ヒトの作業データにおける相関に基づくロボットの力制御設計

福本 靖彦^{*1,*2}, 山野辺 夏樹^{*3}, 万 偉偉^{*4,*5}, 原田 研介^{*2,*3}

Force control design for robots based on correlation in human demonstration data

Yasuhiko FUKUMOTO^{*1,*2}, Natsuki YAMANOBE^{*3}, Weiwei WAN^{*4,*5} and Kensuke HARADA^{*2,*3}^{*1} Kagawa Prefectural Industrial Technology Research Center
587-1 Goto-cho, Takamatsu-shi, Kagawa 761-8031, Japan^{*2,*4} Graduate School of Engineering Science, Osaka University
1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka-shi, Osaka 560-8531, Japan^{*3,*5} Intelligent Systems Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
1-1-1 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8568, Japan

Received: 7 December 2018; Revised: 8 April 2019; Accepted: 16 May 2019

Abstract

This paper proposes a method to construct a force control law for industrial robots by using the normalized cross-correlation (NCC) of human demonstration data. Conventionally there are two solutions where one is based on human demonstration data, and the other is based on numerical optimization. The former one gives the force control parameters efficiently, but the parameters may make the robot unstable. On the other hand, the latter can maximize the performance, but it requires an enormous number of trial and error. Taking into account the merit of each method, we consider combining the two approaches. In our proposed method, the force control laws are determined to maximize the NCC of the human demonstration data. The orientation of the coordinate system is also determined to maximize the NCC of the human demonstration data. Then, the parameters included in the force control law are optimized by the downhill simplex method. The proposed method was applied to a ring-shaped rubber packing assembly task, and it could realize an assembly with human-like performance. Moreover, some comparable experiments were also conducted, and it was confirmed that the proposed method can construct appropriate force controls.

Keywords : Industrial robot, Force control, Programming by demonstration, Cross-correlation, Optimization, Assembly, Flexible object, Ring part

1. 緒 言

組立作業や研磨作業など外界との接触を伴う作業をロボットで行うには力制御が有効であるが、力制御の構築には大きな手間を要する。その理由として、力が位置と違って目に見えないことに加え、パラメータが適切でないと接触対象を破壊してしまうという危険性があることなどが挙げられる。このような問題を解決するため、これまでに力制御パラメータの設定方法についての研究がなされてきている。これらの研究は大きく二つの手法に分けられる。一つはヒトの作業データを基にヒトの特徴を抽出するもので、もう一つはヒトの作業を参考にせず最適化などによりパラメータを決定するものである。これらのアプローチはいずれも有効な方法ではあるが、それぞれ課題も抱えている。ヒトの特徴を抽出する方法では効率的にパラメータまで得ることができる一方、得られたパラメータの値をそのままロボットに適用すると不安定になる場合もあり、必ずしもうまくいかない。また、多くはヒトの特性を簡易に測定しているのみで、厳密に測定しようとするとは簡単ではないという問題もある (辻,

No.18-00489 [DOI:10.1299/transjsme.18-00489], J-STAGE Advance Publication date : 24 May, 2019

^{*1} 正員, 香川県産業技術センター (〒761-8031 香川県高松市郷東町 587-1)^{*2} 正員, 大阪大学 大学院基礎工学研究科 (〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3)^{*3} 正員, 産業技術総合研究所 知能システム研究部門 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1)^{*4} 大阪大学 大学院基礎工学研究科^{*5} 産業技術総合研究所 知能システム研究部門

E-mail of corresponding author: fukumoto@itc.pref.kagawa.jp

1996), (Burdet et al., 2013). 二つ目の方法である最適化ベースの方法は高い制御性能を実現できる一方、多くの場合で最適化の評価値（例えばサイクルタイムなど）は解析的に得られる値ではないので実機で実際に実験を行って計測する必要があり、探索に膨大な手間を必要とする点が問題になる。

そこで本論文ではこれら二つの方法を組み合わせた手法により力制御を構築する方法を提案する。この方法ではヒトの作業データを解析することで、性能を大きく落とすことなく調整すべきパラメータを減らすことができ、実用的な手法となっている。まずヒトの作業データにおける相関を計算し、複数設定したシンプルな力制御則の候補の中から最もヒトの特性に近いものを選択する。また座標軸方向ごとに別の制御則を設定することも想定できるが、特にその場合は座標軸の向きが性能を大きく左右するので、座標軸の向きについても同様にヒトデータにおける相関を利用して適切に決定する。そして力制御パラメータは滑降シンプレックス法による実機ベースの最適化により決定する。なお、我々の過去の研究 (福本, 原田, 2018) では主に力制御パラメータの最適化にフォーカスを置き、ヒトの作業データを参考にした力制御則を提案した。この手法では、設計者が力制御則や座標系の向きをヒューリスティックに決定しており、そのまま汎用的に応用展開できる力制御の構築手法ではなかった。それに対し、本論文ではヒトの作業データから力制御則を構築する手法にフォーカスを置く。提案する手法では、座標軸の向きを同時に決定するためのアルゴリズムを提案し、設計者のセンスに依らない力制御構築が可能になる。

本論文では提案手法の効果を検証するため、油圧シリンダのピストン部品に対してリング状ゴムパッキンの取り付けを行う作業において評価実験を行う。この作業は我々の過去の研究 (福本, 原田, 2018) でも行った作業であり、図1のように棒状のツールをパッキンに引っ掛けて、ワークを旋回させることで取り付け作業を行うものである。パッキンに傷や永久歪みを与えることを防ぐため、作業中にパッキンに作用する力をなるべく小さくする必要があり、それを実現するためにワークを旋回している間、力制御により手先を制御して余計な力を受け流す。本実験により、提案手法は力制御則と座標軸の向きをヒトのデータ作業から自動的に決定しながら、その力制御の性能についてはヒトの設計者がそれらを設計した従来手法 (福本, 原田, 2018) と同等以上であることなどを示す。

本稿では2章で我々の先行研究を含む関連研究について紹介する。3章では相関を利用して力制御設計を行う方法について提案する。4章では油圧シリンダ部品へのリング状ゴムパッキンの取り付け作業に提案手法を適用した実験結果を示す。5章で本研究のまとめを記す。

2. 関 連 研 究

力制御の構築方法に関する関連研究を示す。

2・1 ヒトの作業特徴に基づく力制御

ヒトの作業データを使って力制御を構築する研究として、浅田らはヒトが作業を行ったときの手先の位置と力を測定し、フィッティングによりインピーダンスパラメータを抽出した (浅田, 浅利, 1988)。Gribovskaya らや Lee らはインピーダンス制御をヒトの位置軌道と力軌道の両方を追従させるための制御にとらえ、剛性パラメー

Fig. 1 The packing assembly task by a force-controlled robot. (a) An initial state. (b) The robot set the tool at the groove. (c) The workpiece is rotated by the chuck and the packing is inserted as the rotation progressed. During the workpiece rotating, the tool position is moved slightly by the force control. (d) The packing is fully inserted.

