

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04274

研究課題名（和文）予測質量推定及び質量知覚制御に基づくパワーアシスト装置の違和感低減手法の開発

研究課題名（英文）Development of a Discomfort Reduction Method for Power Assist Devices Based on Predictive Mass Estimation and Mass Perception Control

研究代表者

池浦 良淳（Ikeura, Ryojun）

三重大学・工学研究科・教授

研究者番号：20232168

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：パワーアシスト装置は現在の高齢社会に必需となるが、操作に違和感や恐怖感を抱き、それによる事故の発生は避けなくてはならない。本研究では、質量感覚における違和感や恐怖感の低減を目的として、人が操作前に予想する予測質量を決める要因である、運搬物体の大きさ、アシスト装置の外観、さらには、質量予測の時間変化について解析を行った。これらの要因を考慮して予測質量に近づけるよう、質量感覚の制御を行うことにより、操作時での違和感を低減できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パワーアシスト技術は現状の高齢社会において必須であるが、使用するのに違和感や恐怖感があっては、世の中に浸透させることは不可能である。従来研究では、操作した感覚をアンケート等で評価し、それに基づく制御方法の改良を行ってきたが試行錯誤が多く、体系的な改善は困難となっていた。そこで本研究では、違和感や恐怖感、使用者が予め予想した操作感と実際に感じた操作感との乖離によることに注目し、その操作感の隔たりを縮小することを試みたもので、その学術的及び社会的意義は非常に大きい。

研究成果の概要（英文）：Power-assist devices are a necessity in today's aging society, but accidents caused by a sense of discomfort or fear during operation must be avoided. In this study, we analyzed the factors that determine the predicted mass that a person expects before operation, such as the size of the object to be carried, the appearance of the power-assist device, and the time variation of the predicted mass, with the aim of reducing the sense of discomfort and fear in the sense of mass. By controlling the mass sensation to approach the predicted mass in consideration of these factors, we showed that it is possible to reduce the sense of discomfort during operation.

研究分野：マンマシンインターフェース

キーワード：ユーザーインターフェース マンマシンインターフェース パワーアシスト 違和感 質量感

1. 研究開始当初の背景

パワーアシスト装置は、大きな負担のかかる作業に対して、肉体的な負担を強いることなく操作者に作業を実行させることができるもので、高齢社会や女性の社会進出による社会情勢の変化により、その普及が急務となっている。例えば工場内では、高齢労働者や女性労働者の増加により、肉体的負担の少ない職場環境を整える必要性が急速に高まっている。それ以外にも介護現場での重筋作業の補助や日常生活での高齢者の肉体的補助への期待が非常に大きい。このような期待に対して、様々なパワーアシスト装置が開発されてきており、図1に示すような体に装着するタイプは実用化されてきている。しかし、このタイプは、筋肉の負担は減少するものの骨格への負担はあまり変わらず、椎間板ヘルニアなどの重篤な疾病を発症する可能性が高い。そこで、研究代表者は図2に示す主に工場内で利用できるパワーアシスト装置を開発している。これは、筋肉及び骨格への負担を軽減できるため、非常に有用と言えるが、普段の作業とは異なることから、必然的に違和感や恐怖感を操作者に与えることとなり、その低減が社会へ普及の鍵になる。



図1 装着型アシスト装置

研究代表者は、図2の工場用パワーアシスト装置を工場内の重量物運搬に適用した際、次の問題を確認している。具体的には、操作者が運搬物体を視覚的には「重い」と予想して操作した際、アシスト装置で必要以上に「軽く」操作できてしまうと、予想外の急激で危険な操作をして違和感や恐怖感を抱くことを確認している。これは、操作者が操作前に予測する予測質量感と操作中の体性感覚的質量感が大きく異なることが原因と考えられる。従って、予測質量感を推定し、それに基づく精緻な質量感制御がパワーアシスト装置の社会普及には必須の要件と言える。



