

令和元年6月4日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06048

研究課題名(和文) スキルアシストシステムのための6自由度ハイブリッドパラレル機構の開発

研究課題名(英文) Development of 3-USR Hybrid Parallel Mechanism for Haptic Device

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：スキルアシストシステムの力覚提示装置への適用を目的とした、機構の透明性と高剛性を両立すると同時に、機構の大きさに対して広い実作業領域を有する冗長駆動でない6自由度空間パラレルメカニズムを開発する。この機構として、ユニバーサル対偶、球対偶、回転対偶からなる連結連鎖を3本有する3-USR形機構を提案する。この機構の入力となる3つのユニバーサル対偶は全ての回転軸が一点で交わるように配置し、これを実現する機構として、リンクとワイヤを組合せた2自由度球面ハイブリッドパラレル機構を提案する。そして、この機構を設計するための運動伝達性、透明性、剛性に関する評価指標と力覚提示装置に適した駆動系を提案する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、力覚提示装置に適したパラレル機構の特長を活かした広い実作業領域を有するパラレル機構、多重球面関節のような高性能機械要素や高透明性と高剛性を両立する機構、運動伝達性と干渉を考慮した設計方法、緻密な作業を容易とするスキルアシスト方法、が期待できる。さらに、提案したパラレル機構は力覚提示装置だけでなく、広い作業領域を有することから、汎用的な産業用ロボットへの適用も期待できる。また、これに用いられる高性能機械要素や設計法は、他の機構への適用も期待できる。

研究成果の概要(英文)：A novel 3-USR parallel mechanism with large work space for haptic devices has been proposed. To realize high structural transparency, these joints are composed of 2 D.O.F. spherical parallel mechanisms. The spherical parallel mechanism is composed of 2 rigid links (output link and stationary link) and three wires. The output link is connected stationary link by universal joint and is driven by three wires. In order to realize large work space, center points of three universal joints must be placed in condition that their center points are coincident. This report proposes two evaluation indices of this in-parallel wire-driven spherical mechanism. These indices are proposed based on motion transmissibility index TIW of normal in-parallel wire-driven mechanism.

研究分野：機構設計

キーワード：パラレル機構 ハイブリッド機構 機構設計 力覚提示装置

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

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。これに対し、ロボットは高い運動や力の精度や再現を有する。そこで、これらの人とロボットの有する特性を組合せることで、人だけでは、あるいはロボットだけでは実現困難な精緻な高いスキルが必要な作業を実現することを考え、本研究ではこれを実現するシステムをスキルアシストシステムと呼び、その構成を図1に示す。本研究はこれの中で重要なカギとなる技術と考える力覚提示装置を対象とする。特に、スキルアシストシステムの力覚提示装置は、人の実作業を妨げてはならず、人とだけでなく作業対象とも干渉しない機構が必要となる。また、実作業に対応した大きさの力も発生できる必要がある。しかし、従来の力覚提示装置は仮想空間内での作業を前提としており、作業対象物との干渉を考慮していない。また、提示する力も実作業での力と比べて小さい。スキルアシストシステムの力覚提示装置の研究としては、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や⁽²⁾、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およびその設計法および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。

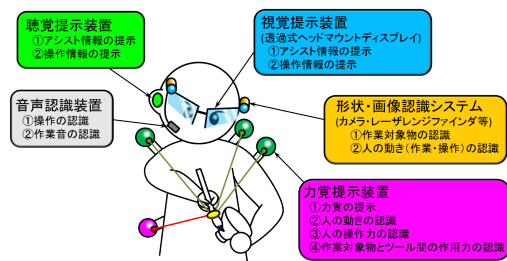


Fig.1 スキルアシストシステムの構成

そこで本研究は、パラレル機構を用いたスキルアシストシステム用の力覚提示装置とその設計法の提案およびスキルアシスト方法の提案を行う。

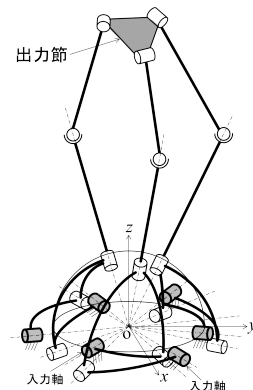


Fig.2 3-USR パラレル機構 (5 節球面機構入力)

