

産業用ロボット操作支援における人の認知過程に基づく振動刺激による 協調的な情報提示

Collaborated Assistance for Industrial Robot Operation Based on Human Cognitive Process Using Vibrotactile Glove

精密工学専攻 51号 山崎大輔
Daisuke Yamazaki

1. はじめに

近年産業用ロボットの導入が盛んに行われている。ロボットが作業工程に適した作業を行うためには、ロボットの動作をプログラミングする教示作業を行う必要がある。しかし、扱いが危険であるため十分に訓練された作業員しか操作ができない。しかし Industry 4.0 の影響で素早い経路修正や、熟練の作業員に依存しない教示作業が求められている。従来はロボットと人が別々に作業を行っていたが産業用ロボットと人が同じ空間で作業するようになり、ロボットが止まると人の工程も止まるためである。

これらの問題を解決するため、作業員の経験に依存しないジェスチャを用いた教示方法⁽¹⁾や、専門の知識を持った作業員による遠隔地からの教示方法⁽²⁾が研究されている。経験に依存しない手法では作業員は、容易に作業が可能だがロボット側はジェスチャを一つ一つ判別する必要がある。また、自由度の異なるロボットに変更された際にジェスチャによる動きをロボットがその都度学習する必要がある。遠隔地から操作する手法では、移動時間を削減可能なため素早い対応が可能である。しかし、様々な情報を視覚情報から入手しなければならない。この作業負担を軽減するために振動触覚情報に着目し、遠隔操作システムにおいて振動刺激を用いたインタフェースによる情報提示手法が提案されている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

振動刺激を用いた遠隔操作支援に関する先行研究⁽³⁾⁽⁴⁾では、振動刺激により目標位置までのロボットの操作方向と移動量を誘導情報として提示することにより作業員の認知的負担を軽減し、作業効率を向上させることを評価している。しかし、ロボットに詳しくない作業員は次々に提示される振動刺激情報の理解に時間がかかるため、満足のいく作業ができていないと報告されている⁽⁵⁾。

組み立て作業などワークとの接触が発生する作業に関わらず作業員は、接触したことに気が付かず操作を続けロボットやワークが故障する問題が起きている⁽⁶⁾。また、微小なロボットの動作も視覚からでは把握するのが難しい。したがって、情報提示により操作を支援する際には、物体との接触情報、適切な動作速度情報、ロボットの姿勢情報が有用であると考えられる。

情報提示手法としては、力覚装置を用いた情報提示が行われているが、力覚装置の自由度に制限があり適用可能な環境が限定される⁽⁷⁾。また、力覚提示の場合、反力を提示するのは適しているが、速度、姿勢を提示するのは難しい。一方、振動刺激による情報提示により作業負担を軽減できること、さらに、ティーチペンダントと呼ばれる備え付けのコントローラによる操作の妨げをしないということから、本研究では振動触覚グローブを用いて情報提示を行う。

情報の提示を行う際に、作業員の経験や知識による情報の理解の差をなくすため、ロボットからの情報を提示し続けるのではなく作業員の認知過程に基づき協調的に情報提示を行うことを提案する。

本研究では作業員とロボットの安全を考慮しシミュレータ環境で行う。

2章では本研究で使用する振動触覚インタフェースの情報提示手法について述べる。3章では作成したシミュレータ環

境について述べる。4章では認知過程に基づく協調的な情報提示するタイミングの検出方法について述べる。5章ではロボットと人の認知過程に基づく協調的な情報提示について述べる。6章では5章で提案した手法の動作実験を行い、7章でまとめについて述べる。

2. 振動刺激による情報提示

本研究では、ロボットまたはコントローラに制約を課さないでロボット操作支援を行うことを目標としている。そこで産業用ロボットの操作の基本コントローラであるティーチペンダントを用いる。このコントローラ操作は両手を自由に動かせる必要がある。

2.1 振動触覚グローブ

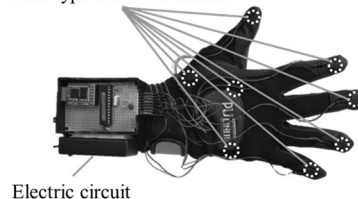
振動を提示する箇所を指の背にした。振動を知覚するためには振動の有無を知覚できることが前提条件である。人間の指には振動刺激の情報を確実に伝達するため素早い振動刺激を知覚するパチニ小体、遅い振動刺激を知覚するメルケン細胞、高い空間分解能を持つマイスナー小体が多いとされている⁽⁸⁾。また指の背は骨に近いので知覚する振動が変化しにくい。この条件を満たすために Fig. 1 に示す振動触覚グローブを用いる。

