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

福本 靖彦^{*1*2} 原田 研介^{*2*3}

Force Controlled Assembly of a Ring-shaped Elastic Part Based on Dynamic Characteristics of Skilled Workers

Yasuhiko Fukumoto^{*1*2} and Kensuke Harada^{*2*3}

This paper proposes a novel method for assembling a ring-shaped elastic part to a cylinders' outer groove by using an industrial robot. To assemble a ring-shaped elastic part, forces acting on an elastic part should be made as small as possible. In our proposed method, while the force control strategy itself is determined based on the human characteristics, the parameters of the controller is determined by using a numerical optimization. First, the position data and the force data while a human demonstrates the assembly are measured. Then they are qualitatively analyzed and two control methods are derived. However, we do not obtain the parameters of the force control from the human data. This is because the performance, for example the response characteristics, of robots is different from that of human and the parameters obtained from human data are not necessarily suitable for robots. Thus we obtain the parameters by an optimization with the downhill simplex method which is feasible for an optimization based on actual machine. To confirm that the applied force is significantly reduced, we conduct experiment and compare two force control methods.

Key Words: Industrial Robot, Assembly, Force Control, Ring-shaped Flexible Part

1. 緒 言

油圧シリンダ部品の組み立て工程などにおいて、円柱状のワークにリング状のゴムパッキンを取り付ける作業がある。特に剛性の高いパッキンにおいて、その取り付け作業は重労働であり自動化の要求は大きい。また、パッキンは傷や永久ひずみなどによって損傷があるとシール性能が劣化して油などが漏れる恐れがあるため、取り付け時にはパッキンに過大な力を掛けないことが望まれる。これまで筆者らはロボットにより柔軟性を有するリング状部品の円柱状ワークへの取り付け問題について検討を行ってきた[1]~[3]。

このような問題に対して、本論文はパッキンなどの柔軟なリング状部品に作用する負荷を低減するための手法を新たに提案する。ヒトが作業を行う場合、ヒトは扱う対象に余計な負荷を

加えないよう丁寧に作業を行っている。一方、ロボットが作業を行う場合、金属など非常に丈夫な対象物を扱うのであれば多少大きな力が作用しても対象物を破壊することはないが、本論文で対象としているパッキンなどの柔軟な部品の取り付け作業では、前述のとおり対象物にダメージを与えないことを考慮する必要がある。そこで本研究では、ヒトによる柔軟な部品の取り付け時の手先の動きや手先に作用する力を解析し、それを基にロボットに力制御を実装することでヒトの動力学特性に基づいた取り付け方法について検討する。

ヒトの特性を基にロボットに力制御を行わせている研究の例として[4]~[14]がある。浅田ら[4]や望月ら[5]はヒトが作業を行うときの力や位置のデータを解析してハイブリッド制御のパラメータを得ており、板橋ら[6]や津坂ら[7]は同様にインピーダンス制御のパラメータを得ている。Ajoudaniら[8]はヒトの力と位置の関係ではなくヒトの筋電位をセンシングすることでヒトのインピーダンスを推定してロボットのインピーダンス制御のパラメータとしている。田中ら[9]はヒトの作業データから位置の目標軌道を抽出するとともに、対象物等の環境の揺らぎに対応するためのセンサフィードバック則も同時に得ている。Leeら[10]は位置だけでなく力の目標軌道も抽出し、ヒトの作業データから得たインピーダンスを用いたインピーダンス制御を行って環境の揺らぎに対応している。また、榎本ら[11]や尹

原稿受付 2017 年 5 月 2 日

^{*1}香川県産業技術センター

^{*2}大阪大学大学院基礎工学研究科

^{*3}国立研究開発法人産業技術総合研究所

^{*1}Kagawa Prefectural Industrial Technology Research Center

^{*2}Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{*3}Intelligent Systems Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