図2 工業用パワーアシスト装置

心理学の分野では、把持した物体の体性感覚的質量知覚特性が様々な解析されている。質量知覚特性は、物体の質量のみに決まるのではなく、サイズや質感によって異なることが知られており(A.M.Gordon [1991])、例えば、同じ重量でも物体のサイズによって質量知覚特性が異なるシャルパンティエ効果はよく知られているところである。これは、同じ質量の物体を操作するにもかかわらず、体性感覚的質量感を変化させることができることを意味している。従って、人間の体性感覚的質量感の認識メカニズムを調べ、制御により予測質量感と体性感覚的質量感の相違を極力抑えることは可能であると言える。

研究代表者はこれらの観点のもと、操作力と質量知覚との関係に注目して、人間の質量知覚認識メカニズムの解析を、簡易的なパワーアシスト装置を用いて2007年より行ってきた。そして、次に示す手法を思いつくに至った。すなわち、図3のように物体を持って操作力を加えた場合、指先の皮膚及び皮下組織が変形するが、この変形が質量知覚の刺激となり、質量知覚を変更するには、皮下組織の変形を制御すべきとの結論に至った。

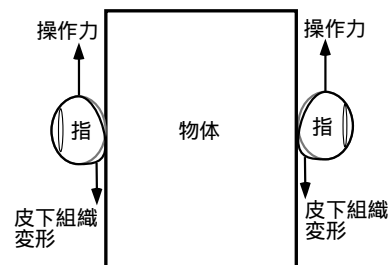


図3 操作力と皮下組織変形

2. 研究の目的

本課題の目的は、人間の体性感覚的質量感を制御できるアクチュエータと物体の運動制御を行うアクチュエータとを組み合わせた高度なパワーアシストシステムを開発し、さらに、人間の操作力から予測質量感を推定することで、予測質量感と体性感覚的質量感を高度に一致させることであり、それにより先の問題を解決することである。予測質量感の推定は、人間が操作力をかけ始めてから物体が動き出す前までに行う必要がある。つまり、物体が動き出す前に、予測質量感に合わせてパワーアシストの制御設定を変更し、予測質量感とパワーアシストの制御で実現する体性感覚的質量感を一致させる必要がある。このわずかな時間の間に、予測質量感を推定できるかが本課題の成功の鍵となる。

本研究の学術的な特色は、パワーアシスト装置操作時の人間の操作力から予測質量感を推定し、それに合わせて体性感覚的質量感特性を制御により変化させるところにある。心理学の分野では、人間の物体操作における知覚特性について多くの研究がなされてきたが、単体の物体を操作する点において、本研究のパワーアシストの制御とは本質的に異なる。さらに、予測質量感を推定すること及び制御により重量知覚特性を変化させることに至っては、我々の研究グループ以外では研究例がない分野であり、ここに大きな学術的特色、独創的な点がある。従来のパワーアシストシステムでは人間の重量知覚特性のミスマッチにより誤操作が発生し、しばしば操作に恐怖感を覚えることがあったが、当研究課題により誤操作を激減させた安全・安心なパワーアシ

ストシステムを構築できることが予想され、現場でのシステムの普及が進展すると考えられる。また、本手法は、例えば車のアシストシステムにも適用可能と考えられる。車のアシストシステムでは、ドライバの運転技術を補うためにステアリングやブレーキなどにアシスト力加わることが違和感となることが考えられる。本課題の結果は、車のアシストシステムにおける違和感の軽減にも適用可能であり、その意義は非常に大きいと考えられる。