2. 研究の目的

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ため⁽⁴⁾、パラレル機構を用いた多く力覚提示装置が提案、実用化されている。しかし、パラレル機構はシリアル機構と比較して機構の大きさに対して実作業領域が狭い。そのため力覚提示装置用のパラレル機構では、より広い実作業領域を実現するために、冗長駆動にする⁽⁵⁾⁽⁶⁾、パラレル機構を複数組み合わせる⁽⁷⁾、シリアル機構とパラレル機構を組み合わせる方法⁽⁸⁾が提案されている。本研究では、従来のパラレル機構よりも、上述のパラレル機構が有する力覚提示装置に適した特性を活かせるパラレル機構として、他の機構と組み合わせることなく、一つの機構で広い実作業領域を有する冗長駆動でないパラレル機構を開発することを目的とする。申請者は広い作業領域を有するパラレル機構として、図2に示す3つのユニバーサル対偶(U)の中心を一致させた3-USR形パラレル機構を提案している。この機構で出力に大きな力を実現するためには、入力トルクが必要なため高減速比の減速機が必要となり、機構透明性が損なわれる。そこで、シリアル機構のリンクを直接複数のワイヤで駆動するリンク・ワイヤハイブリッド機構に着目し⁽⁹⁾、これを球面機構に適用した図3に示す2自由度ワイヤ球面機構を考えた。パラレルワイヤ機構は自由度+1本のワイヤ(アクチュエータ)を必要とする冗長駆動機構だが、冗長駆動としないために、ワイヤの一つを定荷重ばねにすることを考えている。さらに、提案するパラレル機構の入力として用いる場合は、他の球面機構のリンクを追い越した位置にリンクが行くことが無いため、中心を一致させ、かつ、ばね、リンク、ワイヤが互いに干渉することなくこの機構を3つ配置する方法として、3つの機構のリンクを互いにばねで接続した図4に示す機構を考えた。

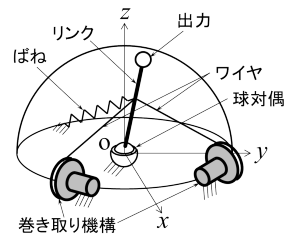


Fig.3 リンク・ワイヤハイブリッド球面機構

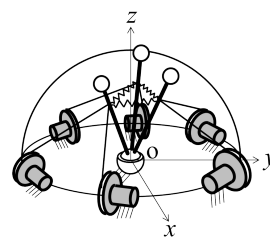


Fig.4 ハイブリッド球面機構 (同一中心の3機構)

3. 研究の方法

本研究では、スキルアシストシステム用のパラレル機構を開発するために、以下の課題に取り組む。

(1)中心を一致させた多重球面関節の提案

提案する機構の実現には、中心を一致させた複数の球面関節が必要である。この関節は本機構だけでなく、Stewart Platformなど他のパラレル機構にも有益である。一つの候補は図2に示す、5節球面機構の3節だけ利用する方法であるが、片持ち構造で高剛性、高精度を確保す

ることが難しいと考え、半径の異なる円弧スライダを用いてこれを構成する方法を提案する。

(2) 機構の運動伝達性の評価指標と、これと干渉を考慮した設計法の提案

提案する機構の運動伝達性は、リンク・ワイヤのハイブリッド球面機構だけでなく、上述の球面関節に対しても、この球面機構をユニバーサル対偶とみなした 3-USR 機構としても評価する必要がある。そこで、これらを同時に評価した機構を全体の運動伝達性を評価できる一つの指標を提案する。そして、この指標と機構内での干渉を考慮した広い実作業領域を有する機構設計法を提案する。

(3) 高透明性と高剛性とを両立する駆動機構の提案

高透明性を実現するために、ワイヤパラレル機構を用いた力覚提示装置⁽¹⁰⁾やワイヤを用いた減速機⁽⁵⁾⁽⁸⁾が提案されている。本研究では、さらに、高透明性を実現するために、駆動機構にクラッチを用いて出力節とアクチュエータとを切離すこと⁽¹¹⁾、駆動機構の剛性を能動的に変化させる駆動機構を提案する。そして、これらの有効性の評価と設計方法の提案を行う。