■ 本論文は有用性(要素分野)で評価されました。

ら [12] はマスタ・スレーブ型のロボットにおいてスレーブにインピーダンス制御を実装しておき、それをマスタ側からうまく操作するときの操作入力をタスクとして抽出する方法を提案している。Gribovskaya ら [13] や Racca ら [14] はヒトが作業を行うときの位置と力のデータを再現するため、インピーダンス制御の剛性パラメータを動的に変更することでヒトの位置と力の両方をバランス良く追従させている。ここで、これらの従来手法においては、インピーダンス制御におけるインピーダンスパラメータをヒトの動力学的特性に基づいて決定している。しかしながら、従来の手法においては、以下に示す二つの問題点が存在する。まず一つめは、仮にヒトの手のインピーダンス特性が得られたとしても、それがロボットが作業を行う際の最適なインピーダンス特性とは限らないということである。次に二つめは、ヒトの作業中における手先のインピーダンス特性を得ること自体が容易ではない [15] [16] ということが挙げられる。このような問題点を考慮し、本研究ではヒトのインピーダンス特性を完全にロボットに移植することを目指すのではなく、ヒトの動特性の定性的な解析からロボットの力制御則を導出し、その上でロボットに適した力制御のパラメータを最適化問題を解くことで得ることを考える。これにより、ヒトの特性を基にしたロボットの作業性も考慮した制御が得られると期待される。

続いてパッキン取り付けの問題を柔軟物操作の問題としての側面から考える。一般に柔軟物操作においては対象物体の変形などをモデル化して解析するアプローチと、対象物体の挙動はブラックボックスのままヒトが作業を実演したデータから作業方策を導くアプローチがある [17]。本研究においては、リング状部品の三次元的な変形、閉ループ機構、摩擦力といった複雑な要因により前者のアプローチを取ることは難しく、後者のアプローチによりヒトの作業における定性的な解析から制御方策を導く。また、柔軟物操作の操作対象では布、紙、薄板などの平面物体や、ひもや針金などの線状物体を扱う例は比較的多い [17] が、本研究が対象とするリング状の柔軟な対象物は対象物自体が閉ループを有するため、線状物体とは別の取り扱いをする必要があるが、リング状の柔軟対象物を扱った例は少ない。ここで、ラミレスら [18] や村瀬ら [19] はリング状の柔軟部品の組立作業の研究を行っているが、比較的剛性が低いリング状の対象物を想定しているため、本論文で対象としているパッキンへの適用は難しいと考えられる。このほか、デンソー [20] や三菱電機 [21] などの特許では複数本の爪でリングを内側から広げ、取り付け溝の位置で押し出す機構が提案されており、SCHUNK は 6 本のツメでリングを内側から六角形状に広げ、取り付け溝の位置で 3 本ずつ順番に抜くことでうまく取り付け溝にはめ込むグリッパ ORG [22] を販売しており、日産自動車 [23] やガスター [24] の特許ではテーパのついた筒状のジグを使ってリング全体を弾性変形させながら押し広げ、取り付け溝の位置で開放するタイプの機構が提案されているが、これらも剛性の低いリングを想定しており本研究の対象とは異なる。

以下、本論文では 2 章で対象とするパッキン取り付け作業について述べ、3 章でロボットによる取り付けの概要を述べ、4 章でヒトの動力学的特性に基づいた力制御則の提案を行い、5 章で提案手法をロボットに実装して実験により有効性を確認した結