3. 研究の方法

体性感覚的質量感を制御するには、人間の質量知覚特性を把握し、それを基に制御手法を考案しなければならない。そこで、(1) 物体持ち上げ運動の挙動解析、(2) 予測質量感推定手法の開発、(3) アシスト装置の視覚的影響の調査、(4) 視覚的質量感の変化挙動の解析を行った。具体的な研究方法としては、以下の通りである。(1) 物体持ち上げ運動の挙動解析では、持ち上げ物体の質量や大きさを変化させる一方、制御により物体の重力及び慣性は同じにした場合の人間の持ち上げ動作がどのように変化するかを調査した。実験装置として、応答性能の高いボイスコイルモータを用いた鉛直 1 自由度パワーアシストシステムを用いて、様々な質量及び大きさの異なる物体を取り付け、制御により一定の質量の物体と同じ運動を実現できるようにし、人間の持ち上げ力及び物体の位置を測定した。(2) 予測質量感推定手法の開発では、様々な物体質量に置いて、物体を持ち上げる際の人の持ち上げ操作力を計測し、ロジスティック回帰モデルを用いて予測質量感を推定する手法を開発した。(3) アシスト装置の視覚的影響の調査では、実機を想定したアシスト機構を内蔵するアシスト装置を制作し、アシスト機構が見える状態で機構は動作するがアシストされず本来の質量特性の運搬物体を操作する場合と、運搬物体単体を操作する場合の質量感覚について比較検討を行った。(4) 視覚的質量感の変化挙動の解析では、(1)と同様の装置を用いて、アシスト装置による物体運搬の数分程度の操作により、視覚的質量感と体性感覚的質量感に近づけた後、その慣れがどの程度継続するかを調査した。

4. 研究成果

(1) 物体持ち上げ運動の挙動解析

図4に実験の様子を示す。実験協力者は、ハンドルを持ち上げる操作を行う。まず装置に慣れた状態として力のかけ方が安定するまで持ち上げる(状態1)。次にハンドルの下側におもりを加え初回から5回持ち上げる(状態2)。この流れを3回行う。状態1と状態2はテーブル下部に設置したアシスト装置の設定により質量は同じである。

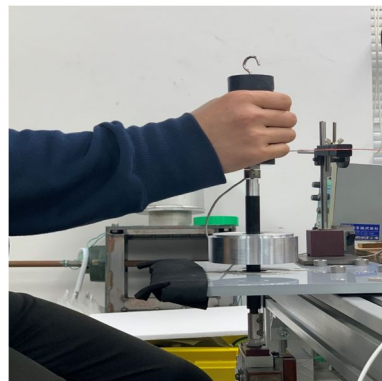


図4 実験の様子

結果を図5に示す。縦軸は操作力、横軸は時間である。試行の持ち上げ部分を切り取りそれぞれの最高値を1とし正規化した。状態1が黒線、状態2が3回実施した順番に赤青緑の線である。図より、状態2の1回目(赤線)は、状態1(黒線)と乖離しているが、3回目(緑線)は状態1と相違なくスムーズに持ち上げを行っていることが分かる。

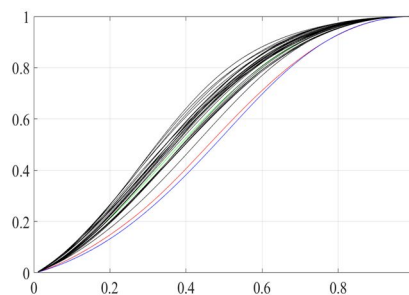


図5 操作力時間変化

このことから、見た目が変わったとしても質量を知覚することにより通常通りの持ち上げを行うことが分かった。これは、物体を見ることで予め質量が異なることが分かっても、知覚を重ねることで人間が予想する質量が変化していることを意味する。従って、この操作力変化を調べることにより、人間が予想する質量感が推定できる可能性が示唆された。

(2) 予測質量感推定手法の開発

実験装置全体の外観を図6に示す。実験装置は、持ち上げ力計測用力センサ、変位計測のための渦電流変位センサなどから構成される。実験装置には下部にボイスコイルモータが存在するが、本実験では使用しないものとする。実験したデータの計測および保存のためオシロスコープを用いる。実験装置はガイドにより鉛直方向のみに動くことができる機構となっている。



図6 実験装置の外観

本実験では持ち上げる物体を標準状態(6.7N)、2Nのおもりを1つ付加(8.7N)、2つ付加(10.7N)の3種類の重量を用意した。実験協力者は1人とし、事前準備として肘の高さと実験装置の台が同じ高さになるように椅子を調節し、腕を90度に曲げた姿勢で実験を行う。持ち上げる高さは5cmとし、各重量に対して20回分の持ち上げ操作のデータを取得する。