タなどを調整することでどちらの追従を重視するかを切り替える手法を取った (Gribovskaya et al., 2011), (Lee et al., 2015). Ajoudani らはヒトの筋電位からヒトのインピーダンスを推定し, これをインピーダンス制御のパラメータとする方法を提案した (Ajoudani et al., 2012). 以上の方法では得られたパラメータをそのまま使った時にロボットが不安定になる場合があるなどの課題がある.

単にヒトが作業したときのデータを取得するのではなく, ヒトがロボットに直接教示を行った時のデータを利用する研究や, バイラテラルのマスタ・スレイブロボットを操作したときのデータを利用する研究もある. これらの方法であれば, 実際にロボットが動いているのでロボットで実現できる可能性が高いパラメータが得らえると期待できる. 板橋らは直接教示によりインピーダンスパラメータを抽出し(板橋他, 1998), 田中らは同様にダンピング制御パラメータを抽出し(田中他, 2009), 望月らはハイブリッド制御パラメータを抽出した(望月, 松井, 1994). 津坂らはインピーダンス制御における力の目標軌道を抽出した(津坂他, 2012). Racca らやLee らはインピーダンスパラメータを調整することで位置軌道と力軌道の追従を制御した (Racca et al., 2016), (Lee et al., 2015). また, 榎本らはインピーダンス制御を実装したマスタ・スレイブ型のロボットにおいてヒトモデルとマスタロボットモデルを同定し(榎本他, 2002), 尹らは同様にスレイブロボットの目標位置軌道と力軌道を抽出した(尹他, 2007). ただし, 直接教示やマスタ・スレイブロボットを使った教示では, ヒトが操作するロボットの性能の問題により, 通常の作業とは勝手が異なるため操作に熟練を要することが問題になる場合があるほか, 直接教示が可能なロボットやマスタ・スレイブロボットを用意しなければいけないことも制約となる.

2・2 最適化を利用した力制御

本節では最適化を利用して力制御を構築する研究例について紹介する. Zhang らは実験計画法により作業の成功率が高く, サイクルタイムが短く, ワークの変更にもロバストになるようなパラメータを多数の試行を通して得た (Zhang et al., 2011). Hirai らと山野辺らはそれぞれ滑降シンプレックス法による実機ベースの最適化を利用してダンピング制御のパラメータを決定している (Hirai et al., 1996), (山野辺, 2007). なお, 山野辺らやHirai らの研究では, 先にシミュレーションを実施して実機での試行回数を減らしているが, 高精度に力信号などを再現できるシミュレータを構築すること自体も大変な労力を伴う. 安藤らはペグ・イン・ホール作業のパラメータを決めるために直接ペグ・イン・ホール作業を行うのではなく, より簡単に実験可能である突き当て動作において制定時間が最小になるようパラメータを決定し, そのパラメータを利用してペグ・イン・ホール作業を行うことでサイクルタイム短縮を実現するという手法を提案した (安藤ら, 2011). このように, 最適化により力制御パラメータを決定するには, 多数の試行による手間を許容する, あるいは高精度なシミュレータを構築する手間をかけるといった苦勞を負うか, 作業を実験が簡単なものに置き換えるような工夫をすることが必要である.

2・3 ヒトの作業特徴と最適化の両方を使った力制御

先行研究 (福本, 原田, 2018) でも, 主に最適化の手法にフォーカスを置き, ヒトの作業特徴を利用する方法と最適化を利用する方法の両方を組み合わせる力制御の手法を提案した. しかしながら先行研究の手法では, ヒトの作業特徴を表す制御則の決定方法に技術的な指針がなく設計者の手腕によるところが残っていた. また, 力制御の際の座標系の向きについても設計者がヒューリスティックに決定していた. 座標系の向きが変わるとデータの見え方も変わるため, 座標系の向きは性能を左右する大きなファクターになっており, どの向きが適切であるかを検討すべきである.

3. 相関を利用した力制御設計

本章ではヒトの作業データの相関を用いて解析する手法により上記の課題を解決した手法を提案する.

3・1 制御則の候補

本研究では前章で述べた作業を実現するために, 座標軸ごとに以下の三つの力制御則のいずれかを利用することとする.

$$k_i p_i(t) = f_i(t), \quad (1)$$

$$d_i \dot{p}_i(t) = f_i(t), \quad (2)$$

$$m_i \ddot{p}_i(t) = f_i(t). \quad (3)$$

なお, $i \in \{X, Y, Z, RX, RY, RZ\}$ は座標軸を表し, $p_i(t)$ は i 軸方向のロボットの手先の位置の変位で, $\dot{p}_i(t)$ および $\ddot{p}_i(t)$ は $p_i(t)$ の時間に関する一階微分と二階微分である. m_i, d_i, k_i はそれぞれ慣性, 粘性, 剛性パラメータの定数である. $f_i(t)$ はロボット手先に作用する外力の i 軸成分である. これらの制御則はそれぞれロボットの手先に外力に比例した位置の変位, 外力に比例した速度, 外力に比例した加速度を与えるものである. なお, 式 (1) と式 (2) による制御はそれぞれ剛性制御 (コンプライアンス制御), ダンピング制御であり, 我々の先行研究 (福本, 原田, 2018) でも利用された制御則である.

ここで, 力制御則で最も一般的なものはインピーダンス制御であるが, これはロボットの手先が

$$M \begin{bmatrix} \ddot{p}_X(t) \\ \ddot{p}_Y(t) \\ \ddot{p}_Z(t) \\ \ddot{p}_{RX}(t) \\ \ddot{p}_{RY}(t) \\ \ddot{p}_{RZ}(t) \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} \dot{p}_X(t) \\ \dot{p}_Y(t) \\ \dot{p}_Z(t) \\ \dot{p}_{RX}(t) \\ \dot{p}_{RY}(t) \\ \dot{p}_{RZ}(t) \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} p_X(t) \\ p_Y(t) \\ p_Z(t) \\ p_{RX}(t) \\ p_{RY}(t) \\ p_{RZ}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_X(t) \\ f_Y(t) \\ f_Z(t) \\ f_{RX}(t) \\ f_{RY}(t) \\ f_{RZ}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

を満たすようにロボットを制御するものである. ここで, M, D, K は 6×6 の行列である. この制御則は強力であるが, パラメータが非常に多いので適当なパラメータを設定するのに非常に手間がかかる. そこでパラメータを減らすことなどを目的として, M, D, K を対角行列 $M = \text{diag}(m_X, \dots, m_{RZ})$, $D = \text{diag}(d_X, \dots, d_{RZ})$, $K = \text{diag}(k_X, \dots, k_{RZ})$ に限定すること多いほか, $M = D = 0$ とした剛性制御 (コンプライアンス制御) や $M = K = 0$ としたダンピング制御が使われることも多い. 本研究で用いる制御則はこれらを組み合わせたものとなっており, M, D, K を対角行列とした上で, 更に各 i に対して m_i, d_i, k_i のうちいずれか二つをゼロにしたものである.