果を示し、6 章でまとめを述べる。

2. パッキン取り付け作業

Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 にはヒトが油圧シリンダ用のパッキンなどに用いられる柔軟なリング状の部品を円柱部品に取り付ける際の三種類の方策について、その概要を示す。Fig. 1 には最も直感的な手法として、いったんパッキンを半径方向に均一に伸ばし、そのうえで円柱に組み付ける手法 [20]~[24] を示す。ただし、この手法では最初にパッキンをなんらかの方法で均一に伸ばす必要がある。また、この手法は通常特殊工具を用いる必要があり、パッキンに比較的大きな弾性変形を生じさせなくてはならない。それに対して、油圧シリンダ用のパッキンの取り付け作業ではパッキンを必要以上に弾性変形させないことが求められる。傷や永久ひずみの恐れがあることに加え、剛性が高いため大きな伸びを作ること自体が困難であることも理由である。そのため、取り付けにおいては全体を広げる Fig. 1 のような方法ではなく、パッキンに必要以上の弾性変形を加えない Fig. 2 のような方法が一般的である。この手法では、最初にパッキンの一部をシリンダの縁にひっかけ、そのうえで手を使ってパッキンの一部を伸ばすことにより、パッキンがシリンダに掛かる領域を徐々に増やす。パッキンがシリンダの全周にわたって掛かると、パッキンをずらして溝にはめる。この手法ではパッキンの伸びが抑えられることで伸ばすための力もある程度減る

Fig. 1 An intuitive assembly method of a ring-shaped packing by a human worker where a packing moves straight down toward a cylinder

Fig. 2 An assembly method by a human worker without using a bar-like tool in which he/she still has to apply large force onto the packing

Fig. 3 Assembly of a ring-shaped packing by a human worker using a bar-like tool where (a) he/she first sets a ring-shaped packing on a cylindrical work, (b) moves the tool along the surface of the cylinder to assemble the packing, (c) rotates the cylindrical work, and (d) finally completes the assembly

ことが期待できる。しかしながら、ここではさらに少ない力でパッキンの取り付けが可能になるように、細い棒状のツールを用意して腕全体で無理なく力をかけられるようにすることを考える。Fig. 3は、この細い棒状のツールを利用した例を示す。この手法では、ツールをパッキンに引っ掛けた状態で取り付け溝に添わせて油圧シリンダの周囲を一周することで取り付け作業を行うものである。まず、Fig. 3(a)のようにパッキンをワークに添えた状態で、ツールをパッキンに引っ掛けて油圧シリンダの取り付け溝の上端部にセットする。ツールの角度は作業台とほぼ平行である。そこからツールを溝に添わせて少し動かすとFig. 3(b)の状態になる。そこから全体を少し逆方向に回してFig. 3(c)のように角度を戻して、再度ツールのみを動かしてパッキンの残りの部分をはめ込むとFig. 3(d)のとおり取り付けが完了する。途中で全体を逆方向に回転しなおす過程を挟んでいるのは、そうしないとツールを持った手がワークの奥の側まで回り込む結果、腕が力を入れにくい姿勢になって作業性が悪くなるためである。パッキンの取り付け作業では、油圧シリンダの全周にわたってパッキンを取り付け溝に嵌めるが、それを実現するには半径方向に押し広げて溝上部の径の広い部分の外側に持っていくことと、高さ方向に押し下げて溝の高さまで持っていく二つの操作が必要である。この細い棒状のツールを用いた方法では、**Fig. 4(a)**のようにツールによってパッキンを径方向に拘束しながら、同時に**Fig. 4(b)**のように高さ方向への拘束も実現しており、そのままツールを周方向へ動かしていくと二つの拘束により少しずつパッキンが半径方向に広げられつつ溝の高さに押し下げられて溝に入っていく仕組みとなっている。

3. ロボットによる取り付け方法

2章においてFig. 3で示した棒状のツールを使った取り付け

Fig. 4 Explanation of mechanism to assemble a ring-shaped packing where the tool constrains the motion of a ring-shaped packings in both radial and directions

(a) Full view

(b) Tool (c) Packing retainer

Fig. 5 Experimental system

手法をロボットにより自動化することを考える[1]。本章では比較実験として用いる動作教示のみを用いてロボットを動作させる手法を説明し、次章において力制御を導入することにする。ロボットに動作を教示する際には、Fig. 3(b)からFig. 3(c)におけるワークの姿勢を調整する過程を省き、ワークを固定したうえでツールをワークに沿って一周させる動作が比較的容易に実現可能である。しかしながら、この手法ではロボットがワークの奥まで手を伸ばさなくてはならず、ロボットに対して広い動作範囲が要求される。そこで、本研究ではツールではなくワークを動かすことを検討し、ワークを保持した上で鉛直軸まわりに回転するジグを用意して、ツールはジグに固定することにした。この実験装置を**Fig. 5(a)**に示す。この装置においては、双腕ロボット MOTOMAN-SDA10D (安川電機) の片腕 (7軸) を用い、その先端に安川電機の MotoFit オプションにより付属する6軸の力・モーメントセンサ WEF-6A1000-30-RG24 を搭載し、その先に棒状のツールを取り付けている。ツール部は

