

遠隔組立作業に適した少自由度 haptic device 開発のための手首の力調節能力測定 Capability to adjust wrist force for developing a low-degree-of-freedom haptic device suitable for remote-controlled assembly

精密工学専攻 55 号 柳下正博
Masahiro Yanagishita

1. 緒言

近年, 宇宙空間や原子力発電所など, 人間が立ち入りにくい環境下における組立作業の重要性が高まっている. そのような環境下ではロボットの遠隔操作によって作業を行うと安全である. その際, ロボットが受ける力を作業者にフィードバックするために, haptic device を用いる研究を行っている⁽¹⁾. haptic device とは, 操作者が仮想物体に触れたときの触覚や力覚を提示する装置である. 多くの haptic device は, ユーザに高現実感を与えるため多自由度をもつことが一般的である. しかし, 組立作業においては必ずしも同時多自由度の運動と力覚が必要ではない. そこで我々は, 1 自由度のみの力覚提示を行える haptic device を開発し, 遠隔組立手法とシステムの構築を行ってきた⁽²⁾.

少自由度 haptic device の開発にあたり, 作業を行う人間側の特性を考慮することで, デバイスの操作性向上につながる. 少自由度の運動と力覚で組立作業が行えることが前提であるが, 実際に人間が行う組立動作での検証はされていない. 本研究では, 人間が行う組立動作から 1 自由度の力覚提示による組立作業の有効性を確認した. さらに, 遠隔組立に適した haptic device として, 発揮する力の調節しやすさが操作性に大きく影響する. そこで本研究では, 手首の力調節能力を測定した結果を報告する.

2. 少自由度 haptic device を用いた遠隔組立作業

本研究では, 自動化が困難な製造現場の組立作業において, 組立対象物の詳細な形状情報なしに, ユーザが作業現場をカメラで見ながら組立手順を決定し, ロボットを遠隔操作して組立を行う場合を想定する. Fig. 1 に, 本研究で対象としている遠隔組立システムの概要図を示す. 遠隔組立のシステムは, 実際の作業環境に置かれたマニピュレータサイドと, 遠隔地にあるユーザサイドから成る. ユーザは haptic device を用いてマニピュレータを操作し組立作業を行う. 作業中はマニピュレータが受ける力覚情報を力覚センサにより取得し, haptic device を介してユーザに提示する.

以降では 1 対 1 の部品間での組立作業を対象とし, 組み付ける側の部品を移動部品 (Movable part), 組み付けられる側の部品を (Fixed part) と呼ぶ. Fig. 2 に, 組立作業の流れを示す. マニピュレータを用いた組立作業は一般的に, 移動部品が環境部品との接触を順次増やしていくことで組立を完了する特徴がある⁽³⁾. それゆえ, 移動部品を操作する場合には, すでに実現した接触状態を維持するために, 移動部品を