3・2 作業座標系

前節の制御則を適切に選択することを考えるにあたって, 重要なのが座標系である. 位置と力のハイブリッド制御において位置を制御する向きと力を制御する向きを適切に設定しないといけないのと同様に, 本手法においても適切な座標系の向きを設定していないとヒトの特性を適切に抽出できない.

なお複数の向きに同じ制御則を設定する場合であっても, 座標系の向きは重要である. 例えば簡単のため, X, Y の並進だけを考えた 2 次元の問題で考え, X, Y ともに剛性制御を実装する場合を考える. ヒトの剛性特性が図 2 に黒色の実線で記したような傾いた楕円 (剛性楕円) で表されるとする. なお剛性楕円とは, 各方向に単位変位を与えたときに生じる力をプロットしたものである. 一方, ロボットが前節の枠組みで X, Y 方向ともに剛性制御を行った場合,

$$\begin{bmatrix} k_X & 0 \\ 0 & k_Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_X(t) \\ p_Y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_X(t) \\ f_Y(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

という制御を行うことになるが, 剛性行列が対角行列であり, 剛性楕円は座標系に対して傾かない楕円しか表現できない. 図 2 (a) のようにヒトの剛性楕円の長軸・短軸の方向と座標系の軸の方向がずれているとヒトとロボットの特性に差が出てしまうが, 図 2 (b) のように向きが合っていると, ヒトの特性とロボットの特性をよく一致させることができるので, 座標系の向きを適切に決定することが求められる.

Fig. 2 Stiffness ellipsoid for both human and robot where the ellipse with the black and the red lines show the stiffness ellipsoid of a human and a robot, respectively. (a) shows a case where the working coordinate system is not appropriately set. (b) shows a case where the working coordinate system is appropriately set.

3・3 正規化相互相関 (NCC)

本研究で考えている式 (1) ~ (3) の制御則は力と位置の変位, 力と速度, 力と加速度がそれぞれ比例関係にある制御則である. したがって, ヒトの作業データを見た時に力と位置の変位が比例していれば式 (1) の剛性制御を利用するのが適当, 力と速度が比例していれば式 (2) のダンピング制御を利用するのが適当, 力と加速度が比例していれば式 (3) の制御を利用するのが適当と考えられる. そこで, 二つの信号が比例関係にあるかどうかを調べる指標を考える必要があるが, そのような指標として正規化相互相関 (Normalized Cross-Correlation: NCC) が利用できる.

時系列信号を表す二つのベクトル α と β の NCC は以下のように計算できる.

$$\text{NCC} = \frac{\langle \alpha, \beta \rangle}{\|\alpha\| \|\beta\|}. \quad (6)$$

ここで, $\langle \bullet, \bullet \rangle$ は内積を表し, $\|\bullet\|$ はノルムを表す. NCC は-1 から 1 までの値を取るよう正規化されており, 0 であれば無相関であり, NCC の絶対値が 1 に近づくほど二つの信号が比例していると言える.

なお, 一般的な相関係数では Zero-Normalized Cross Correlation (ZNCC) が用いられるが, ZNCC はそれぞれの信号の平均値がゼロになるようオフセットした信号について NCC を取ったものにあたる. つまり NCC は比例関係であるかどうかの度合いを示し, ZNCC は一次関数の関係であるかどうかの度合いを示したものと言える. 式 (1)~(3)ではオフセット項がないため ZNCC ではなく NCC で評価するのが適切である.

3・4 NCC を利用した制御則と座標系の決定手法

ヒトの作業データを用いて, 適切な作業座標系を設定するとともに, その座標系において適切な制御則を選択することを考える. 前節で NCC の高さがヒトと各制御則の特徴が一致する度合いを示すものであると説明し, NCC が高くなるデータの組み合わせを用いた制御則を選択すれば良いと述べた. 本節では作業座標系も NCC が高くなるように設定する. 以下に制御則と座標系を同時に決定する手法を示す.

まず $P_i, \dot{P}_i, \ddot{P}_i, F_i$ をヒトの作業データにおける i 軸方向の位置の変位, 速度, 加速度, 力を示す記号とする. $S_i \in \{P_i, \dot{P}_i, \ddot{P}_i\}$ とし, $S = [S_X, S_Y, S_Z, S_{RX}, S_{RY}, S_{RZ}]$ とする. 世界座標系 Σ_W を θ 回転した座標系 Σ_{FC} を作業座標系とすると, データ S_i と F_i を用いて Σ_{FC} 座標系における i 軸方向の NCC を計算したものを $\text{NCC}_i(S_i, F_i, \theta)$ と書くとする. なお, この NCC の計算は Σ_{FC} 座標系に座標変換されたデータを用いて計算する. このとき, S と θ を変数として, 以下の評価関数

$$\xi(S, \theta) = \sum_i (\text{NCC}_i(S_i, F_i, \theta) + 1)^2 \quad (7)$$

を考え, 最適化問題

$$\text{maximize: } \xi(S, \theta) \quad (8)$$

の解を求め、これらから制御則と座標系の向きを決定する. すなわち, 得られた解を S^* と θ^* と書くとする, 作業座標系 Σ_{FC} の向きは単純に θ^* とする. そして制御則の選択は, $S_i^* = P_i$ であれば Σ_{FC} 座標系の i 軸方向は式 (1) の剛性制御を実装し, $S_i^* = \dot{P}_i$ であれば式 (2) のダンピング制御を実装し, $S_i^* = \ddot{P}_i$ であれば力に比例した加速度を与える式 (3) の制御を実装することとする.

式 (7) では単純な NCC の二乗和ではなく, NCC に 1 を加えた値の二乗和としている. NCC は -1 から 1 の値を取るが, NCC が負の値の場合は負の相関を表し, 負の比例係数を考えることを意味する. 今, 式 (1) ~ (3) は比例ゲインを与えて力のフィードバックを行うものであり, 比例ゲインを負にした制御則は力に逆らって動くポジティブフィードバックを意味することになる. 更に, 絶対値の大きい負の比例ゲインはより強力なポジティブフィードバックを意味する. これらのポジティブフィードバックを避けるため, NCC の値に 1 を加えることで値の範囲を正に限定し, なるべく大きな NCC を取る制御則を選択する.