(4) スキルアシストシステム用力覚提示装置としてのパラレル機構の開発

上述のように、スキルアシストシステムでは、力覚提示装置としての性能の他に、比較的大きな発生力と、作業対象や人と干渉することの無い機構、および人の視界を妨げない機構が必要となる。本研究では、特に人の精緻な作業を実現することを考えており、これは、前腕の一部を机のような静止系に固定し、手首および指の動きにより行っていると考えられる。そこで、上述の機構およびその構成要素の小形・高剛性化・高精度化を行い、デスクトップ型の小形で精密な運動と力を実現する機構を開発する。

(5) 精緻な人の作業の観察の把握とスキルアシスト法の提案

人の精緻な作業をアシストする方法としては、仮想ツール、仮想トレーナー、仮想支持台等が考えられる。また、仮想インピーダンスを与えることも考えられる。そこで、まず、開発した機構を用いて、これらのアシスト方法の有効性を把握する。さらに、人の精緻な作業を観察し、精度の良い人と悪い人の運動を比較することで、人の作業の精度に関係する人の動きを把握する。そして、この観察に基づき新たなスキルアシスト方法を提案する。

< 引用文献 >

- (1) 山田陽滋, “生活支援に向けた工学技術の応用”, 理学療法学, Vol.32, No.4, p245
- (2) 日下聖他, “周期運動追従スキル向上のためのセミアクティブアシスト機構の補助力位相差制限法によるスキルアシスト効率制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.2, pp.198-206, 2014.
- (3) 立矢宏他, “受動関節を有するロボットアームを用いたスキルアシスト”, 機素潤滑設計部門講演会講演論文集, pp.127-128, 2014
- (4) 荒田順平, “パラレル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.
- (5) 荒田, 近藤, 坂口, 藤本, “パラレル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.
- (6) Haptic Master, http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/hapticmaster/hapticmaster_j.html
- (7) D.Chablat, 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.
- (8) Phantom premium, SensAble Technologies, <http://www.sensable.com/>
- (9) 木野仁他, “シリアルリンク機構/パラレルワイヤ駆動システムによる力覚呈示装置の開発”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.7, No.1, pp.3-8, 2002.
- (10) 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.
- (11) 原口真他, “MR 流体ブレーキを用いた 2 次元パッシブ型力覚提示システムの開発に関する基礎研究”, Journal of JSEM, Vol.10, No.2, pp.

4. 研究成果

(1) ハイブリッドパラレル機構の構成

提案する 3-USR 形パラレル機構は中心を一致させて配置する 3 つのユニバーサル対偶は静止節対偶であることから、これらを入力とする。従って、このユニバーサル対偶は能動対偶となる。このユニバーサル能動対偶として 2 自由度球面パラレル機構を用いた図 1 に示すパラレル機構が考えられる。しかし、この能動対偶の駆動には大きなトルクが必要なため、高減速機の減速比が必要となる。そのため、バックドライブ性が低く、力覚提示装置に必要な機構透明性を実現しにくい。そこで、高い機構透明性を実現するためにシリアル機構のリンクを直接複数のワイヤで駆動するリンク・ワイヤハイブリッド機構に着目し、入力節の駆動に高減速比の減速機を必要としないパラレル機構であるワイヤと剛体リンクからなるインピーダンス型力覚提示装置用 3-USR 形ハイブリッドパラレル機構を提案した。この機構は、静止節上に 2 自由度球面パラレル機構が 3 つ配置された複雑な機構になっており、大きな実作業領域を実現するためには、これら 3 つの球面パラレル機構のリンク間の干渉を考慮した設計が必要となる。

そこで、単純な構造で駆動に高減速比の減速機を必要としない 2 自由度球面機構として、シリアル機構のリンクを直接複数のワイヤで駆動するシリアルリンク機構/平行ワイヤ駆動システムに着目し、図 5 に示すワイヤと剛体リンクのハイブリッド構成の 2 自由度球面平行機構を提案した。この機構は剛体の出力節を静止節とユニバーサル対偶で接続し、出力節を 3 本のワイヤで駆動する。なお、冗長駆動としないために、ワイヤの 1 本を、ばねの長さに張力が依存しない定荷重ばねにすることを考えた。

この 2 自由度球面平行機構を 3 つ配置したハイブリッド 3-USR 形平行機構を提案した。その構成を図 6 に示す。この機構は、他の球面平行機構および出力節との干渉を無くすと同時に、作業領域内での運動伝達性も向上させることを考え、定荷重ばねは他の 2 つの球面機構の出力節と互いに接続する。そして、この定荷重ばねとリンクとの干渉を避けるために、リンクの内側に配置する。