Fig. 6 Appearance of a packing

Fig. 7 Setting of a tensile test

Fig. 5 (b) のように、丸棒と、力・モーメントセンサを接続するフランジ部によって構成されている。丸棒はクロムバナジウム鋼製で全体焼入れとクロムメッキが施されたものであり、直径は 4 [mm] で表面粗さは R_a が 0.31 [μm] である。フランジ部はアルミニウム製であり、セットボルトで丸棒を固定している。丸棒部とフランジ部を組み合わせた状態では、全長 160 [mm] で重量 169 [g] である。なお、6 軸の力・モーメントセンサは本章では用いておらず、次章で導入する力制御において用いる。テーブルに設置した回転テーブルの上に固定した 3 指スクロールチャックによりシリンダを固定している。また、3 指スクロールチャックの指の一つには Fig. 5 (c) のようなパッキン押さえ機構を取り付けており、スクロールチャックを閉じると同時にパッキン押さえ機構がパッキンをシリンダの側面の溝の部分に押し付けるようにした。

本研究は剛性の低い O リングだけではなく剛性の高いパッキンにも対応できることを特徴の一つとしている。本研究の実験ではそのようなパッキンの例として Fig. 6 (a) のような内径 70 [mm]、外径 85 [mm]、厚さ 9.2 [mm] のニトリルゴム製パッキンを用いた。また Fig. 6 (b) はその断面形状である。本パッキンの剛性を示すため Fig. 7 のような簡易実験を実施した。これはパッキンの中に直径 12 [mm] の丸棒を 2 本通して万能試験機 AG-50KND (島津製作所) に取り付け、引張試験を行ったときの変位と力の関係を調べたものであり、剛性の参考値を確認するためのものである。比較のため、比較的剛性が低いリングの例として、ほぼ同じ内径である内径 69.4 [mm]、外径 75.6 [mm]、線径 3.1 [mm] のニトリルゴム製 O リングについても同様の測定を行った。Fig. 8 が測定結果である。変位が 0~33 [mm] 付近までは、パッキンが Fig. 9 (a) のような円形から Fig. 9 (b) のような伸びた形状に変形するまでの領域で、パッキンの内周の長さはほぼ変わらない曲げの変形が起きている。その後 33 [mm] 付近を超えて傾きがより大きくなる領域は Fig. 9 (c) のように内周が伸びる形で伸びていく変形となり、主に伸びの変形が起

Fig. 8 Relationship of displacement and force measured by an universal testing machine

Fig. 9 Deformations of an elastic ring: (a) shows the case where an initial shape and the displacement is 0 [mm], (b) shows the case where the inner peripheral length is invariant and the displacement is about 33 [mm] and (c) shows the case where the inner peripheral length is stretched and the displacement is more than 33 [mm]

Fig. 10 Assembly by a robot where (a) the robot sets the tool mounted on the arm, (b) the chuck holding the work starts rotating, (c) the packing is been installed, and (d) finally the packing is completely assembled

ている。いずれの変形でも O リングよりパッキンのほうが剛性が高いが、取り付け作業時に問題になるのは特に後者の変形領域であり、同じ伸びを得るのにおよそ 5 倍の力が必要となっている。加えて、リングの取り付け時にはリングの内面が取付溝の外側の部分を超えるところまで伸ばす必要がある。取り付け溝の外側の部分の径はリングの外径と近く設計されるため、リングの内径と外径の差が大きい、すなわち太いリングほど取り付け時に大きな伸びを必要とする。したがって本パッキンは従来手法 [18]~[24] による取り付けが非常に困難である。