また, 式 (8) の最適化問題は連続変数だけでなく離散変数も含んでおり, 効率的には解けないクラスの問題である. しかし, 実際には離散変数の取り得る値は比較的少ないため, 取り得るすべての値を検討することが可能である. そこでまず, S の取り得る値を σ_i ($i = 1, \dots, 3^6$) とし, すべての σ_i について θ に関する最適化問題

$$\text{maximize: } \xi(\sigma_i, \theta) \quad (9)$$

の解を数値計算により求める. この数値計算には一般的な非線形最適化アルゴリズムが利用できる (例えば一般化簡約勾配法など) が, 局所最適に陥る可能性を考慮して多点スタートとするなどの対策が必要である. 式 (9) の最適化で得られた解を η_i とする. このとき j を

$$j = \arg \max_i \xi(\sigma_i, \eta_i) \quad (10)$$

とすると, 式 (7) の最適化問題の解 S^* と θ^* は以下で得られる.

$$S^* = \sigma_j, \quad (11)$$

$$\theta^* = \eta_j. \quad (12)$$

また, 3・2 節では複数方向に同じ制御則を設定する際にも座標軸の向きが適切でないとヒトの特性をうまく表せないことを説明した. 実は NCC が大きくなる向きに座標系の向きを設定することで, この問題もクリアしているということを以下で説明する. 3・2 節と同じく, X 軸方向と Y 軸方向の並進運動のみを考え, いずれにも剛性制御を実装する例を考える. 今, 図 2 (b) のヒトの剛性楕円の軸と軸の方向が一致する作業座標系を仮定し, κ_X, κ_Y をヒトの剛性パラメータとするとヒトの剛性特性は以下のように表される.

$$\begin{bmatrix} \kappa_X & 0 \\ 0 & \kappa_Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_X(t) \\ p_Y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_X(t) \\ f_Y(t) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

この特性のヒトが作業したときの(理想的な)データについて NCC を計算すると, 明らかに $NCC_X(P_X, F_X, \theta) = NCC_Y(P_Y, F_Y, \theta) = 1$ となる. 次に, 図 2(b) の作業座標系を ψ だけ回転した作業座標系を考えると, その作業座標系ではヒトの特性は座標変換により

$$\begin{bmatrix} \kappa_X \cos^2 \psi + \kappa_Y \sin^2 \psi & \kappa_X \sin \psi \cos \psi - \kappa_Y \sin \psi \cos \psi \\ \kappa_X \sin \psi \cos \psi - \kappa_Y \sin \psi \cos \psi & \kappa_X \sin^2 \psi + \kappa_Y \cos^2 \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_X(t) \\ p_Y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_X(t) \\ f_Y(t) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

となり非対角成分が現れる. したがってこの座標系の各軸方向で NCC を計算すると, 非対角成分の影響で $NCC_X(P_X, F_X, \theta)$ は 1 より小さく, $NCC_Y(P_Y, F_Y, \theta)$ も同様に 1 より小さくなるのが分かる. ただし, ψ が 90 deg の倍数のとき非対角成分はゼロとなるので, このとき $p_X(t)$ と $f_X(t)$ が完全に比例し $NCC_X(P_X, F_X, \theta)$ は 1 となる. Y 軸方向も同様である. すなわち, ヒトの剛性楕円の軸方向と作業座標系の軸方向が合う場合に NCC が最大となるので, NCC が最大となる方向を探索すれば適切な座標系の向きを設定できる.

なお, NCC はヒトの特性とどれだけ似ているかを示す指標であるが, これが最終的な作業品質を示す指標になるとは限らないことには注意が必要である. 例えば, ヒトが最適な動作をしていない場合などはヒトに似ていない別の制御方法を適用した方がうまく作業ができる場合も考えられる. また, ヒトとの違いが同じくらいの場合でも作業品質に影響のある違いと影響のない違いがある場合も考えられるため, 同じ NCC であっても作業品質が異なる可能性がある. 以上のような課題はあるものの, ヒトがある程度うまく作業しているとするのは自然な仮定であり, ヒトのような性能を実現するにはなるべくヒトに近い特性をロボットに持たせることが必要であるので最もヒトの特性に近い制御則や座標系の向きを採用することでヒトに近い性能を得られることが期待できる. そこでもし本提案手法で選択された制御則や座標系の向きで得られた作業品質が不十分であると判断された場合には, 上記の問題が影響している可能性があるため, 次節で説明するパラメータの最適化において座標系の向きをパラメータに加えた最適化を行うことで最適な座標系の向きに調整し直したり, 提案手法で選択された制御則を候補から除いて最適化を解き直したりすることで性能が向上する可能性がある.

3・5 滑降シンプレックス法による力制御パラメータの最適化

前節で力制御則と座標系は決定している. あとは力制御パラメータを決定すれば力制御が構築できる. 力制御パラメータは我々の先行研究 (福本, 原田, 2018) と同様に滑降シンプレックス法 (Nelder-Mead 法, アメーバ法) (Press et al., 1992) により決定する. なお前節で述べた通り, 最適化する変数として制御則の持つパラメータである m_i, d_i, k_i だけでなく, 座標系の向き θ を加えても良い. その場合は θ の初期値に前節の手法で得られた θ^* とその近傍の値を利用することで θ に関する探索を効率的に行えることが期待できる.

滑降シンプレックス法は多変数の非線形最適化に適用可能で, 目的関数の導関数を必要としないことが特徴となっている. 力制御において作業品質を最大化する際, 目的関数としては例えばワークに作用する力, サイクルタイム, 面取り加工作業における面取り幅の指定値との偏差などが想定されるが, これらの値は解析的に計算できるものではなく, 実機で実際に作業しないと計測が困難なものである. また外乱やノイズのせいでこれらの計測値は揺れることが想定され, 数値微分で導関数の値を得ることも困難である. したがって滑降シンプレックス法が力制御パラメータの最適化に適している.

4. 実 験

図 1 で示した油圧シリンダのピストン部先端の部品に対してリング状のゴムパッキンを取り付ける作業に提案手法を適用し, その有効性を検証する. まず提案手法に従い, ヒトのデータを NCC により解析して制御則と座標系の向きを決定し, 得られた制御則と座標系において滑降シンプレックス法による力制御パラメータの最適化を実施しパラメータを決定する. この提案手法により得られた制御則・座標系・パラメータでの実験結果を, 我々の先行研究 (福本, 原田, 2018) の結果と比較し, 力制御の設計者がヒューリスティックに制御則と座標系の向

Fig. 3 Experimental system. This system consists of a robot with force/torque sensor and rod-shaped tool and a scroll chuck on a rotation table. The scroll chuck fixes a part of hydraulic cylinder on which a ring-shaped packing will be assembled, and the chuck can rotate. A packing retainer is attached on the one of the jaw of the scroll chuck. The packing retainer can hold a packing on the side of the hydraulic cylinder part when the chuck closes. The direction of the world coordinate system is also drawn in the figure.