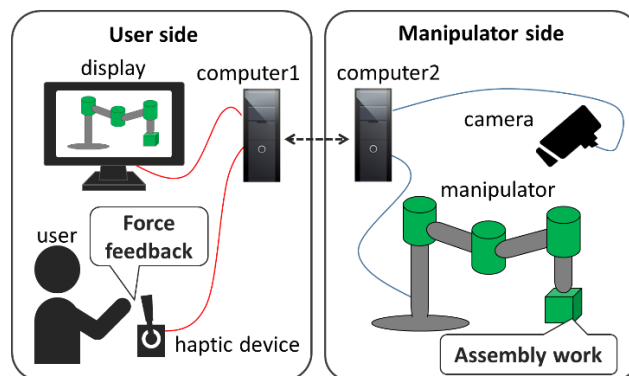


Fig. 1 Remote-controlled Assembly System overview

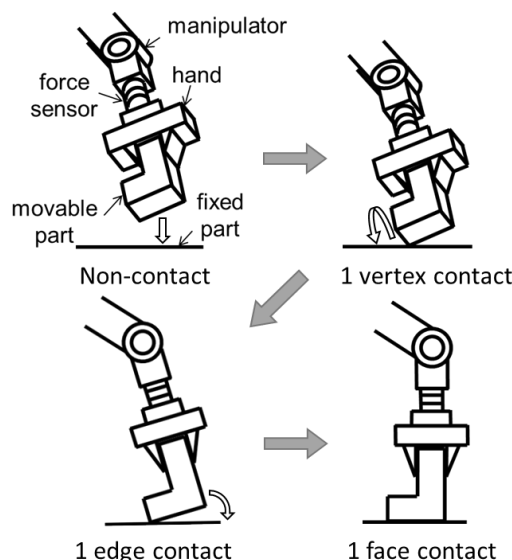


Fig. 2 Assembly work flow

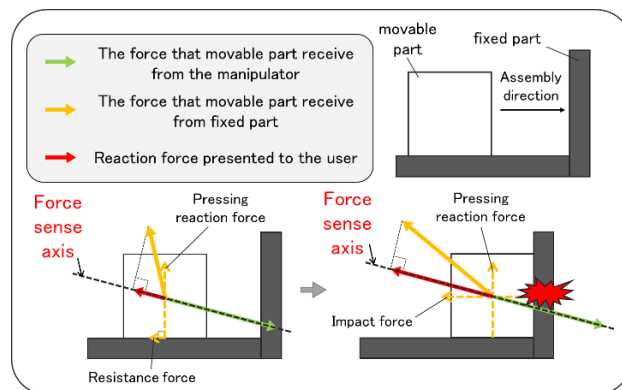


Fig. 3 Force information in assembly work

押し付けながら操作する. 接触箇所が増えるたびに移動部品の自由度が拘束され, すべての自由度が拘束されると組立完了となる.

Fig. 3 に正方形の移動部品と L 字型の環境部品における接触時の力覚情報を示す。マニピュレータは移動部品に対して環境部品へ押し付けつつ移動させるため、斜め方向に力を加える。この力の方向を力覚軸と呼ぶ。移動部品が環境部品から受ける反力は、接触状態を維持した動作時には押し付け力と抵抗力の合力となる。衝突時には押し付け力と衝突力の合力が反力である。これらの反力の力覚軸成分のみを少自由度 haptic device により提示する反力とすることで、接触状態の維持と接触状態の変化を検知することが可能である。このことから 1 自由度の力覚提示が有効であると考えられる。

3. 組立動作測定実験

3.1 実験目的

これまで、実際の組立動作から 1 自由度の力覚情報だけで組立作業が行えることは確認されていない。本実験では実際の人間が行う組立動作における力覚情報を測定し、1 自由度の力覚提示の有効性を確認することで、少自由度 haptic device を用いた遠隔組立作業の有用性を高める。

3.2 実験概要

Fig. 4 に測定した組立作業の手順を示す。2 次元環境における組立作業を想定する。未接触の状態を初期状態、2 稜線接触の状態を組立完了状態とする。L 字型の移動部品にある黒い点は人が力を加える点である。被験者は、組立作業の経験がない 20 代男性 3 人を対象として計測する。

Fig. 5 に製作した組立動作測定装置を示す。並進 2 自由度・回転 1 自由度のアーム型構造である。移動部品の位置と姿勢は各関節に取り付けたエンコーダの値から順運動学計算により計算する。姿勢によって x 方向と y 方向の測定精度は変化する。計測を行う組立作業においては、 $30^\circ \leq \theta_1 \leq 150^\circ$ の範囲で作業が完了する。この範囲において x 方向の分解能は 1.53~4.60mm, y 方向の分解能は 1.53~4.39mm, 姿勢の分解能は 0.351° である。

3.3 実験結果

すべての被験者に同様の傾向がみられた。その中でも理解のしやすい被験者のデータを用いて説明する。

Fig. 6 に反力と反トルクの時間変化のグラフを示す。反力、反トルクが共に一定値を示した状態から、1.78 秒の時に急速に変化することから、1 点接触したことがわかる。1 点接触後、変化した反力と反トルクを未接触時の一定値まで緩やかに変化させていることから、被験者は接触状態を維持するために反力を調節していることが読み取れる。その後、2.74 秒の時に、再び値が大きく変化しており、1 稜線接触状態となった。1 稜線接触後も同様に反力を調節していることが読み取れる。3.66 秒の時に、再び値が大きく変化し 2 稜線接触状態となり組立完了したことがわかる。

Fig. 7 に反力の合力の大きさと方向の時間変化のグラフを示す。これまでのグラフ同様、1 点接触する 1.78 秒、1 稜線接触する 2.74 秒、2 稜線接触する 3.66 秒の時に角度、大きさ共に変化している。接触状態を維持した動作の間、合力の向きが大きく変化することはなかった。このことから 1 方

