができない。小径プーリでこの接触長さを確保する方法としては、プーリにワイヤを複数巻きつける方法が考えられる。しかし、この場合には図5(a)に示すように、ワイヤの巻取に従いワイヤがプーリに巻きつく位置が軸方向

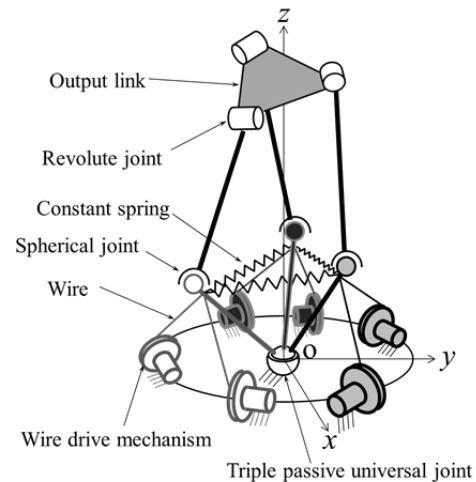


Fig.4 3-USR parallel mechanism driven by 6 wires

に変化する．そのため，軸方向に長いプーリが必要となるだけでなく，ワイヤの位置の変化に起因して，ワイヤの長さが駆動プーリの角変位と比例しなくなる．そこで，著者等は図 5(b)に示すようにアイドラプーリを駆動プーリと平行に配置し，ワイヤをこれら 2つのプーリに交互に巻きつける方法を提案した⁷⁾．アイドラプーリを用いるだけでは，ワイヤの巻取に伴う軸方向の移動が生じることから，ワイヤの位置を拘束するために 2つのプーリの間にスリットを設けた板を配置した．さらに，駆動プーリとワイヤの接触長さを大きくするために，ワイヤを 2つのプーリに 8の字を描くように巻きつけた．そして，この巻取機構の試作機を設計・製作し，ワイヤの巻取位置の変化が生じ無いことおよび，巻き取り回数を増やすことでワイヤ張力を大きくできることを確認した．しかし，スリットとワイヤの接触による摩擦力が大きいこと，および，ワイヤが破断した場合に改めてワイヤを取り付ける場合の取り回しが困難であり整備性が悪いという問題も分かった．

そこで，本報告では，このワイヤ巻取機構を修正した，摩擦損失が小さくワイヤの取り回しが容易で整備性の良い巻取機構を提案する．提案するワイヤ巻取機構の構成を図 6 に示す．この機構は摩擦の原因となるスリットを設けた板を用いずにワイヤの位置を拘束している．駆動プーリは，その直径および慣性を小さくするため，モータの出力軸を直接使用する．そして，図 6(a)に示すように，アイドラプーリに平行に複数のつばを配置し，このつばの間にワイヤを巻きつかせることで，ワイヤの位置を拘束する．さらに整備性を良くするため，図 6(b)に示すように，カバーを極力排除し，プーリを極力露出するように設計した．また，この機構では駆動プーリに巻きつけるワイヤの長さは一定になるため，巻き取ったワイヤを保管するために別途巻取プーリを用意する．巻取プーリはワイヤに張力を与える為，定荷重ばねで巻き取りトルクを発生させる．

4.2 空間ワイヤ繰出し機構

高精度に運動制御するためには，ワイヤがどの方向へ繰り出されても，ワイヤの繰出し位置が変化しないワイヤ繰

出し機構が必要である．また，高精度に力制御するためには，ワイヤとの摩擦の小さいワイヤ繰出し機構が必要である．多くのワイヤ駆動機構すり鉢状の穴からワイヤが繰出されるワイヤ繰出し機構を用いている．しかし，この穴の直径はワイヤの直径よりも大きく，フィレットが付いているため，ワイヤの方向の変化に伴い，ワイヤ繰出し位置およびワイヤの長さ変化する．また，ワイヤと穴とは滑り接触なので，摩擦も大きい．そこで，これらの問題を解決する方法として，プーリを用いてワイヤと機構を転がり接触とする繰出し機構を提案する．この機構は 3次元の平行機構に対応するため，パン・チルト機構と組み合わせる．そして，パン・チルト機構の運動によるワイヤの長さの変化が発生しないようにするため，パン・チルト，各回転軸の中心を通るようにワイヤを配置する．提案する空間ワイヤ繰出し機構を図 7 に示す．