きを決定した場合と同等以上の制御を構築できることを示す。続いて、3・1節で設定した力制御則の候補が適切かどうかを検証する実験や、3・4節で示した制御則と座標系の向きの決定手法が適切かどうかを検証する実験を行い、提案手法による力制御設計が適切であることを確認する。

4・1 実験装置とパッキン取り付け作業

実験には図3の実験装置を用いた。なお本装置は先行研究(福本, 原田, 2018)で用いたものと同一である。本実験装置はロボット MOTOMAN-SDA10F(安川電機)と、ワークを固定して旋回させるジグからなる。本ロボットは双腕ロボットであるが、本実験では片腕のみを利用している。手先には本ロボットのオプションである力センサ WEF-6A1000-30-RG24 が取り付けられており、その先に棒状のツールが取り付けられている。またパッキンの取り付け先である油圧シリンダ部品(以下、ワーク)を固定・旋回させるジグは三つ爪のスクロールチャックを回転テーブルに乗せた構造となっている。スクロールチャックの爪の一つにはパッキンを金属ワークの側面に当てて押さえておく押さえ機構を取り付けてある。

パッキン取り付け作業では、取り付け作業中にパッキンに過大な力が作用するとパッキンに傷を与えてしまう可能性がある。そこで、取り付け作業中にパッキンに作用する力を最小限にすることが求められる。これを実現するため、ロボットの手先に作用する力をうまく受け流して低減できるよう力制御を構築した。力の評価の仕方として、力積やピーク値などが考えられるが、特に傷を避けるためには、弱い力が継続的に作用するよりも、大きな力が短時間に作用する撃力のような力がより影響が大きいと考え、取り付け作業中に手先に作用する力のピーク値を小さくすることを目指した。なおこの評価指標はパッキン取り付け作業に特化したものではない。例えば何かワークをハンドリングしている時にその対象物に傷を与えたくない、壊したくないというニーズは多く存在し、そのようなケースにおいても対象物に与える力のピーク値を小さくすることが必要となる。

4・2 提案手法の実装

ヒトの作業データの取得し、得られたデータを解析して力制御則と座標系の向きを決定し、ロボットで実機ベースの最適化を行うことにより力制御パラメータを決定する。なお簡単のため、先行研究と同様に水平面上の並進方向として X と Y の2軸のみを考えることとし、座標系の回転も X 軸を Y 軸に近づける向きの1自由度の回転 $\theta \in R$ として考える。2軸のみの運動であっても、軸ごとに異なった制御則を設定可能であることや、座標系の向きを検討する必要があることから、提案手法の有効性を検証するのに適った作業例である。

まず図4のようにロボットの力センサと棒状のツールに持ち手を付けたものを用意し、これをヒトが持ってパッキン取り付け作業を行って、その時の位置と力のデータを取得した。手先の位置は概ね水平面内の運動であったので、位置のデータは上方から30 fpsのカメラで測定して取得した。得られたデータを図5に示す。ここでの座標系は世界座標系 Σ_W の値であり、図3の中に示した座標系の向きである。

続いて、NCC を用いた解析を行った。例えば $\theta = 0$ [deg] で $S = [P_X, \dot{P}_Y]$ を考えるのと、 $\theta = 90$ [deg] で $S = [\dot{P}_X, P_Y]$ を考えるのは、最終的に実装される制御則としてはX軸とY軸の軸の名前を入れ替えただけにな

Fig. 4 Force data acquisition tool for a human. The tool and the force sensor are same as what the robot uses. A handle is attached to the force sensor.

Fig. 5 Position and force data when a human assembled with the bar-like tool and the rotating chuck which the robot uses. These values are measured in the world coordinate system.

Fig. 6 The optimization results when the data set S is fixed and only the direction θ is optimized to maximize the evaluation value $\xi(S, \theta)$ for each S are shown. The evaluation value of $S = [P_X, \dot{P}_Y]$ and $\theta = 3.9$ [deg] is the largest.

り、世界座標系で見たときに同値である。したがって、 S は $[P_X, P_Y]$, $[P_X, \dot{P}_Y]$, $[P_X, \ddot{P}_Y]$, $[\dot{P}_X, \dot{P}_Y]$, $[\dot{P}_X, \ddot{P}_Y]$, $[\ddot{P}_X, \ddot{P}_Y]$ の 6 パターンのみを考えれば良い。そこで、図 5 に示したヒトの作業データを用いて 6 パターンの S それぞれについて式 (9) の最適化問題を考え、その六つの最適化問題の解をそれぞれ多点スタートによる一般化簡約勾配法を用いて計算したところ、それらの最適値における評価値は図 6 のようになった。この結果から、これら 6 パターンの中から評価値が最大となる $S = [P_X, \dot{P}_Y]$, $\theta = 3.9$ [deg] が式 (8) で定義された最適化問題の解として得られた。したがって世界座標系 Σ_W から 3.9 deg 回転した作業座標系 Σ_{FC} において力制御を考えることとし、作業座標系 Σ_{FC} の X 軸方向では式 (1) による剛性制御、Y 軸方向では式 (2) によるダンピング制御を実装することとした。

力制御パラメータは k_X, d_Y の二つである。これらを実機ベースの滑降シンプレックス法によって決定した。評価値はロボットで取り付け作業を行った時の作業中に観測された力のピーク値とした。ただし、手先の位置が振動した場合は安全上好ましくないで、ペナルティとして評価値を十分大きい値とした。なお、本実験の探索で試行したパラメータのうち振動を起こさなかったパラメータについてはいずれも取り付け作業に成功したが、もし取り付け作業に失敗するパラメータがあれば、そのようなパラメータについてもペナルティとして評価値を十分大きい値とすることなどが望ましい。探索の中で力制御パラメータが負になった場合はネガティブフィードバックを形成するので、当該力制御パラメータには代わりに 0 を代入して評価値計測実験を行った。2 変数の最適化なので、3 点からなるシンプレックスを利用した。初期値は手探りで荒く探索する下実験を行って選択した。探索の停止条件は、シンプレックスを構成する 3 点の中で評価値が最良である点が 3 回同じ点のまま動かなかった場合とした。

滑降シンプレックス法により得られた力制御パラメータを用いて、10 回の取り付け実験を行った結果を図 7 に示す。ここでは 10 回の試行でそれぞれ計測された力のピーク値データ 10 個についての最大値、平均値、最小値をプロットしてある。(混乱を避けるため、本論文では以後「ピーク値」は 1 回の試行で得られた力の時系列データにおける力の大きさの最大値を表し、「最大値」は 10 個のピーク値の中の最大値を表すものとする。) なお、参考データとしてヒトがロボットと同じツールと方法で取り付けを行った際のデータも併せて示している。提案手法では手先に作用する力は平均で 18.5 N であり、ヒトの平均である 15.0 N との差はわずか 3.5 N であった。また、ピーク値のばらつきを示す最大値と最小値の差は提案手法が 4.5 N でヒトが 4.4 N となっており、ばらつき量については同等の性能であった。提案手法による取り付けを行った時の位置と力の時間変化を図 8 に示す。なお、この計測値は世界座標系のものである。位置について、X 方向も Y 方向もヒトに近い波形である。力については X 方向はヒトに近い波形であるが、Y 方向はヒトが 0.69 s の時点で最大 3.7 N を観測した後は小さく収まり X, Y, Z の 3 方向の力の合力の大きさがピークとなる 1.72 s では 0.6 N まで下がってゼロに近い値に収まっているのに対して、ロボットでは 1.8 s 付近まで値は大きいままになっており、1.66 s では最大値となる 10.3 N を観測し、1.72 s でも依然 9.1 N という大きな力が観測されている。Y 方向の力がヒトより大きいことが全体の合力でもヒトより大きくなっている理由と言える。なお、 $S = [P_X, \dot{P}_Y]$ で、 $\theta = 3.9$ [deg] のとき、(作業座標系 Σ_{FC} の) X 方向の NCC は 0.93 で、Y 方向の NCC は 0.79 であった。従って Y 方向の制御則は X 方向ほどヒトの特徴を捉えられていないと言える。3.9 deg の回転は比較的小さいので、これが世界座標系 Σ_W での計測値で Y 方向におけるヒトとの差が X 方向より大きいという結果に繋がっていると考えられる。