作業員に提示する情報は、産業用ロボットのエンドエフェクタが接触した際の三次元の反力である。そこで、グローブの親指、人差し指、小指の各指の指先と根元の骨上にモータを配置し、それぞれの指を XYZ 軸の情報と対応させることにより、三次元情報の向きを提示する。

一方ロボットのスピードのように三次元情報ではない情報がある。このような情報は作業員の混乱を避けるために三次元情報と異なる薬指、中指を用いて提示を行う。これらの八つのモータを用いロボットからの情報を提示する。モータの配置方法は先行研究⁽⁴⁾により決定されており、作業員は正確に振動を認識できることが確認されている。

提示部には軽量かつ制御の容易な円盤型振動モータを用いる。これらのモータはマイクロコンピュータ (PIC18F2620; Microchip Technology Inc.) により個別に制御され、インタフェースは Bluetooth により PC から無線接続される。

Disk type vibration motors



Electric circuit

Fig. 1 Vibrotactile glove⁽⁴⁾

2.2 振動刺激の設計

本研究では、三種類の振動刺激を用いることで情報提示を行う。反力の情報から接触した状態を示す振動刺激を Vibration 1、ロボットの動作スピードの変更を促す振動刺激を Vibration 2、目標角度とのずれを示す振動刺激を Vibration 3 と定義する。提示する振動刺激とその情報の関係を Table 1 に示す。

Table 1 Relationship between vibration and information

Name	Information of vibration stimuli
Vibration 1	Contact state
Vibration 2	Adjustment of robot speed
Vibration 3	Adjustment of contact angle

Vibration 1 を目標の反力 $\mathbf{F}' = [F'_x \ F'_y \ F'_z]^T$ より現在の反力 $\mathbf{F} = [F_x \ F_y \ F_z]^T$ が大きい場合と小さい場合、接触していない場合の三段階で提示する。三段階で提示する理由は、接触した場合を二段階に分けて提示する必要があると考えたためだ。それは操作中に誤って過度の力が発生した際に、一段階で提示する場合には許容範囲であるのか判断できない。そのため対応に遅れ故障につながるリスクがあるためである。Vibration 1 は印可する電圧の大きさをデューティ比により制御することで接触状態の変化の提示を行う。

反力には XYZ 軸存在するため対応する指に振動刺激が提示される。また振動箇所が爪であった場合正、指の付け根部分が振動した場合負の情報とする。接触状態と変化させるデューティ比の関係を Table 2 に定義する。

Vibration 2 は、ロボットの動作スピードが速いことに気付かず何度も同じ操作を行うことを避けるために動作スピードの変更を促す振動刺激を印可する電圧のデューティ比を 0.4 に制御して提示する。この振動刺激は他の振動との誤認を防ぐために中指と薬指両方に提示する。一本の指に提示しない理由は、人差し指と中指の振動刺激は間違えて理解されやすいといった知見⁽⁴⁾からである。

Vibration 3 は、接触した際の目標の角度からのずれ $\theta = [\theta_x \ \theta_y \ \theta_z]^T$ を提示する。提示する順番は目標角度との差が大きい軸からである。ロボット操作の経験が浅い作業者が効率よく作業を行うために Vibration 3 の提示を行う。

角度の情報は振動刺激に動きがある方が作業者はイメージが容易である。よって Vibration 3 の振動刺激は振動が移動しているように知覚される触錯覚現象を用いた仮現運動により提示を行う。Vibration 3 の設計は、先行研究⁽⁴⁾を基に行う。仮現運動は移動方向、移動速さによって向き、角度の差の提示を行う。指の根元から指先にかけて振動が移動する場合を正方向とする。また Vibration 1 と同様に XYZ 軸に対応した指に振動刺激を提示する。仮現運動は、Fig. 2 に示すように移動時間 (T_m)、待機時間 (T_w)、間隔時間 (T_i) から構成され、I-IV の順に提示される。 $\theta = [\theta_x \ \theta_y \ \theta_z]^T$ と Vibration 3 の関係を Table 3 に定義する。