表1にロジスティック回帰モデルを用いて、3種類の質量を持ち上げた場合の推定結果を示す。表において、 $t[s]$ は持ち上

げ始めから何秒の時点のデータを利用して予測質量を判定したかを示しており、「6.7N or 8.7N」の行はその持ち上げデータは 6.7N か 8.7N のどちらであるかを判定した確率値である。この値が 0 に近いほど 6.7N,あるいは 1 に近いほど 8.7N であることを判定する。同様に、「8.7N or 10.7N」の行はそれぞれの確率値を示す Result の行は、その時間区間での判定結果を示す。最上段の表より、11 の時間区間において、6.7N は 11 区間、8.7N は 1 区間、10.7N は 0 区間となり、最終的な判定は、6.7N と正常に判定することが可能であることが分かった。他の質量、8.7N 及び 10.7N も表に示すように、同様に正常に判定できることは分かった。

表1 実験結果

	t [s]	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20
		6.7N or 8.7N	0.71	0.29	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.7N or 10.7N	0.27	0.10	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
result	8.7N	6.7N	6.7N	6.7N	6.7N	6.7N	6.7N	6.7N	6.7N	6.7N	6.7N	6.7N
	6.7N	8.7N	10.7N	Estimation result				Judgement				
	10	1	0	6.7N				OK				

	t [s]	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20
		6.7N or 8.7N	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8.7N or 10.7N	0.59	0.47	0.31	0.17	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
result	10.7N	8.7N	8.7N	8.7N	8.7N	8.7N	8.7N	8.7N	8.7N	8.7N	8.7N	8.7N
	6.7N	8.7N	10.7N	Estimation result				Judgement				
	0	10	1	8.7N				OK				

	t [s]	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20
		6.7N or 8.7N	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8.7N or 10.7N	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
result	10.7N	10.7N	10.7N	10.7N	10.7N	10.7N	10.7N	10.7N	10.7N	10.7N	10.7N	10.7N
	6.7N	8.7N	10.7N	Estimation result				Judgement				
	0	0	11	10.7N				OK				

(3) アシスト装置の視覚的影響の調査

図7に実験装置の外観を示す。実験装置は株式会社アイエイの直交ロボット ICSE2-YBG1S, ポジションコントローラ SCON-CB, インターフェース, コントローラ, 6軸力学センサを搭載した持ち上げ物体, アナログ距離センサと制御機器によって構成される。持ち上げ物体には垂直方向のガイドレールが取り付けられており拘束されているため垂直方向にのみ動く。直交ロボットにはカーテンを取り付けており装置を隠すことができる(図8)。持ち上げ物体の全質量は 3.00kg である。また実験開始前の初期位置はテーブルから 5mm 浮いた状態で維持し、この状態を初期状態とし、実験協力が持ち上げることで持ち上げ物体にテーブルが浮いた状態を維持しながら追従する。



図7 アシスト装置が見える状態

初めに直交ロボットを動かさずカーテンで隠した状態で、実験協者に1回持ち上げ動作を行ってもらい、その後、カーテンを開けて直交ロボットを動かす状態にして1回持ち上げ動作を行ってもらい、なお持ち上げ速度は一定にするためにメトロノームを使用し、一定に設定、実験協者には音が鳴ってから物体を持ち上げ始め、次の音が鳴る時点で初期位置から 20cm の高さに到達するように、座った状態で持ち上げてもらう。一連の動作を終えた後、直交ロボットを隠し動かない場合と比較して動いた場合の重量感覚をアンケートに回答してもらう。



図8 物体のみ見える状態

表2に結果を示す。アンケートは重い-軽いの項目とし、3が最も重い、-3が最も軽いとした。先に示した実験を5回繰り返した結果を示している。実験協力者全員の傾向として1セット目、2セット目までは「軽い」または「どちらともいえない」と回答している。ただし3セット目以降において重いという回答が見られた。回数をこなすごとに「どちらともいえない」または「重い」という評価も増えており、1セット目と5セット目を見比べた際に1セット目に「どちらともいえない」と答えた人は3人に対して5セット目では「どちらともいえない」または「重い」と答えた人は6人となった。また1セット目「軽い」と答えていたが5セット目には「どちらともいえない」または「重い」と答えた人は4人となった。