ロボットによる作業の様子を **Fig. 10** に示す。Fig. 10 (a) に示すように、パッキンを指とシリンドラの側面の間に挟んだ状態で、棒状のツールを水平にしてパッキンの輪の中に通しておく。この状態から、Fig. 10 (b) に示すように棒状のツールを鉛直下方向に下げて溝内の上端に接触させ、Fig. 10 (c) に示すように回転テーブルを回転させる。これにより、ツールに沿ってパッキンが押し下げられることでパッキンの取り付けが行われる。この手法では、最初にツールをセットする過程 (Fig. 10 (a) から Fig. 10 (b) の間の動き) と Fig. 10 (d) で以降で取り付けが終わった後にツールを抜き取る過程においてのみロボットが動作している。

以上の取り付け方法で実際にロボットによる取り付けを行うと、100 回の取り付け実験で 100 回とも取り付けに成功し、成功率については良好であった。

4. パッキン取り付け時に発生する負荷の低減

次に、ヒトが作業を行う際には、無意識のうちに手先が発生する力をなるべく小さくしていることが予想できる。また、手先が発生する力を小さくすることは、パッキンの弾性変形を小さくすることと直結する。このため、ここでは次のステップとしてパッキンの弾性変形をなるべく小さくすることを目的として、ヒトの作業データを参考にした力制御手法を提案する。ここで、前章の Fig. 10 では最初にツールをセットする過程と、取り付けが終わった後でツールを抜き取る過程のみにおいてロボットが動作しているが、本章においては、この二つの過程の間でロボットが加える力を制御することによって、パッキンの弾性変形をなるべく小さくすることを考える。

Fig. 11 (a) は、ロボットに前章における Fig. 10 で説明した動作によりパッキンの取り付けを行った際にロボットの手首に搭載した力・モーメントセンサの出力をプロットした図である。座標系は Fig. 5 (a) の中で示した向きであり、ツールの先端から根元へ向かう向きを Y 方向、天頂方向を Z 方向、Y 方向と Z 方向に直交する向きで系が右手系になる向きを X 方向としてそれぞれの方向に作用する力とその 3 方向の合力をプロットしている。比較のためヒトが同じツールを持ち、同じ旋回ジグを用いて取り付けを行った結果を Fig. 11 (b) に示す。なおここでこの作業を行ったのは棒状のツールを用いた Fig. 3 によるパッキン取り付け作業を 4 年以上実施している熟練作業者である。

まず 3 方向の合力に着目すると、ロボットでは 71.2 [N] の力が作用しているのに対して、力・モーメントセンサに棒状のツールを取り付けた装置を作成し、その装置をヒトが把持してパッキンの取り付け作業を行ったところ、ヒトでは 16.7 [N] で取り付けができており 4 倍以上の差が存在した。つまり、この方法でのロボットによる取り付けではパッキンに大幅に過大な負荷を与えていることが分かった。これより、動作教示のみを行った場合のロボットの動作は改善の余地が大きい。

続いて X, Y, Z それぞれの成分についても比較し、より詳細に測定結果を検討した。ロボットの取り付け時に計測された力の成分は大きい順に Y, X, Z 方向となっている。Y 方向についてはロボットでは最大の成分である一方でヒトの場合にはほぼゼロとなっており両者の差が最も顕著である。X 方向につ

(a) Force in assembly by a robot

(b) Force in assembly by a human

Fig. 11 Measured forces of a robot and a human during assembly where remarkable differences can be observed especially in X and Y directions

Fig. 12 Tool trajectory of assembly by a human where X component shifted to negative direction and finally returned to zero, and its Y component continuously increased

いてはヒトでもゼロとまではいかないが大きな差が観測されている。一方 Z 方向については若干の差は見られるものの、どちらもあまり大きな値ではなかったため、Y 方向と X 方向のみについて対策を検討することとした。