Table 2 Parameter of Vibration 1

Duty ratio		Force [N]	Contact state
Except Index	Only Index		
0.8	1.0	$ \mathbf{F}' < \mathbf{F} $	2
0.4		$0 < \mathbf{F} < \mathbf{F}' $	1
0		$ \mathbf{F} = 0$	0

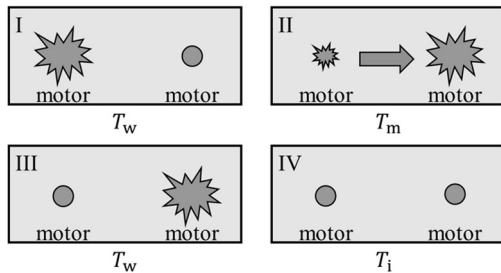


Fig.2 Flow of the Phantom Sensation⁽⁴⁾

Table 3 Parameter of Vibration 3

Angle [°]	Parameter			
	Level	T_m [ms]	T_w [ms]	T_i [ms]
$15.0 \leq \theta_{x-z}$	3	1500	500	250
$5.0 \leq \theta_{x-z} < 15.0$	2	1000	250	250
$0.5 \leq \theta_{x-z} < 5.0$	1	500	250	250
$0.0 \leq \theta_{x-z} < 0.5$	0	0	0	0

3. シミュレータ環境の作成

3.1 実装したシミュレータ

本研究では、ロボットと作業者の安全を考慮してシミュレータ環境を用いてロボット操作を行う。シミュレータはゲーム開発エンジンである Unity を使用する。産業用ロボットの CG モデル動作設計は PPM Robotics AS⁽⁸⁾ が作成したアセットを利用した。使用したロボットモデルを Fig. 3 に示す。



Fig. 3 Unity's robot model

3.2 シミュレータ環境による接触時の情報

3.2.1 反力

Unity には接触した際の反力情報を計算する物理演算が存在しない。そこでシミュレーションなどの反力情報の計算に用いられるペナルティ法⁽⁹⁾により算出する。ペナルティ法は侵入量に応じて反力の大きさを求める。ばね係数 k 、ダンパ係数 h 、ロボットのエンドエフェクタが接触する作業物体に侵入した距離 d 、エンドエフェクタの法線方向 $\mathbf{n} = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ 、エンドエフェクタの速度 $\mathbf{V} = [V_x \ V_y \ V_z]^T$ から、反力の大きさ $\mathbf{F} = [F_x \ F_y \ F_z]^T$ を式(1)により算出する。X 軸の反力計算に用いた係数の関係を Fig. 4 に示す。

$$\mathbf{F} = kdn + h(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} \quad (1)$$

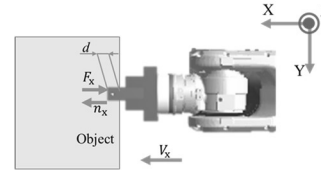


Fig. 4 Relationship between reaction force and robot

3.2.2 接触角度

研磨作業や組み立て作業を行う際に作業面とエンドエフェクタがどの角度で接触しているかを知る必要がある。そこでロボットが接触した際の接触物の面とエンドエフェクタの法線の傾きから接触した際の傾きを求める。

4. 認知過程に基づく情報提示

4.1 認知過程に基づく情報提示の必要性

振動刺激によりロボットに関する知識が少ない作業者に情報を提示したとき、その作業者にとって混乱を招く可能性がある⁽⁵⁾。これは振動刺激を提示するタイミングがロボットの状態のみで判断されており提示情報の意図の理解に時間がかかるためである。このことから、振動刺激を提示するタイミングはロボットの状態のみから判断するのではなく、作業者の状態も考慮されるべきだと考える。

そこで本研究では、ロボットの状態に加え、作業者の認知過程に基づき振動刺激を提示するタイミングを設計する。認知過程とは、作業者が情報提示を必要としているかを判断する指標であり、視線のデータと操作履歴をもとに検出する。

この二つのデータを用い情報提示タイミングを検出する理由は、作業者は目で状況を判断しながら作業を行うためそのときの視線の動きと操作履歴から情報提示が必要なタイミングを観測できると考えたためである。