以上の結果より1セット目の持ち上げ時には、直交ロボットの見た目により軽いと知覚しているが、回数をこなすごとにロボットによる予想質量が変化している慣れの様子が確認できた。

以上、アシスト機構が見える場合、人は、運搬物体の質量特性だけでなく、アシスト装置の動作抵抗などを考慮した操作感をイメージするため、アシスト装置が見える場合の方が軽いと感じることが分かった。

表2 実験結果

重い-軽い							1set	2set	3set	4set	5set	Average	Variance
3	2	1	0	-1	-2	-3							
Subject A							0	0	0	-1	0	-0.2	0.20
Subject B							0	-1	-1	-1	0	-0.6	0.30
Subject C							-3	0	-1	-1	1	-0.8	2.20
Subject D							-1	0	1	0	-1	-0.2	0.70
Subject E							-1	-1	-1	0	-1	-0.8	0.20
Subject F							-1	0	0	0	0	-0.2	0.20
Subject G							-1	-2	-1	-2	-1	-1.4	0.30
Subject H							-1	0	-1	0	1	-0.2	0.70
Subject I							-1	0	2	-1	0	0	1.50
Subject J							0	-1	2	-2	-1	-0.4	2.30
Average							-0.9	-0.5	0	-0.8	-0.2		
Variance							0.77	0.50	1.56	0.62	0.62		

(4) 視覚的質量感の変化挙動の解析

実験装置は図1と同様のものを使用し、おもりが1個の状態と3個の状態で行う。ここで、装置全体の重量はアシスト装置によってどちらも同じ重量になるように設定してある。つまり、3個の状態では軽く、逆に1個の状態には重くなるようにアシストする。各協力者、各試行を比較するために持ち上げ方はあらかじめ指定しておく。持ち上げる速さは各協力者全て一定にするためにメトロノームを使用し1秒間に1回に設定する。4回音が鳴ることを1セットとして、各1音あたり「持ち手を掴む」「持ち上げる」「下げる」「持ち手を離す」の動作を行ってもらう。また、持ち上げる高さは50[mm]の目印を設定し、装置の持ち手上端部がそこに達するように持ち上げるよう指示する。実験の協力者は20代男性が5人とした。

協力者にはまず、おもり1つの状態の装置の重さを覚えてもらうのをかねて、音に合わせた持ち上げ動作をできるように何度か持ち上げの練習をしてもらう。この重さを覚え、持ち上げ動作にも慣れてきたらおもりを3つの状態に変更する。

次にこのおもりの状態を1回だけ持ち上げてもらい、この動作が終了後、その持ち上げたときと先に記憶したおもり1つを持ち上げたときとを比較してどう感じたかについてアンケートを実施する。アンケート回答後、同じくおもりが3つの状態の装置を5回連続で持ち上げてもらい、手を離れた状態で静止してもらう。この静止した状態から1分、1分30秒、2分の3パターン時間を空けた後、また1度だけおもり3つの状態の装置を持ち上げてもらい、先程と同様に最初に記憶したおもり1つを持ち上げたとき比較してどう感じたかアンケートを実施する。

実験結果を表3に示す。2回目の項目について見ていくと、協力者Aは60[s]、90[s]は軽いと回答しているが、120[s]になると重いと感じている。次に、協力者Bについて、60[s]のときの重量は同じくらいと感じ、90[s]のときは少し重く、120[s]のときは少し軽く感じていた。協力者Cは、60[s]のときは少し重く感じていたが、90[s]以上時間を空けると、おもりが1つと3つのどちらの状態も同じくらいの重量に感じるという結果となった。協力者Dは90[s]までは、おもり3つの状態の方が少し重いと感じていたが120[s]時間を空けると同じ重量と感じるようになった。協力者Eは90[s]だけ時間を空けたとき少し重く感じて、60[s]、120[s]だけ時間を空けたときは同じ重量に感じたという結果となった。