またヒトの取り付けにおいては、取り付け中に手先の位置が変動していることが観測された。したがってヒトは受けた力に応じて手先をうまく動かすことで負荷を逃がしていると考えられ、その動力学特性の定性的な解析からロボットによる取り付けの改善方策を検討することを考える。そこでヒトの手先の動きを上方から 30 [fps] のカメラ 1 台で撮影し、手先の動きを簡易に計測した。Fig. 12 は測定結果であり Fig. 13 は測定時の撮影例である。

次に、Fig. 11 (a) に示したロボットによってパッキンの取り付けを行った際に手先が発生する力を、Fig. 11 (b) に示すヒトが棒状のツールを持って実験した際に手先が発生する力に近づけることを目的として、ロボットの制御則を構築する。 $p = [p_x \ p_y]^T$

Fig. 13 Movement of the tool when human performed a packing assembly

を手先の位置の初期位置からの変位を表すベクトルとして $\dot{p}$ をその時間に関する一階微分とする。また $f = [f_x \ f_y]^T$ は外力を表すベクトルであり、Fig. 11, Fig. 12 において最も負荷が大きかった Y 方向のデータを見ると、ヒトが力を受けた向きに手先を動かしていることから、ロボットでも力を受けた向きに手先速度を与える、つまり d_y をパラメータとし、

$$\dot{p}_y = d_y f_y \quad (1)$$

として力に比例した速度を与えるダンピング制御を実装することで一定の負荷軽減ができると予測する。

続いて X 方向に着目すると、Fig. 11 および Fig. 12 のとおりヒトは X 方向では力が作用するとその方向に手先が動き、力が抜けると元の位置に戻っていることから、ロボットでも比例係数 k_x により

$$p_x = k_x f_x \quad (2)$$

として力に比例した位置の変位を与える剛性制御を実装して剛性を持たせることで負荷軽減ができると予測した。

パラメータ d_y , k_x については滑降シンプレックス法 [25] により取り付け時のピーク負荷が最小となる値を探索することとした。滑降シンプレックス法は多変数の最適化に対応しており、また最急降下法などの勾配法と違って評価関数の微分値がなくとも評価値のみ得られればよいという点が特徴である。本件における評価値であるピーク負荷は、実際にそのパラメータで取り付け実験を行うことにより得ることができる。以上により定性的にはヒトの作業データを参考にしつつ、パラメータチューニングについてはヒトとロボットの応答性能などのハードウェア上の違いを考慮してロボットにとって最適なものを選ぶことができる。なお、一般に力制御のパラメータを実験によって最適化するの是非常に大きな手間を要する。Hirai ら [26] や山野辺ら [27] も滑降シンプレックス法による力制御パラメータの最

適化を実施しているが、これらの研究では実験ベースでのパラメータ探索の試行回数を減らすため、前段階としてシミュレーションによる探索を行ってあらかじめおおよその検討を行ってから、実機での探索を行っている。一方、本研究においては柔軟物の閉リンク機構で摩擦を伴うという複雑な対象を扱っているためシミュレーションが困難であるが、ヒトの作業の定性的な観察によりパラメータは二つだけに抑えられているので実験だけによる最適化も十分実現可能となっている。

5. 力制御実験

ロボットの手先に速度制御ベースのダンピング制御および剛性制御を実装してパッキンの取り付け実験を行った。用いたパッキンおよび取り付け先の金属部品は直径 85 [mm] の油圧シリンダ用のもので Fig. 2~13 と同じものである。ロボットは安川電機製 MOTOMAN-SDA10F を利用した。本ロボットはオプションの MotoPlus 機能により 4 [ms] 周期で速度ベースの移動命令を与えることができるのでこれを利用し、式 (1) の実装については式 (1) で計算される速度値をそのまま速度の目標値とし、式 (2) の実装は式 (2) の両辺を微分した後に制御周期を T [ms] として右辺を後退差分により離散時間化した

$$\dot{p}_x(t) = \frac{k_x}{T} (f(t) - f(t - T)) \quad (3)$$

で得られる速度を速度制御の目標値として実装することとした。Z 方向や回転方向については目標速度をゼロとしてこれらの方向には動かないようにした。

実験ではロボットによる次の二つの取り付け手法を試した。

制御 1

X 方向：目標速度をゼロとする。

Y 方向：式 (1) のダンピング制御を実装する。

制御 2

X 方向：式 (3) の剛性制御を実装する。

Y 方向：式 (1) のダンピング制御を実装する。(制御 1 と同様)