4.2 認知過程を取得する手法

4.2.1 視線に基づく認知過程の観測

作業者の視線情報から情報を必要としているタイミングを判断するために視線の位置計測を行う。視線を用いる理由

は、作業者は情報の提示を求めている場合視線の移動が多くなる傾向があるためである⁽¹⁰⁾。

アイトラッカ (tobii eyeX, Tobii Technology Inc.) を利用して作業者の視線の位置を計測する。視線の位置の分類は Fig. 5 に示す。視線の位置を G_A と定義する。Fig. 5 の画面上の 0 が三方向から映し出されたロボットの映像、1 が 3 章で説明した反力、接触角度、ロボットの操作スピードなどの数値情報、2 がディスプレイ外を見ていることを示す。この三カ所のエリアから操作中にどこを見ているのかを観測する。

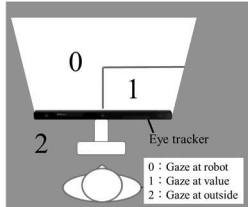


Fig. 5 Classification of gaze at area

4.2.2 操作履歴に基づく認知過程の観測

作業者はどのような操作の際に情報提示を必要としているのかを判断するために操作履歴の記録を行う。具体的に記録する情報は作業者の操作履歴、産業用ロボットのエンドエフェクタと作業物体が接触した場合の反力と接触角度である。また、作業者がいつ情報提示を必要としたかを判断する材料の一つとして実際に情報提示が必要と感じた時点でロボット操作とは別の入力を行う。この操作は情報提示を必要とするタイミングをより明らかにするために観測する。

4.3 認知過程に基づく情報提示タイミングの検出

振動刺激による情報提示を行わずになぞり作業を実施し、この最中にさらに情報提示を必要とする場合に、作業者に明示的に意思表示させることにより、観測された認知過程と情報提示を必要とするタイミングの対応づけを決定する。

4.3.1 情報提示タイミング特定のための実験

本実験では、被験者は実際のティーチペンダントと呼ばれるコントローラを想定してテンキーを用いて産業用ロボットモデルの操作をする。被験者は産業用ロボットの操作経験がない。それによる認知的負担を低減するために実験を行う前に pick and place と呼ばれる目的地に行き物を取り他の位置に動かす操作を練習として行う。この操作を練習タスクに選択した理由は、ロボットの操作方法を理解すれば行えるタスクであるためである。

十分に練習を行った後に本番のタスクを行う。本番のタスクでは Fig. 6 右下に提示される数値情報を頼りに指示した反力の大きさ接触角度を守りながらなぞり操作を行う。その際ロボットの動作スピードは五段階で変更することが可能である。ロボット操作とは別に操作方法が分からず情報の提示を求める場合には 4.2.2 項で説明したロボット操作とは異なるボタンを入力する。Fig. 6 に被験者が実際に見る画面状態を示す。4.2 節で説明した、視線の位置、操作履歴、を用いて認知過程の計測を行う。

被験者は、20 代の男性 5 名。各被験者難易度の異なるなぞり操作のタスクを三つ行う。

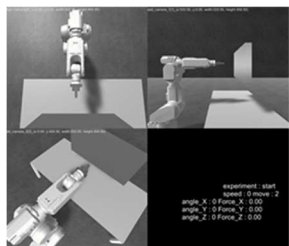


Fig. 6 Screen watched by operator

4.3.2 結果と考察

今回なぞり作業を行ったが最初の接触開始時から指定し

た接触角度まで操作する作業に多くの時間を費やしていた。そこで認知過程に基づく情報提示を行う第一段階として接触してから姿勢を整えるまでの過程に着目する。

被験者全体の操作履歴を見ると、接触する前の比較的大きな動作が可能な部分で動作スピードを上げそのまま接触する。そして何度も接触して離れるという操作を繰り返し行いロボットの動作スピードが速すぎることに気が付いた。作業効率を上げるためにもロボットの動作スピードが速いことを振動刺激により提示する必要があるといえる。

情報提示を求めている場合とは、躊躇することなくロボットの操作を連続的にに行っている場合と仮定する。よって情報提示を求めるのは連続的にロボット操作ができていない場合である。

視線の位置と操作履歴を Fig. 7 に示す。Fig. 7 においてロボット操作なし (Operation 0)、ロボット操作あり (Operation 1)、情報提示を求める操作 (Operation 2) を示す。Fig. 7 の点線の部分で Operation 2 の操作が行われた。すべての被験者がこのタイミングで Operation 2 の操作を行ったわけではない。しかし Fig. 7 の実線で囲った部分と類似したロボット操作を行わず、視線の移動が多いとき次のロボット操作を行いた、ロボット操作を行わない時間が続くことが分かった。