以上の結果を踏まえると、120[s]ほど時間を空けると1度書き換えられた予想質量が元に戻ってきていることが推察できる。

表3 実験結果

重い-軽い							60s		90s		120s	
3	2	1	0	-1	-2	-3	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
協力者A							-1	-1	0	-1	-1	2
協力者B							-3	0	-2	1	-2	-1
協力者C							-1	1	-1	0	-2	0
協力者D							-1	1	-1	1	-1	-1
協力者E							-2	0	-1	1	-1	0

(5) まとめと今後の展望

上記に示したように、予想質量は時間とともに変化することが分かった。これは、図9のように感覚と経験による統合により知覚がなされることを示しており、経験は時間とともに変化しており、この経験の変化に対応して、予測質量と実知覚を一致させることが必要となる。これは、本課題の挑戦的な学術的問いとなる。

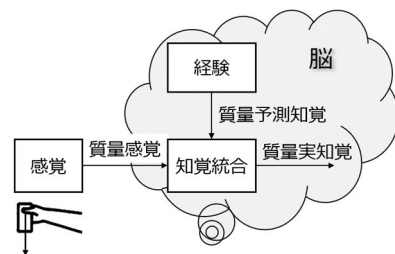


図9 予測質量と実知覚

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kato Ken, Ikeura Ryojun, Tsutsumi Shigeyoshi, Hayakawa Soichiro, Sawai Hideki	4. 巻 2107
2. 論文標題 Analysis of human object lifting operation force using power assist device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012009 ~ 012009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2107/1/012009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 近藤 魁, 小玉一徳, 池浦良淳, 早川聡一郎, 吉田俊一
2. 発表標題 パワーアシスト装置使用時における慣れによる影響を考慮した違和感の主観評価
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第72期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤 健, 池浦良淳, 堤 成可, 早川聡一郎, 澤井秀樹
2. 発表標題 パワーアシスト装置を用いた見た目の異なる物体を持ち上げる際の人の操作力解析
3. 学会等名 第22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 2021年

1. 発表者名 Kazunori Kodama, Kai Kondo, Yuta Namekata, Ryojun Ikeura, Shigeyoshi Tsutsumi and Soichiro Hayakawa
2. 発表標題 Analysis of Psychological Structure in Mass Sense for Object Lifting Operation
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 行方優太, 池浦良淳, 早川聡一郎, 堤 成可, 澤井秀樹
2. 発表標題 パワーアシスト装置の操作における心理評価 持ち上げ速度を変化させた場合
3. 学会等名 日本人間工学会東海支部2021年研究大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤 健, 池浦良淳, 堤 成可, 早川聡一郎, 澤井秀樹
2. 発表標題 パワーアシスト装置を用いた人の物体持ち上げ操作力解析
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂野 友一, 加藤 健, 池浦 良 淳, 早川 聡一郎, 堤 成可, 澤井 秀樹
2. 発表標題 物体運搬におけるパワーアシスト装置の重量感覚制御
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第70期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田雄大, 池浦良淳, 早川聡一郎, 吉田俊一
2. 発表標題 物体の持ち上げ操作における手指皮膚感覚に加わる力と重量知覚との関係性の検討
3. 学会等名 日本人間工学会東海支部2023年研究大会論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 近藤 魁, 小玉 一徳, 行方 優太, 池浦 良淳, 早川 聡一郎, 堤 成可, 澤井 秀樹
2. 発表標題 パワーアシスト装置使用時の質量感覚に関する違和感を対象とした心理分析
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第 71 期総会・講演会予稿集
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

人間共生ロボティクスメカトロニクスリサーチセンター https://www.mie-u.ac.jp/research/robomech/ 人間共生ロボティクスメカトロニクスリサーチセンター http://hsrmrc.mie-u.ac.jp/ 人間支援システム研究室 http://hss.mach.mie-u.ac.jp/

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
研究分担者	早川 聡一郎 (Hayakawa Soichiro) (50288552)	三重大学・工学研究科・准教授 (14101)	

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
---------	---------