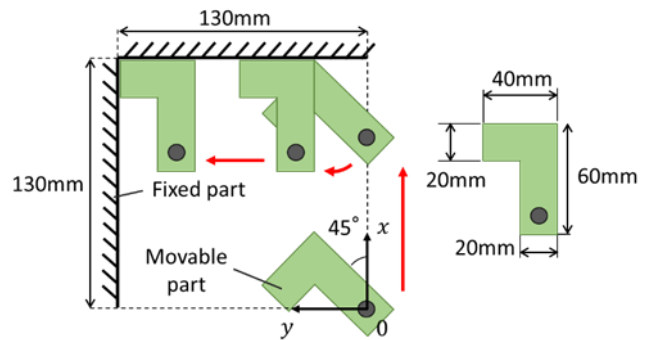


Fig. 4 Measured assembly work

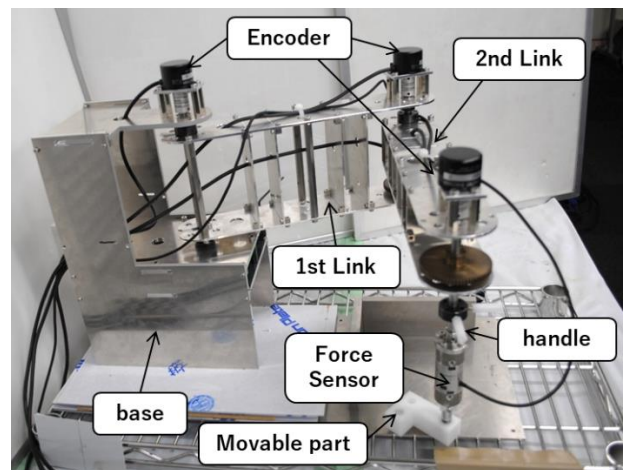


Fig. 5 Assembly operation measuring device

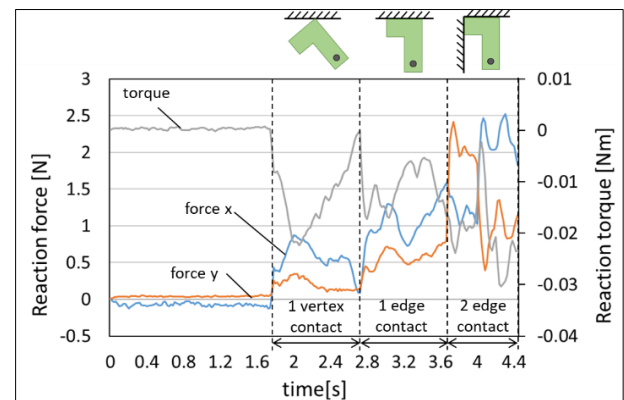


Fig. 6 reaction force and reaction torque

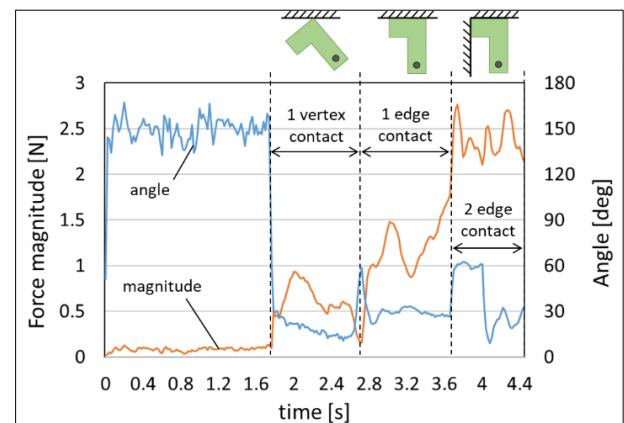


Fig. 7 The magnitude and angle of the resultant force

向の力覚情報が有効である可能性が示唆される。

Fig. 8 に合力の力覚軸方向成分と比較したグラフを示す。各接触状態ごとに合力の角度の平均値を算出し、x 方向から平均値の分だけ回転した方向を力覚軸とした。Fig. 8 に示した被験者の力覚軸は未接触時には 148.5° 、1 点接触時には 21.0° 、1 稜線接触時には 31.2° 、2 稜線接触時には 37.5° であった。合力の力覚軸成分のみのグラフは元の合力のグラフと同様の形をしていることが確認できる。このことから 1 自由度の力覚情報だけで組立作業が実現可能である。