ロボット操作が無く視線の移動が多い場合と、情報提示を必要としないと仮定した連続操作を行った場合の単位時間当たりの視線の移動数 G_d を比較した結果を Fig. 8 に示す。二つの単位時間当たりの視線の移動数に有意差が確認された。

このことから仮定した情報提示が必要な場合は正しいといえる。そこで G_d が 2.0 以上のときに作業者は、情報提示支援が必要であるといえる。例えば、Fig. 7 に適用した場合、77 秒には振動刺激により情報の提示が行われる。そのため作業が効率よくできると考えられる。

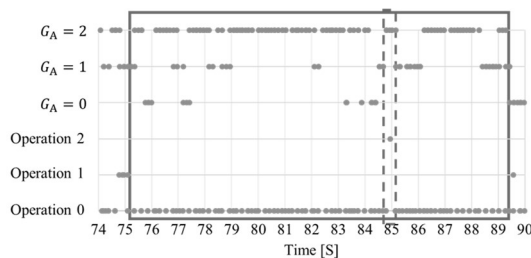


Fig. 7 Features during operation

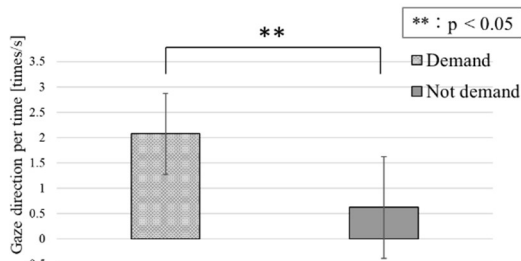


Fig. 8 Gaze direction per time

5. 認知過程に基づく振動刺激による協調的な情報提示

提案する認知過程に基づく協調的な情報提示手法では、作業者はコントローラを用いロボット操作を行う。その際に作業者の視線の位置と操作履歴が認知過程に基づく協調的な振動刺激の設計を行う部分に入力される。入力された情報から振動刺激を提示する条件である場合に作業者に振動刺激を用いて情報が提示される。

協調的な情報提示のための振動刺激の設計を Fig. 10 に示す。4.3 節の検証結果をもとに振動刺激の提示タイミングを設計した。接触した状態を知ることが可能な Vibration 1 は必ず提示しなければならない情報であるため反力が発生した

場合に提示する。Vibration 1 を止めるタイミングは作業者の視線の位置が数値情報の場所 ($G_A = 1$) に移動したときに止まる。これは作業者が提示された振動刺激の意味を理解し接触角度など次の作業に必要な情報を数値情報から得ようとしたと考えられるためである。

次にロボットの動作スピード (V_{robot}) の調節を促す Vibration 2 が提示される。検証結果から作業者は二番目に遅いスピードのときに調節を行っていた。それにより V_{robot} が 2 になるまで振動刺激の提示を行う。

接触角度の調節は今回のタスクの中で一番困難な作業である。そこで 4.3 章の検証から情報の提示を必要としていると判断した単位時間当たりの視線の移動数 G_d が 2.0 以上に変化した際に Vibration 3 の提示を行う。

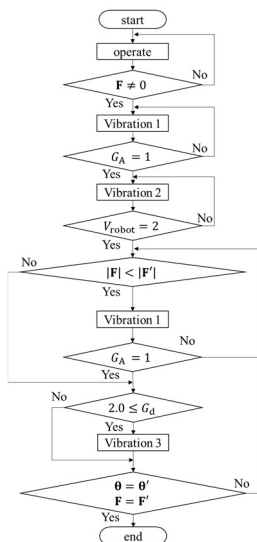


Fig. 10 Vibration stimuli generation based on human cognitive process

6. 人の認知過程に基づく振動刺激に基づく協調的な情報提示の動作検証

5 章で設計した認知過程に基づく協調的な振動刺激の提示の動作検証を行う。4.3 節の実験環境に加えて 2 章で提案した振動触覚グループを右手に装着した状態でロボットの操作を行う。動作検証では、接触してから接触角度の調整まで行う。検証結果を Fig. 11 に示す。振動刺激による情報提示がない場合 (Vibration off)、目標接触角度の差が小さい方から (Angle Level. 1, 2, 3)、接触状態であるときを (Contact on)、接触していないときを (Contact off)、ロボットの移動速度を変える操作を (Changed speed) とする。

Fig. 11 の①の状態では接触した状態を示す Vibration 1 が提示された。Vibration 1 は接触が開始したタイミングで提示される。よって Contact on になった直後に Vibration 1 が提示されているため、適切に動作したことが確認された。