繰出し部は機構は慣性を小さくするため，製作可能な大きさで可能な限り小さくすることを意識して設計した．チルト機構は自重をキャンセルするために，バランスウェイトを取り付けた．構造を単純かつ摩擦抵抗を小さくするために，プーリは全て小径深溝玉軸受とし，ワイヤの曲げ抵抗を含む摩擦抵抗を少なくするため，プーリは必要最低限の数とし，ワイヤの方向を変えるためのプーリは全部で 3つである．また，ワイヤの方向を変えるプーリの径はできるだけ大きいものを採用した．

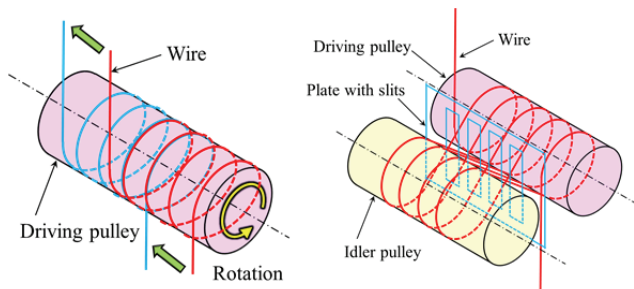
5. 試作機の設計・製作と評価実験

5.1 空間ワイヤ繰出し機構

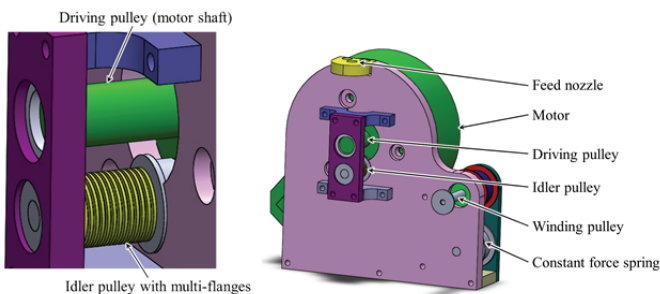
試作機は可動範囲がパンは±180°，チルトは水平から±45°となるように設計した．試作機の全長 52mm，全幅 59mm，全高 52.5mm である．本機構は，ワイヤの方向の変化に伴うワイヤの長さの変化が小さい機構として設計したものであるため，ワイヤの方向の変化に伴うワイヤの長さの変化 ΔL を実験により把握した．実験装置の外観を図 8 に示す．パン方向の角度 θ は 0°，90°，180° の 3通り，チルト方向の角度 ϕ は -45° から 45° まで 10° ずつ 9通り設定し，各設定で 5回測定し平均値を求めた．得られた実験結果を図 8 に示す．パンが大きくなるほどワイヤの変位は大きくなるが，最大でも 2 μ m と孔を用いた繰出し機構のワイヤと孔の隙間の大きさよりも小さい誤差であることがわかる．

5.2 ワイヤ駆動機構

プーリの径を小さくはするものの，駆動モータに大きなトルクが必要とされることから，駆動モータには，小形でトルクの大きい Maxon 製の EC-flat90 を採用した．駆動プーリの径を小さくするため，このモータの出力軸をそのまま駆動プーリとする．その直径は 10mm である．アイドラプーリは，段付きリングを複数重ねることで製作し，その



(a)Only driving pulley (b)Driving pulley with idler pulley
Fig.5 Multi-twining driving pulley with small diameter