制御 1 は Y 方向の対策効果があるかどうかを検証し、制御 2 はそれに X 方向の対策を追加することでさらに低減効果が得られるかを検証するものである。なお Fig. 11 (a) に示したロボットの手先を動かさない場合の手先負荷を見ると Y 方向の負荷が負荷全体に対して支配的になっており、X 方向の力だけを低減しても全体に及ぼす影響は軽微であるため X 方向の対策だけを行った場合の効果については検証しなかった。

パラメータ d_y , k_x については滑降シンプレックス法により決定した。最適化における評価値はパッキン取り付け時の負荷のピーク値を用いた。この値は実際に候補となるパラメータでロボットによる取り付け実験を実施することで得られるが、同じパラメータでも試行のたびに値が変動することが予想されたため、取り付け実験は 3 回実施し、その 3 データの平均値を用いた。パラメータによっては取り付け実験で手先が振動する場合があるが、これはパッキンへの負担や安全性の面から望ましくないため、振動が発生した場合はペナルティとして十分大きな値を評価値として与えることとした。制御 1 における最適化は

10

(a) Transition of the best parameter in each simplex

(b) Force values which are the lowest values in each simplex

Fig. 14 Result of an optimization for “Control 1”

1 変数 (d_y) の最適化であるので、2 頂点からなるシンプレックスにより探索を行い、制御 2 における最適化は 2 変数 (d_y, k_x) の最適化であるので 3 頂点からなるシンプレックスにより探索を行った。探索の停止条件はシンプレックスが 3 回変形しても最良の頂点が更新されなかったときとした。なお滑降シンプレックス法で多次元の最適化を行う場合、何らかの理由で最適でない点で停止することがあるため、制御 2 では探索が停止した点とその近傍の点を初期値として、再度探索を実施した。

まず制御 1 における d_y の最適パラメータを探索した。探索の初期値は安全のため十分低いゲインを選ぶこととし、Fig. 11 (a) に示した手先を動かさない場合の Y 方向の負荷の最大値である 65.8 [N] がロボットの手先に作用したと仮想的に考えたときに、比較的遅い速度である手先速度 10 [mm/s] を発生させるようなパラメータ値である 0.152 [(mm/s)/N] と、その近傍点 1 点からなるシンプレックスを初期シンプレックスとした。Fig. 14 (a) はパラメータ空間上でシンプレックスの中の最良点が推移していく様を示しており、徐々にゲイン d_y が大きくなり 4.0 [(mm/s)/N] で落ち着いている。そして Fig. 14 (b) はシンプレックス中の最良点の評価値の推移を示しており、最適化が進むにつれて取り付け負荷が下がっていくことが確認された。なお、本最適化では停止するまでにシンプレックスを 10 回変形させており、合計 18 パラメータについて実験を行った。

続いて制御 2 における最適パラメータを探索した。 d_y の初期値は制御 1 での最適パラメータの値を参考にすることとしたが、X 方向への制御も加わったときに不安定度が増す可能性が考えられるため、安全のためゲインを落として制御 1 で得られた最適パラメータの半分の値を初期値として採用した。また k_x の初期値は手先を動かさない場合の X 方向の負荷の最大値である 27.1 [N] において比較的小さい位置の変位として 1 [mm] の変位がある場合を想定した 0.037 [mm/N] を採用した。シンプ

(a) Transition of the best parameter in each simplex

(b) Force values which are the lowest values in each simplex

Fig. 15 Result of an optimization for “Control 2”