Fig. 11 の②の状態では Vibration 1 の提示が止まり、ロボットの動作スピードの変更を促す Vibration 2 の提示が始まった。Vibration 1 が提示中に作業者の視線が $G_A = 1$ に移動し数値情報を確認したタイミングに Vibration 1 が停止した。それと同時にロボットの動作スピードが適切でないため Vibration 2 が提示されたことから適切なタイミングで動作したことが確認された。

Fig. 11 の③の状態では Vibration 2 が停止した。8 秒を過ぎたあたりで Change speed の入力複数回ありロボットの動作スピードが適切 ($V_{robot} = 2$) になったため Vibration 2 の振動刺激は停止した。よって適切なタイミングで動作したことが確認された。

Fig. 11 の④の状態では目標角度とのずれを示す Vibration 3 が提示された。 G_d が 2 を超えたタイミングで Vibration 3 の提示

が開始されたことから適切なタイミングで動作したことが確認された。

Fig. 11 の⑤の状態では Vibration 3 の提示レベルが変更された。Angle Level. 2 から Angle Level. 1 に変更されたタイミングで Vibration 3 のレベルも小さくなったことから適切なタイミングで動作したことが確認された。

すべての振動刺激が提案したタイミングで提示された。よって提案システムは適切に動作することが分かった。

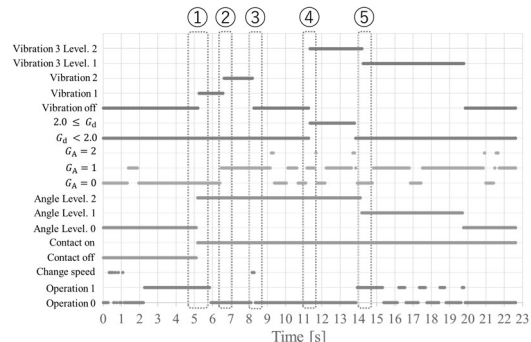


Fig. 11 Operation verification

7. おわりに

本研究を行うにあたり安全性を確保するためにシミュレータ環境の導入と設計を行った。接触作業を伴う産業用ロボットの操作支援における認知過程に基づく情報提示の設計を行った。接触した際の情報を振動刺激により提示するために振動刺激の設計を行った。人の認知過程に基づく協調的な情報提示タイミングの動作検証を行った結果、所望のタイミングでの情報提示に成功した。

参考文献

- (1) G. Du, M. Chen, C. Liu, B. Zhang and P. Zhang, "Online Robot Teaching With Natural Human-Robot Interaction", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 12, (2018), pp. 9571-9581.
- (2) T. Thomessen and T. Kosicki, "Cognitive audio-visual infocommunication applied in remote support for industrial robot systems", 2011 2nd International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), Budapest, (2011), pp. 1-5.
- (3) K. Suzuki, T. Thomessen and M. Niitsuma, "Vibrotactile information for supporting pick and place task using industrial robot remote operation", 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Nagoya, (2015), pp. 69-74.
- (4) T. Hatano, C. M. Horvath, T. Thomessen and M. Niitsuma, "A vibrotactile navigation aid for remote operation of an industrial robot", 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Sapporo, (2016), pp. 700-705.
- (5) G. Sziebig and P. Korondi, "Remote operation and assistance in human robot interactions with vibrotactile feedback", 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, (2017), pp. 1753-1758.
- (6) N. Liu, Z. Liu, Q. Wei and L. Cui, "A containerized simulation platform for robot learning peg-in-hole task", 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Wuhan, (2018), pp. 1290-1295.
- (7) D. Bitonneau et al., "Design of an industrial human-robot system through participative simulations — Tank cleaning case study", 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Taipei, (2017), pp. 1-8.
- (8) E. Sita, C. M. Horvath, T. Thomessen, P. Korondi and A. G. Pipe, "ROS-Unity3D based system for monitoring of an industrial robotic process", 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Taipei, (2017), pp. 1047-1052.
- (9) 仁藤将輝, 渡辺大地, "リアルタイム 3DCG における衝突を考慮したエネルギー波表現", 芸術科学会論文誌 Vol. 13, No. 3, (2014), pp. 144-153.
- (10) 高木 啓伸, "視線の移動パターンに基づくユーザの迷いの検出—効果的な作業支援を目指して", 情報処理学会論文誌, Vol.14, No.5, (2000), pp1317-1327.