(a)Driving pulley (b)Composition
Fig.6 Composition of the wire driving mechanism

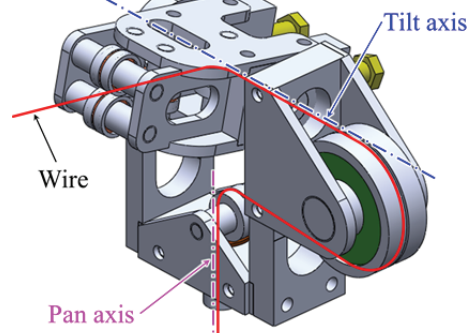


Fig.7 Spatial wire feed mechanism

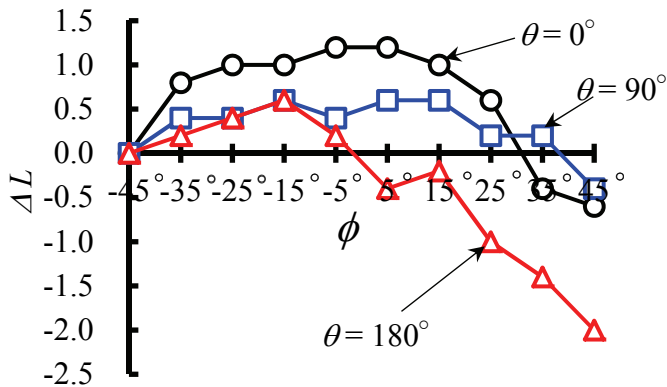


Fig.8 Relationship between pan angle ϕ and wire displacement ΔL

直径は 10mm，溝の幅は 1mm，つばの幅は 0.5mm で，15mm の軸長に 10 のスリットを設けている。駆動プーリとアイドラプーリの軸間が短い程駆動プーリとワイヤの接触長さが長くなることから，この軸間は 2mm とした。

5.3 軌道追従実験

提案したワイヤ駆動機構の特性を把握するために，図 9 に示す 2 次元の平行ワイヤ駆動機構の実験機を製作した。作業領域として $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ の正方形とし，2 つのワイヤ駆動機構の距離は 0.5m とし，押し出し機構は 2 つのワイヤ駆動機構の中間に配置した。この実験機を用いて 100mm 直線運動を行わせた場合の，軌跡を図 10 に示す。この軌跡は出力節の運動をカメラを用いて鉛直真上から動画を撮影し，フォーム分析ソフトの Kinovea を使用し作成した。図より実験機はほぼ直線の軌跡を実現したが，直線誤差は約 4.6mm あり，力覚提示装置としての十分な精度を実現できなかった。この原因として，押し出し機構の直進関節に想定以上のモーメント荷重がかかり，滑らかに運動することができなかったことがある。また，まだ把握していないが，ワイヤと駆動プーリ間の滑りも考えられる。

6. 結言

本報告ではスキルアシストシステムの力覚提示装置として 2 種類のワイヤ駆動の平行機構を提案し，その構成要素としてワイヤ繰出し機構およびワイヤ駆動機構を提案し，実験によりその評価を行った。得られた結果を以下に述べる。

- (1) スキルアシストシステムの力覚提示装置として，ワイヤの 1 本を押し出し機構に置き換えた平行ワイヤ駆動機構と，ワイヤと定荷重ばねにより駆動される 3-USR 型平行機構を提案した。
- (2) 提案した 2 つのワイヤ駆動の平行機構の，摩擦損失が小さく，ワイヤの方向によりワイヤの長さが変化しない巻取機構として，パン・チルト機構の回転軸にワイヤを通し，プーリによりワイヤの運動方向を変化させる機構を提案した。また，実験により提案した機構の試作機のパン・チルトの運動によるワイヤの長さの変化が $2\mu\text{m}$ 以下であり，提案した機構が有効であることがわかった。
- (3) 摩擦損失が小さく，整備性の良いワイヤ巻取機構として，複数のつばを有するアイドラプーリと，ワイヤのカバーを極力排除した構造を提案した。さらに，ワイヤ張力を確保するために，プーリの径を小さく，巻き取り数を増やし，駆動プーリとアイドラプーリとの軸間距離を短くする設計を行った試作機の設計・製作を行った。
- (4) 試作したワイヤ駆動機構を用いた 2 自由度平面平行