(2)ハイブリッド球面平行機構の運動伝達性

機構の構成と機構定数

本解析では、3 重ユニバーサル関節で考えず、まず、一つのユニバーサル関節のみからなる 2 自由度球面機構について考える。解析対象とする機構の構成および機構定数を図 7 のように考える。まず、ユニバーサル関節の中心を原点 O とし、鉛直上向きに Z 軸をとる $O-XYZ$ 座標系を考える。受動ユニバーサル関節は原点に配置する。そして、ワイヤ巻取機構のワイヤ繰出し部は、図 7 のように $O-XY$ 平面に平行で、 $O-XY$ 平面から Z 軸方向に高さ h の平面上にあるものとする。また、等方性を確保するために、ワイヤ繰出し部は、 Z 軸を中心とする半径 R の円周上の Z 軸に対称な位置、つまり、各ワイヤ繰出し部間の角度が 120° となる位置に配置する。剛体リンクの長さを L とし、その先端 P を出力点とし、ここに 3 本のワイヤを取り付けることで 2 自由度機構を構成する。解析を行うに当たり、球面機構は角運動のみ行うことから、他の長さはすべて剛体リンクの長さ L で基準化する。出力点 P の姿勢は、パン角 θ とチルト角 ϕ で表す。

空間機構としての運動伝達指数

平行ワイヤ駆動機構の運動伝達性を評価する運動伝達指数として TI_w が提案されている。本機構の運動伝達性も TI_w に基づき考える。本機構は剛体リンクがあるため、空間機構の TI_w をそのまま適用できない。そこで、 TI_w を適用するために、剛体リンクを図 8 に示すように、剛体リンクの反対側に張力を発生する仮想的なワイヤに置き換えた全てワイヤから構成される機構を考える。この場合、例えばワイヤ 1 に着目すると、機構が成立するためには、仮想ワイヤとワイヤ 2 から構成される平面 $A_{0,2}$ 、ワイヤ 2 とワイヤ 3 から構成される平面 $A_{2,3}$ 、ワイヤ 3 と仮想ワイヤから構成される平面 $A_{3,0}$ に囲まれた領域の中にワイヤ 1 が無ければならない。そして、この領域の境界となる 3 つの平面 $A_{0,2}$ 、 $A_{2,3}$ 、 $A_{3,0}$ からワイヤ 1 が離れているほど運動伝達性が良いと考え、これら 3 つの平面とワイヤ 1 とのなす角をそれぞれ $\lambda_{1,1}$ 、 $\lambda_{1,2}$ 、 $\lambda_{1,3}$ とする。これをバーチャルワイヤも含む他の 3 本のワイヤにも同様に適用し 12 個の角度 $\lambda_{i,j}$ ($i=0,1,2,3$), ($j=1,2,3$) を考え、その正弦の最小値を TI_w とする。なお、一つでもワイヤが、機構が成立するための領域の中に無い場合には $TI_w = 0$ とする。

しかし、 TI_w は図 9 に示すように仮想ワイヤ以外の 3 つのワイヤが同一平面上にある場合、剛体リンク方向への運動を行えないとされ、 $TI_w = 0$ となる。しかし、本機構は剛体リンク方向への運動を行わないため、これを考慮する必要がない。そこで、角度 $\lambda_{i,j}$ の中で、仮想ワイヤを含まない平面 $A_{m,n}$ ($m, n=1,2,3$) とワイヤとのなす角を含めない角度の正弦の最小値を本機構の運動伝達指数 TI_H とする。