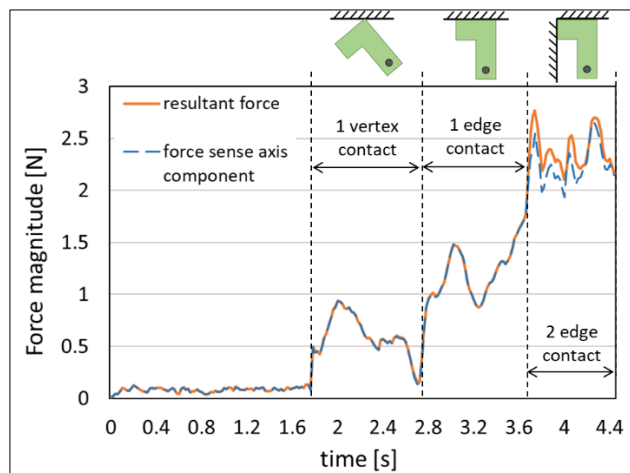


Fig. 8 Force sense axis component of resultant force

4. 手首の力調節能力測定実験

4.1 実験目的

遠隔組立作業において、haptic device による押し付け力の調節が必要であり、作業負荷の高い操作である。そのため、力の調節がしやすい動作で操作する haptic device は、操作性が高いと言える。関連研究^[4]では手首の最小トルクから、ジョイスティック操作系の検討が行われた。本実験でも Fig. 9 に示す手首の基本動作に着目し、それらの動作の力調節能力測定を行い、力の調整がしやすい動作を決定する。この結果から、ジョイスティック操作系のみならず、新たなヒューマン・マシン・インタフェースの開発に役立つと考えられる。

4.2 実験概要

Fig. 10 に製作した 2 つの測定装置を示す。左の装置は掌屈 (+Tx)、背屈 (-Tx)、撓屈 (+Ty)、尺屈 (-Ty) の測定に使用する。ハンドルを付け替えることで手首の動作方向を変えることができる。位置の測定精度は 0.0687mm 、トルクの測定精度は 0.005Nm 、トルクの測定限界は 10Nm である。右の装置は回外 (+Tz)、回内 (-Tz) の測定に使用する。この装置はトルクセンサを含まない。ハンドル回転角の測定精度は 0.352° 、トルクの測定精度は $2.45 \times 10^{-3}\text{Nm}$ 、トルクの測定

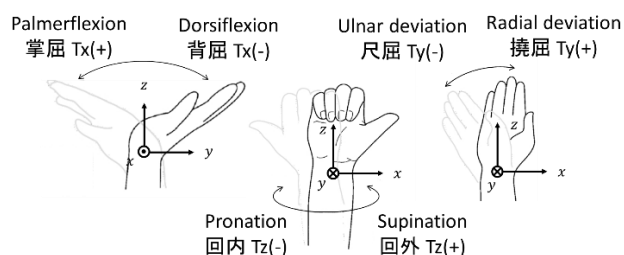


Fig. 9 Basic movement of the wrist

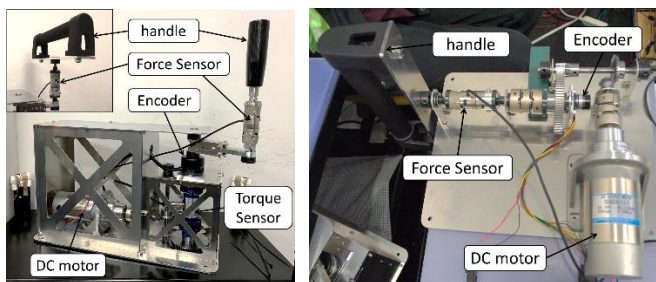


Fig. 10 Experimental device



Fig. 11 Posture of the subject

限界は 2.94Nm である。

Fig. 11 に実験時の被験者の姿勢を示す。右利きの健常者の 20 代男性 6 名を対象とし、利き腕で測定する。上肢のみの発揮力を測定するために、被験者には壁に背を付けた状態で座ってもらい、肩を鉛直に下した姿勢で実験を行った。掌屈 (+Tx)、背屈 (-Tx)、撓屈 (+Ty)、尺屈 (-Ty) 動作の実験時には肘固定装具で肘関節の角度を 90° に固定した。回外 (+Tz)、回内 (-Tz) の動作時には前腕が回転することから肘固定装具は使用しなかった。