4・3 先行研究 (福本, 原田, 2018) の結果との比較

先行研究 (福本, 原田, 2018) との比較を行う。制御則については、提案手法は先行研究と同じ制御則を選び出している。座標系の向きは先行研究では元々ロボットが持っていた座標系の向きをそのまま利用していたが、今回の提案手法では先行研究の座標系から 3.9 deg ずれた向きの座標系を選択することになった。

得られた制御則と座標系において滑降シンプレックス法による力制御パラメータの最適化も行った後の、最終の性能を比較する。先行研究と提案手法の力制御においてそれぞれ 10 回の試行を行った時の取り付け時の力のピーク値の最大、平均、最小を図 9 に示す。先行研究の手法では平均で 21.4 N となっていたが、提案手法では 18.5 N まで低減できており、性能がやや向上していることが分かる。なお最大値と最小値の差を見ると、先行研究の手法では 3.1 N で提案手法では 4.5 N であり僅かに提案手法の方が大きいものの同等のばらつき度合いであると言える。

Fig. 7 The peak forces of the method of the proposed method and a human. The maximum, the average and the minimum values of ten trials are plotted. The difference between the proposed method and the human is only 3.4 [N] in average.

Fig. 8 An example of the position data and the force data when the robot assembled a packing with the proposed method. These values are measured in the world coordinate system.

したがって提案手法は、先行研究の手法では設計者が判断していた制御則の選択の自動化を可能にしたものであるが、その性能はヒトの設計者と同等以上であることが確認された。

4・4 制御則の候補の検証

3・1節では提案手法における制御則の候補を式 (1) ~ (3) とした。これらはインピーダンス制御のうちいくつかのパラメータをゼロにしたものであった。パラメータを減らすことにより、パラメータの調整は簡単化するが、しかし同時に、パラメータを減らしたことにより制御則の持つ表現力が落ちるトレードオフが存在する。パラメータの少ない提案手法でもヒトに近い性能を達成していることは4・2節において確認されており、制御則の妥当性は一定確認されているところであるが、本節では更なる検証を行う。

パラメータを増やすことで制御則の表現力が増せば性能向上が見込めるが、ヒトの作業データから直接パラメータを得るのではなくパラメータの値を実機で最適化する場合、ヒトの性能が上限であるとは限らず、ヒト以上の性能を達成できるポテンシャルがある。そこで本節では、NCCの解析で選ばれた制御則にパラメータを増やした時の振る舞いを確認する。この時に、性能向上が限定的であれば提案手法の制御則の候補はパラメータ調整の手間を減らしながら良い性能を達成できる手法であると言える。

4・2節において、提案手法では作業座標系 Σ_w のY方向の制御がヒトよりも性能が悪いと述べた。そこで、Y軸方向の制御則について、粘性に加えて剛性、あるいは慣性を加えた制御則として

Fig. 9 The peak forces of the method of the proposed method and the method of the previous research. The maximum, the average and the minimum values of ten trials are plotted. This graph shows the proposed method can reduce the peak force more than the previous method.

Fig. 10 The peak force of the proposed method and that of a control law which an inertia parameter is added to the control law of the proposed method. By adding a parameter, the force is reduced, but the effect is limited.

$$d_Y \dot{p}_Y(t) + k_Y p_Y(t) = f_Y(t) \quad (15)$$

$$m_Y \ddot{p}_Y(t) + d_Y \dot{p}_Y(t) = f_Y(t) \quad (16)$$

の2種類を実装し、性能をどれだけ上げられるかをそれぞれ検証する。なお、作業座標系 Σ_W の向きは提案手法で得られた向きのまま ($\theta = 3.9$ [deg]) で考える。

本制御則を実装し、パラメータの最適化を行った。式 (15) の剛性項を加えた制御則においては $k_Y = 0$ に収束し、提案手法の制御則と同じになった。一方、式 (16) の慣性項を加えた制御則では性能改善が見られた。図 10 は提案手法、式 (16) の制御則、ヒトでそれぞれ 10 回取り付けを行った結果である。平均のデータを見ると、慣性パラメータを増やした式 (16) の制御則は提案手法から 1.4 N の改善をしているが、ヒトを超えるような大幅な改善は見られず、その改善量は限定的であったと言える。また、ばらつきを示す最大値と最小値の差は 2.5 N であり提案手法の 4.5 N から小さくなっているものの、最小値の値は 16.1 N であり提案手法の 16.4 N とほぼ変わっておらず依然ヒトの平均値である 15.0 N よりも大きい。パラメータを増やすことでパラメータ調整の手間が大きくなることとのトレードオフがあることを考えると、パラメータを減らしながら一定の性能を得ている提案手法は実用上有効である。

4・5 制御則の決定手法の検証

3・4 節では NCC が最も高くなるデータを利用して制御を行うことを提案したが、本節ではこの方法で得られた制御則が本当に最も性能が良いかどうかを検証する。具体的には X 方向と Y 方向の制御則として式 (1) ~ (3) の組み合わせを変更して実験を行う。座標系の向きについては各制御則の組み合わせに対応する NCC が最大になる向きを探索して決定する。つまり、例えば X 方向と Y 方向の両方に式 (1) の剛性制御を実装する実験では、 $S = \sigma_i = [P_X, P_Y]$ に固定して式 (9) の最適化を行って得られた $\theta = \eta_i$ を座標系の向きとして利用する。なお、X 方向と Y 方向の制御則を入れ替えた組合せは上記最適化における座標系の回転により等価になるので省略可能である。したがって表 1 の 6 パターンの制御則を比較する。なお、No. 2 のパターンが提案手法で選択された制御則である。力制御パラメータはそれぞれ滑降シンプレックス法による実機ベースの最適化を用いて調整した。

図 11 は得られた各力制御の性能をプロットしたもので、10 回の試行における力のピーク値の最大、平均、最小をプロットしている。平均値について見ると提案手法である No. 2 の力が最も小さく抑えられており 18.5 N となっている。2 番目に小さい No. 4 の 25.0 N と比べても大幅に低く抑えられている。また力のばらつき度合いを

Table 1 The force control methods to be compared. These are the combinations of a stiffness control of eq. (1), a damping control of eq. (2) and a force control of eq. (3).

No.	X direction	Y direction
1	Stiffness control of eq. (1)	Stiffness control of eq. (1)
2	Stiffness control of eq. (1)	Damping control of eq. (2)
3	Stiffness control of eq. (1)	Force control of eq. (3)
4	Damping control of eq. (2)	Damping control of eq. (2)
5	Damping control of eq. (2)	Force control of eq. (3)
6	Force control of eq. (3)	Force control of eq. (3)

Fig. 11 The peak forces of the six types of force controls. The numbers of control laws are defined as Table 1. No. 2 is the proposed method, and the others use the other force control laws which are not selected in proposed method. The maximum, the average and the minimum values of ten trials are plotted. The proposed method can reduce the peak force most. It shows that the force control law selection of the proposed method works well.