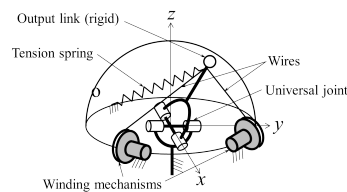


Fig.5 2 自由度ハイブリッド球面平行機構の構成

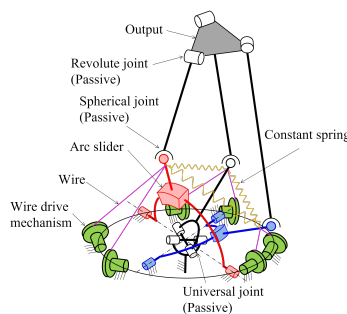


Fig.6 3-USR 形ハイブリッド機構の構成

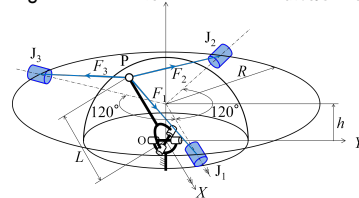


Fig.7 ハイブリッド球面機構の機構定数

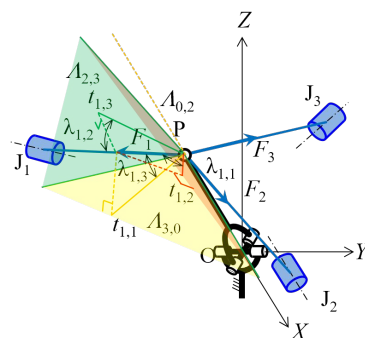


Fig.8 運動伝達指数(球面機構)

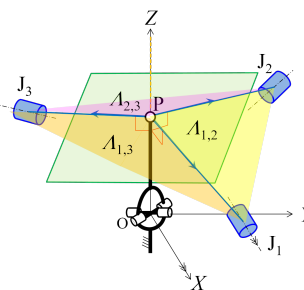


Fig.9 同一平面上の仮想ワイヤ

過拘束機構としての運動伝達性

運動伝達指数は球面平行機構を空間機構としてとらえて求めたが、本機構は2自由度球面機構であり、2自由度平面機構と同じ過拘束機構である。そこで、平面2自由度平行ワイヤ駆動機構の運動伝達指数を本機構に適用することを考える。球面ワイヤ平行駆動機構の場合、3本のワイヤが全て剛体リンクに垂直な平面上に存在することはまれである。そこで、図10のように、各ワイヤの単位大きさに当りの張力 F_i ($i=1,2,3$)を考え、これらの張力の剛体リンクに垂直な平面への投影したものをそれぞれ f_i ($i=1,2,3$)とする。この平面に対してワイヤが垂直に近い、つまり、剛体リンクにワイヤが平行に近くなると、張力の平面への投影 f_i が小さくなる。そして、これらの剛体リンクに垂直な平面上にある f_i に対して、図11に示す2自由度平面平行ワイヤ駆動機構の運動伝達指数 TI_W の考え方を適用する。ただし、2自由度平面平行ワイヤ駆動機構の場合は、角度 λ_i ($i=1,2,3$)のみを考慮してその正弦の最小値を TI_W としていたが、上述のように、 f_i の大きさも運動伝達性に影響することから、これも考慮に入れ、運動伝達指数 TI_H' を以下のように考える。

$$TI_H' = \min(f_1 \sin \lambda_1, f_2 \sin \lambda_2, f_3 \sin \lambda_3) \quad \dots(1)$$

(3)2つの運動伝達指数での解析結果

まず、巻取機構の配置半径 $R=2$ 、巻取機構の配置高さ $h=0.3$ とした場合の空間機構としての運動伝達指数 TI_H と過拘束機構としての運動伝達指数 TI_H' との比較を行った。 TI_H を用いた場合の解析結果を図12、 TI_H' を用いた場合の解析結果を図13に示す。図12と図13は円周方向にパン角 θ を 0° から 360° まで取り、半径方向にチルト角 ϕ を取った運動伝達指数の分布を示したものである。

両方のグラフともよく似た傾向を示しており、特に、運動伝達指数が小さい領域の分布は一致している。しかし、運動伝達指数が0.4以上になると、空間機構としての TI_H の方の領域が小さくなる。これは、剛体リンクに着目した場合の運動伝達性の評価の影響によるものと考えられる。どちらの評価指標の方が良いかについては、実験による評価が必要だと考えるが、本設計では、 TI_H の方がより厳しい条件であることから、以後の解析は TI_H を用いることとし、その結果を示す。また、本解析では、他の研究でも多く用いられている $TI_H \geq 0.5$ の領域を実作業領域とする。

まず、 $h=0.3$ の場合の巻取機構の配置半径 R と実作業領域の関係性を調べた。実作業領域の広さの指標として、実作業領域の境界の ϕ の平均値 ϕ_{ave} を採用し、半径 R との関係性を調べた結果を図14に示す。 ϕ_{ave} は 60° に漸近していき、 $R=2$ 以降は、 R の増加に対する ϕ_{ave} の増加が小さくなるため、機構の大きさを考えると $R=2$ あたりの値が適当ではないかと考える。