Fig. 12 に実験中の被験者への視覚フィードバック画面を示す。ディスプレイ上に対象とする 1 方向のトルクの目標波形 (青色) と被験者が実際に出したトルク (赤色) を表示した。被験者が力を発揮すると上昇し、脱力すると下降する。目標波形は周期 6 秒、振幅 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5Nm の sin 波形とした。被験者は目標トルク波形に追従するように 6 周期の間トルクを発揮する。目標トルク T_g と測定値 T の差分を被験者の最大トルク T_{max} で正規化した値を評価誤差 *Error* として式 (1) で求める。評価には 2~6 周期目のデータを採用し、各動作ごとに平均値を求め比較した。被験者の最大トルクはばねばかりで測定した。

$$Error [\%] = \left| \left\{ (T - T_g) / T_{max} \right\} \times 100 \right| \quad (1)$$

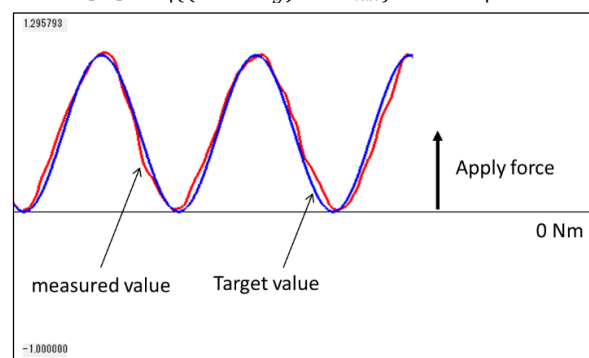


Fig. 12 Visual feedback Display

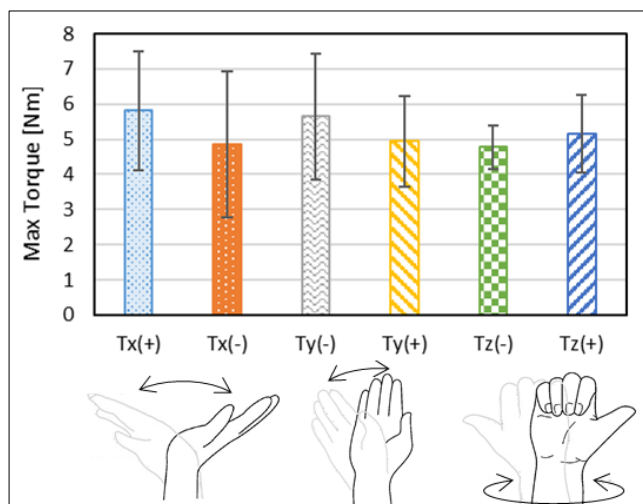


Fig. 13 Comparison of maximum torque by operation

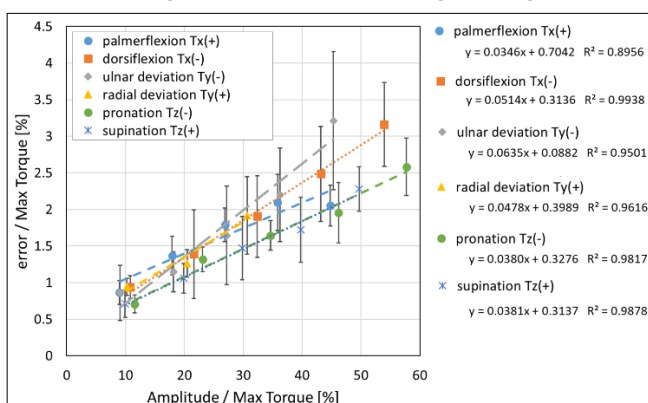
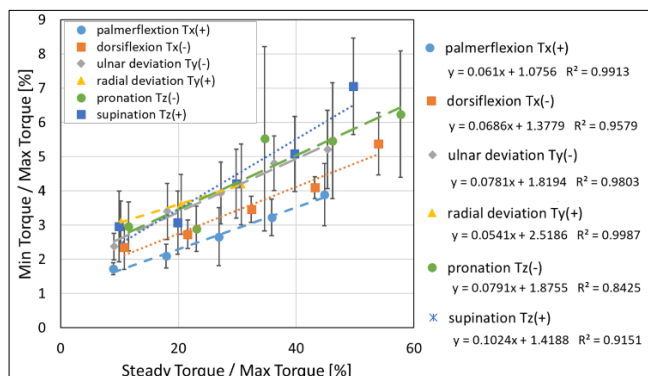
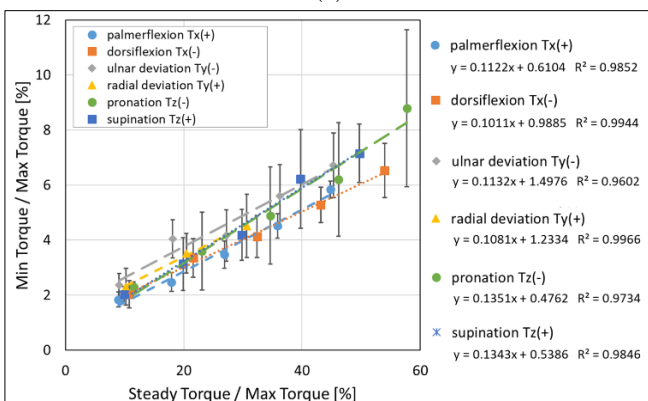