示す最大と最小の差については、No. 3 が提案手法である No. 2 の値の 4.5 N に対しておよそ倍となる 9.2 N となっておりばらつきが大きい。No. 3 以外の制御則については 3 N から 4.5 N の間の値であり提案手法と同程度である。従って提案手法により適当な制御則が選ばれたことが確認された。なお図 6 に示した NCC による評価値と図 11 で示した性能について一部大小関係が一致しない箇所が存在しているが、これは 3・4 節で述べたように NCC がヒトの特性にどれだけ似ているかを示す指標であり直接的に性能の良さを示す指標ではないことに起因していると考えられる。

4・6 作業座標系の向きの決定手法の検証

3・4 節では作業座標系を NCC が高くなる向きに設定することを提案している。本節では作業座標系の向きを NCC が最も高くなる向きからずらして実験を行い提案手法と比較することで、提案手法の座標系決定手法が適切であることを確認する。また、力制御パラメータの最適化において、座標系の向き θ も最適化の変数として力制御パラメータと同時に最適化することで更に良い結果が得られることも確認する。

上記の検証を行うため 3 種類の実験を行った。一つは提案手法の角度で最適化された力制御パラメータをそのまま利用して、作業座標系のみを -30 deg から 30 deg まで 5 deg 刻みで回転させて取り付け実験を行ったときの力を計測したものである。本来であれば座標系の向きが変化するとパラメータも最適化し直す必要があるが、 $\pm 30 \text{ deg}$ 以内という比較的狭い領域ではパラメータを最適化し直さないことによる影響は十分小さいと想定して、パラメータの再最適化を省いた簡易な計測を行うものである。二つ目の実験は、上記の領域の両端である $\pm 30 \text{ deg}$ について実際に最適化をやり直して得た力制御パラメータを用いて取り付け実験を行ったときの力を計測したものである。これにより一つ目の実験で再最適化を省いたことの影響を確認した。三つ目は、力制御パラメータの

Fig. 12 The peak forces when the coordinate system is rotated are plotted. Three types of experiments are conducted: one is experiments with the optimized parameters for the angle obtained the proposed method (w/o re-optimization), another is experiments with the optimized parameters for that angle (re-optimized), the other is experiments with the parameters that are obtained by optimizing both the force control parameters and the angle (optimized including theta). This shows the proposed method gave an angle slightly deviated from the best direction.

最適化において座標系の向きも変数に含めて最適化したパラメータで取り付け実験を行ったものである。これは最適化する変数が増えることで解の探索に要する作業時間は増えるが、それにより実際にどのような性能が得られるかを試したものである。

図 12 が実験結果である。いずれも 10 回の試行の平均値をプロットしている。提案手法をそのまま適用した結果と、先行研究の方法の結果についても、それぞれ角度変位 0 deg, -3.9 deg のところに力制御パラメータを最適化し直したデータとみなしてプロットしている。まず ± 30 deg の値を見ると、パラメータを最適化し直した時と最適化し直していない時の差は -30 deg で 3.79 N, +30 deg で 0.17 N と軽微であり、最適化し直していない場合のデータでも角度変位に対する傾向は十分掴めると考えられる。そして最適化し直していないパラメータで角度を変えて実験した結果では NCC 解析で得られた角度から 10 deg ずらしたところが最も低い力で 14.3 N となっている。また、10 deg から離れるほど力の値が大きくなって、+30 deg では 38.4 N, -30 deg では 30.1 N に至り、いずれも 10 deg の場合の倍以上の力になっている。座標系の向きによる性能差は大きく、適切にその角度を設定する必要があることが分かる。提案手法によって得られる角度は最適角度から 10 deg 程度ずれていたが、ヒトの設計者が設定した角度より 3.9 deg ほど最適角度に近い角度が得られた。なお、NCC による解析では最適な角度が得られる保証はないことは 3・4 節で述べた通りである。

また、力制御パラメータの最適化の際に座標系の向きも変数に加えて最適化を行った結果では NCC の解析で得られた角度から 8.7 deg ずれた角度が最適な座標系の向きとなり、図 7 で示したヒトの結果を超える性能を実現した。その差は僅か 1.6 N ではあるが、このことはヒトが最適な動作を行っていなかった可能性を示している。ヒトが最適でなければ、ヒトのデータを解析しても最適な動作を実現することができない。本実験ではヒトの作業データを参考にしつつ、最適化の技法を組み合わせるというアプローチの有効性が示唆されたと言える。

本節では提案手法における NCC の解析による作業座標系の向きの決定方法が適切かどうかを検証するため、座標系の角度をずらした時の性能を確認した。実験の結果、提案手法により最適近傍の角度が得られることが確認された。更に、座標系の向きも含めて力制御パラメータの最適化を行った場合には、更に性能を高めることができ、ヒトの性能を僅かに超える性能を得ることができた。

5. 結 言

本論文ではヒトが作業を行ったときの位置や力のデータを基にして適切な座標系の向きと適切な力制御則を決定する手法を提案した。具体的には、ヒトの作業データにおいて位置と力の相関が高ければ剛性制御を用い、速度と力の相関が高ければダンピング制御を用いるといった方法により力制御則を決定する。その際、座標系の向

きを変えてみて相関が高くなる向きを探索することで適切な座標系の向きを選択する。そして力制御パラメータについては滑降シンプレックス法により最適化することとした。提案手法を油圧シリンダ部品にリング状のゴムパッキンを取り付ける作業に適用する実験を行ったところ、ヒトの設計者がヒューリスティックに制御則や座標系の向きを決定したのと同等以上の性能の力制御を構築することができた。また、パラメータ数を増やした制御則との比較、提案手法で選択されなかった別の力制御則との比較、座標系の向きを提案手法で得られた角度からずらした場合の比較実験を行い、提案手法が適当な力制御則と座標系の向きを与えていることが検証された。一方、同検証実験では平面内に限定された運動を扱っているが、より複雑なシチュエーションとなる3次元空間内での自由な運動でも検証を行うことは今後の課題である。その際、力制御パラメータが増えることによりパラメータ最適化において解の探索作業にかかる時間が増加することが予想されるので、より効率的な力制御パラメータ調整の手法や調整すべきパラメータの絞り込みの手法、あるいはそもそも力制御を行わない方向を作ることなどについて更なる検討も必要になると予想される。また位置や力の目標軌道がある場合について拡張する方法の検討なども今後の課題として挙げられる。