次に、 $R=2$ の場合の巻取機構の配置高さ h と実作業領域の関係性を調べた。高さ h と ϕ の平均値 ϕ_{ave} との関係性を調べた結果を図15に示す。図15より $h=0.35$ の時に実作業領域が最も広くなることが分かる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計9件)

小林 亮介、樋口 勝、力覚提示装置用3-USR形ハイブリッド平行機構の設計、第18

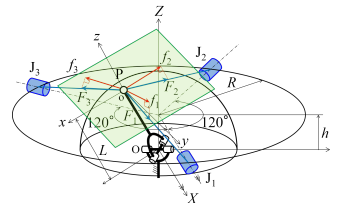


Fig.10 運動伝達指数(過高速機構)

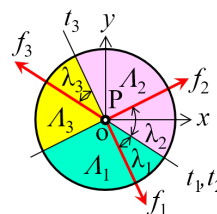


Fig.11 自由度ワイヤ駆動機構の運動伝達指数

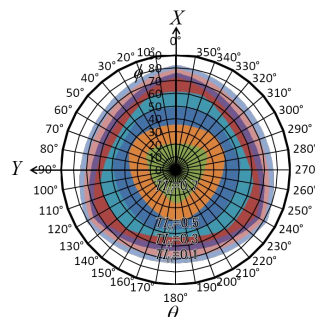


Fig.12 TI_H

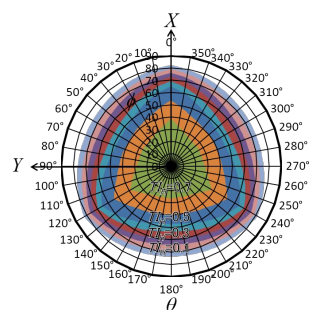


Fig.13 TI_H'

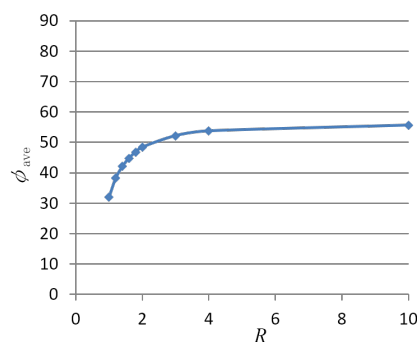


Fig.14 半径 R と作業領域 ϕ_{ave} の関係

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、2017

小林 亮介、樋口 勝、力覚提示装置用 3-USR 形ハイブリッドパラレル機構の設計、日本機械学会 2017 年度年次大会、2017

Ryosuke Kobayashi, Masaru Higuchi, Yuichi Nakazato, Kensuke Takita, Motion Transmissibility Analysis of 3-USR Parallel Mechanism, Proc. ICMDT 2017, 2017

小林 亮介、樋口 勝、5 節球面パラレル機構の逆運動学と運動伝達性の解析、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017、2017

小林 亮介、樋口 勝、3-USR 形空間 6 自由度パラレルメカニズムの開発、第 17 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、2016

小林 亮介、樋口 勝、力覚提示装置用ワイヤ・剛体リンクハイブリッドパラレル機構の開発、日本機械学会 2016 年度年次大会、2016

小林 亮介、樋口 勝、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、LIFE2016、2016

小林 亮介、菅原 陸、樋口 勝、大作業領域を有する力覚提示装置用 3-USR 形パラレルメカニズムの開発、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016、2016

小林 亮介、樋口 勝、3-USR 形空間 6 自由度ハイブリッドパラレルメカニズムの開発、第 16 回機素潤滑設計部門講演会、2016

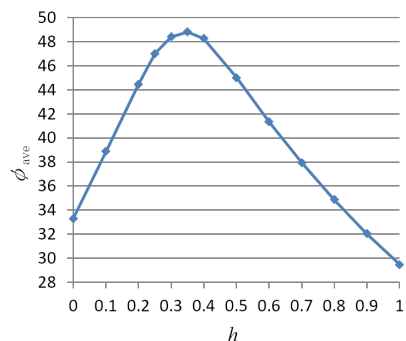


Fig.15 配置高さ h と作業領域 ϕ_{ave} の関係

〔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

<https://www.nit.ac.jp/lab/robot/lab1-3.html>

6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。