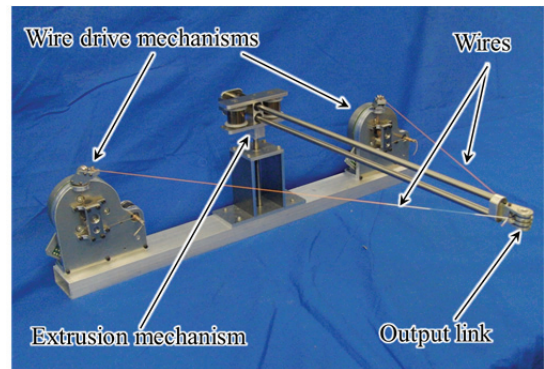


Fig.9 Prototype of 2D parallel wire drive mechanism with extrusion mechanism

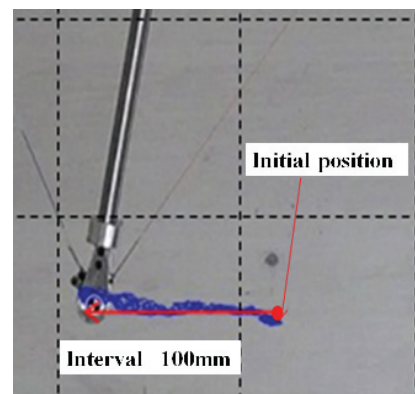


Fig.10 Trajectory of the prototype

ルワイヤ駆動機構の実験機を製作し，100mm の直線運動を行わせた結果，ほぼ直線運動を実現したが，直線誤差が 4.6mm あり，その原因として，押し出し機構の運動が滑らかで無いこと，および，ワイヤ駆動機構の駆動プーリとワイヤ間の滑りを推測した。

参考文献

- (1) 荒田順平，平行メカニズムのハプティクス応用，日本ロボット学会誌，Vol. 30，No. 2，pp. 144-147，2012.
- (2) 荒田，近藤，坂口，藤本，平行リンク機構を用いた力覚提示装置 DELTA-4 の開発，日本ロボット学会誌，Vol. 27，No. 8，pp. 917-925，2009.
- (3) Haptic Master，http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/hapticmaster/hapticmaster_j.html
- (4) D. Chablat and P. Wenger, A Six Degree-Of-Freedom Haptic Device Based on the Orthoglide and Hybrid Agile Eye, Proc. of ASME International Design Engineering Technical Conferences, abs/0707.3550, 2006.
- (5) 佐藤誠，“ストリング型ハプティックインタフェース SPIDAR の研究開発を振り返る”，映像情報メディア学会技術報告，Vol.37, No56, p35, 2013.
- (6) 永井，銭亦，赤羽，佐藤“ワイヤ駆動型ウェアラブル 6 自由度力覚提示デバイス SPIDAR-W”，情報処理学会インタラクティブ 2016, 161B38.
- (7) 村上，富内，樋口，“押し出し機構を有する平行ワイヤ機構を用いた力覚提示装置の設計”，ロボメカ講演会講演論文集，2015.
- (8) 前，新井，上島，井上，宮脇，小谷内，“ハイブリッド駆動平行アームの張力補正と外力推定”，ロボット学会誌 Vol.21, No.4, p.436, 2003.
- (9) 木野仁他，シリアルリンク機構/平行ワイヤ駆動システムによる力覚呈示装置の開発，日本バーチャリアリティ学会論文誌，Vol. 7, No. 1, pp. 3-8, 2002.
- (10) 小林，菅原，樋口，“大作業領域を有する力覚提示用 3-USR 形平行メカニズムの開発”，ロボメカ講演論文集，2016.