文 献

- Ajoudani, A., Tsagarakis, N. G. and Bicchi, A., Tele-impedance: towards transferring human impedance regulation skills to robots, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*(2012), pp.382–388.
- 安藤慎悟, 永井亮一, 井上康之, 組立作業のためのインピーダンス制御粘性パラメータの自動調整, *日本ロボット学会誌*, Vol.29, No.7 (2011), pp.564–572.
- 浅田春比古, 浅利幸生, 熟練作業者の動作計測による工具支持インピーダンスの同定とロボットの作業教示, *計測自動制御学会論文集*, Vol.24, No.12 (1988), pp.1292–1298.
- Burdet, E., Franklin, D. W. and Milner, T. E., *Human robotics: neuromechanics and motor control*, The MIT Press (2013) .
(渡邊嘉二郎, 小林一行, 栗原陽介 監訳, ヒューマンロボティクス 神経メカニクスと運動制御, 丸善出版 (2017))
- 榎本敦子, 杉本浩一, 松本義雄, マスタ・スレーブシステムを用いた磨き動作の作業モデルの獲得 (作業モデルに基づくモデルベース制御の統一的手法), *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.68, No.676 (2002), pp.3620–3627.
- 福本靖彦, 原田研介, 熟練作業者の動力学特性に基づいた力制御による柔軟なリング状部品の取り付け作業, *日本ロボット学会誌*, Vol.36, No.2 (2018), pp.159–167.
- Gribovskaya, E., Kheddar, A. and Billard, A., Motion learning and adaptive impedance for robot control during physical in-teraction with humans, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2011), pp.4426–4432.
- Hirai, S., Inatsugi, T. and Iwata, K., Learning of admittance matrix elements for manipulative operations, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (1996), pp.763–768.
- 板橋界兄, イエ世薫, 鈴木達也, 大熊繁, 隠れマルコフモデルに基づく人間の技能の獲得, *計測自動制御学会論文集*, Vol.34, No.8 (1998), pp.890–897.
- Lee, A. X., Lu, H., Gupta, A., Levine, S. and Abbeel, P., Learning force-based manipulation of deformable objects from multiple demonstrations, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2015), pp.177–184.
- 望月宣宏, 松井隆, インピーダンス制御を応用したハイブリッド制御の直接教示法, *日本ロボット学会誌*, Vol.12, No.2 (1994), pp.328–334.
- Press, W. H., Vetterling, W. T., Teukolsky, S. A. and Flannery, B. P., *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press (1992), (丹慶勝市, 奥村晴彦, 佐藤俊郎, 小林誠 訳, *Numerical Recipes in C [日本語版]*, 技術評論社 (1993)).
- Racca, M., Pajarinen, J., Montebelli, A. and Kyrki, V., Learning in-contact control strategies from demonstration, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (2016), pp.688–695.
- 田中健太, 木原康之, 横小路泰義, 人間の直接教示動作の統計的性質に基づいた折り紙ロボットの目標軌道とセンサフィードバック則生成法, *日本ロボット学会誌*, Vol.27, No.6 (2009), pp.685–695.
- 辻敏夫, ヒトの上肢運動のしなやかさを計測する, *計測と制御*, Vol.35, No.9 (1996), pp.689–695.
- 津坂優子, 岡崎安直, 小松真弓, 横小路泰義, 人からの手づたえ教示によるロボットアームのその場動作修正法の開発, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.78, No.791 (2012), pp.2450–2461.
- 山野辺夏樹, 前田雄介, 新井民夫, 渡邊淳, 加藤哲朗, 佐藤貴之, 畑中心, サイクルタイムを考慮した力制御パラ

メータ設計, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.4 (2006), pp.554–562.

尹祐根, 末廣尚士, 音田弘, 北垣高成, バイラテラル遠隔操作を利用したタスクスキルトランスファー手法, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.1 (2007), pp.155–165.

Zhang, B., Gravel, D., Zhang, G., Wang, J. and Bell, A., Robotic force control assembly parameter optimization for adaptive production, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2011), pp.464–469.

References

- Ajoudani, A., Tsagarakis, N. G. and Bicchi, A., Tele-impedance: towards transferring human impedance regulation skills to robots, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)(2012), pp.382–388.
- Ando, S., Nagai, R. and Inoue, Y., Automatic damping tuning of impedance control for assembly task, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.29, No.7 (2011), pp.564–572 (in Japanese).
- Asada, H. and Asari, Y., The identification of tool suspension impedance via the measurement of expert motions and its application to robot teaching, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.24, No.12 (1988), pp.1292–1298 (in Japanese).
- Burdet, E., Franklin, D. W. and Milner, T. E., Human robotics: neuromechanics and motor control, The MIT Press (2013).
- Enomoto, A., Sugimoto, K. and Matsumoto, Y., Acquisition of skilled operation model of polishing work with master-slave system: a unified algorithm of control based on operation model, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.68, No.676 (2002), pp.3620–3627 (in Japanese).
- Fukumoto, Y. and Harada, K., Force controlled assembly of a ring-shaped elastic part based on dynamic characteristics of skilled workers, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.36, No.2 (2018), pp.159–167 (in Japanese).
- Gribovskaya, E., Kheddar, A. and Billard, A., Motion learning and adaptive impedance for robot control during physical interaction with humans, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2011), pp.4426–4432.
- Hirai, S., Inatsugi, T. and Iwata, K., Learning of admittance matrix elements for manipulative operations, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (1996), pp.763–768.
- Itabashi, K., Yea, S., Suzuki, T. and Okuma, S., Acquisition of the human skill with hidden Markov model, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.34, No.8 (1998), pp.890–897 (in Japanese).
- Lee, A. X., Lu, H., Gupta, A., Levine, S. and Abbeel, P., Learning force-based manipulation of deformable objects from multiple demonstrations, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2015), pp.177–184.
- Mochizuki, Y. and Matsui, T., Direct teaching method for hybrid control applying impedance control, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 12, No.2 (1994), pp.328–334 (in Japanese).
- Press, W. H., Vetterling, W. T., Teukolsky, S. A. and Flannery, B. P., Numerical Recipes in C, Cambridge University Press (1992).
- Racca, M., Pajarinen, J., Montebelli, A. and Kyrki, V., Learning in contact control strategies from demonstration, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (2016), pp.688–695.
- Tanaka, K., Kihara, Y. and Yokokohji, Y., Desired trajectory and sensory feedback control law synthesis for an origami-folding robot based on the statistical feature of direct teaching by a human, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.27, No.6 (2009), pp.685–695 (in Japanese).
- Tsuji, T., Measure the liveness of human arm movements, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 35, No.9 (1996), pp.689–695 (in Japanese).
- Tsusaka, Y., Okazaki, Y., Komatsu, M. and Yokokohji, Y., Development of in-situ robot motion modification method by hand-guiding instruction, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.78, No.791 (2012), pp.2450–2461 (in Japanese).
- Yamanobe, N., Maeda, Y., Arai, T., Watanabe, A., Kato, T., Sato, T. and Hatanaka, K., Design of force control parameters considering cycle time, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.24, No.4 (2006), pp.554–562 (in Japanese).
- Yoon, W.-K., Suehiro, T., Onda, H. and Kitagaki, K., Task skill transfer method using a bilateral teleoperation, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.25, No.1 (2007), pp.155–165 (in Japanese).
- Zhang, B., Gravel, D., Zhang, G., Wang, J. and Bell, A., Robotic force control assembly parameter optimization for adaptive production, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2011), pp.464–469.