Fig. 14 Comparison of tracking error by operation



(a)



(b)

Fig. 15 Comparison of minimum torque by operation

(a) When increasing applied force

(b) When decreasing applied force

4.3 実験結果

Fig. 13 に被験者の最大トルクの動作別比較を示す。掌屈 (+Tx) と尺屈 (-Ty) に関して、平均値は 5.5Nm を超え、最も大きい力を発揮した。残りの 4 つの動作に関しては、ほぼ同程度の最大トルクとなった。

Fig. 14 に目標トルク波形に対する誤差の動作別比較を示す。目標波形の振幅を各被験者の最大トルクで割って正規化している。図中には、各動作ごとに回帰直線の式と寄与率を示した。また、撓屈 (+Ty) は可動域が狭く、振幅 2.0Nm 以上で測定できない被験者が多かったため実験を割愛した。

Fig. 14 から、振幅が大きくなるにつれて、誤差が大きくなる傾向がみられた。掌屈 (+Tx)、回外 (+Tz)、回内 (-Tz) は増加傾向が小さく、さらに、回外 (+Tz)、回内 (-Tz) は回帰直線の定数項が小さい値を示した。ドアノブを回す、扇子を仰ぐなど、日常的動作に多いことが要因だと考えられる。

Fig. 15 に最小トルクの動作別比較を示す。目標トルク波形に対する誤差と同様に、定常トルクが大きくなるにつれて、最小トルクが大きくなる傾向がみられた。発揮方向の最小トルクにおいて、全ての定常トルクで掌屈 (+Tx) が最も小さい値を示した。回帰直線の傾きと定数項からも、掌屈 (+Tx) が最も小さい力を発揮できると考えられる。掌屈 (+Tx) は他の動作に比べ、多数の筋肉を使用して行う動作であるため、微弱なトルクを発揮しやすいと考えられる。脱力方向では、動作間の有意差は見られなかった。

5. 結言

人間の組立動作の測定を行い、1 自由度の力覚提示で組立作業が行えることを確認した。さらに、手首の力調節能力を測定し、最大トルクの 60% の範囲で操作を行う場合、力の調節が行いやすい動作は回内・回外であることを確認した。一方、最小の力を発揮できる動作は掌屈であることを確認した。

今後の展望として、発揮する力を連続的に変化させるために、拮抗筋 (内力) を使う場合があるため、発揮力の合力や筋電位も含めた検討が必要であると考えている。その結果を踏まえ、haptic device の構造の決定を目指す。

参考文献

- (1) 大井賢治, haptic device を用いた 1 自由度の操作による 3 自由度遠隔組立作業, 精密工学会春季大会講演論文集, (2010), pp.953-954
- (2) 新津哲, 田村亮佑, 平岡弘之, 6 自由度遠隔操作組立業に用いるマウス型 1 自由度 haptic device の開発, 生産システム部門研究発表講演会 2013 講演論文集, (2013), pp.47-48
- (3) 清水昌幸, 小菅一弘, structured compliance を用いた平面組付作業, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.8, (2002), pp. 852-859.
- (4) 向江秀之, ジョイスティック操作系検討のための手の能動的な発揮力特性の基礎研究, 日本生理人類学会誌, Vol.13. No.2, (2008), pp.19-28.