レックスの残りの 2 点はこの近傍の点とした。シンプレックスの最良点が変化の様子を Fig. 15 (a) に示し、シンプレックスの最良点の評価値の推移を Fig. 15 (b) に示す。最終的に得られた d_y は制御 1 の最適化で得られた値よりも低いゲインとなっており X 方向と Y 方向がお互いに完全に独立しているものではなく相互作用が存在していることが分かる。1 度めの最適化では初期シンプレックスでも最適化 1 の最適パラメータでの評価値よりも良い値になっており、X 方向の対策が非常に有効であることが示唆されている。さらに最適化が進むにつれて評価値はさらに改善が進んでいる。また 1 度めの最適化で停止した後実施した 2 度めの最適化においても評価値はさらに 13.0% 改善しており、再最適化の効果が見られた。なお 1 度めの最適化では停止までのシンプレックスを 11 回変形させる中で 28 パラメータについて実験した。続く 2 度めの最適化ではシンプレックスを 4 回変形させ 9 パラメータについて実験を行った。

以上の探索で得られた最適パラメータでの取り付けについて詳細に検証した。まず取り付け実験を制御 1 と制御 2 それぞれについて 10 回ずつ行った。この実験で取付作業中に受けた力のピーク値についてプロットしたものが Fig. 16 である。10 回試行を行ったので、図中にはその平均値、最大値、最小値を示している。手先を動かさない場合は平均 71.3 [N] の負荷が生じていた。これに対して制御 1 は平均値において手先を動かさない場合の負荷から 45.5% 減の 38.9 [N] であり大幅な負荷軽減ができている。さらに制御 2 では 70.0% 減の 21.4 [N] となり、いずれの対策も効果的に作用していることが分かった。また制御 2 の 21.4 [N] とヒトの取り付けの 15.0 [N] という値を比べるとその差はわずか 6.4 [N] であり、ヒトにかなり近い性能を実現している。また試行ごとの値のばらつきを評価するため、Fig. 16 には最大値と最小値もプロットしており、これを見るとその差はロボットの取り付けでは平均値の 2 割以内、ヒトの取り付けでは 3 割以内となっており、取り付け時の負荷の値はある程度

Fig. 16 Peak forces in assembly processes

(a) Force

(b) Position

Fig. 17 Example of measurement results in “Control 1”

安定しているということも確認された。

続いて、それぞれの方法についてより詳細に結果を見てみる。制御 1 における取り付け時の負荷の時間変化とロボットの手先位置の時間変化の例を Fig. 17 に示す。制御 1 の結果である Fig. 17 (a) と手先を動かさない Fig. 11 (a) を比べると、元々 Y 方向が全体の合力の中で最も大きな成分であり 65.8 [N] が観測されていたが、制御 1 では Y 方向にダンピング制御を行ったことで Y 方向の力が 73.2% 低減されて 17.6 [N] となっている。その結果、3 方向の合力の中では残った X 方向の力が支配的になっている。ヒトの測定例である Fig. 11 (b) および Fig. 12 と比較する。制御を行った Y 方向については手先位置がプラスの方向に動き続けており、負荷についてもある程度小さい値に抑えられておりヒトの動力学特性と定性的には同様と言える。ただしその手先の移動量や負荷の低減量を見るとヒトの値よりやや小さく、Y 方向の移動量はヒトが 51.0 [mm] のところ制御 1 では 36.7 [mm] と 14.7 [mm] ほどの差があり、Y 方向の負荷もヒトが 3.7 [N] であるのに対して制御 1 では 17.6 [N] であった。このことからロボットの手先の移動量が不十分であり負荷を逃がしきれていない状況にあるのではないかと考えられる。式 (1) を見ると d_y の値を大きくすればより大きな速度を出すようになり移動量も増えることが期待されるが、一方で d_y を大きくし

(a) Force

(b) Position

Fig. 18 Example of measurement results in “Control 2”

ていくと手先が振動し始めて不安定化する。この不安定化の原因についてはロボットの応答性能によるものと考えられる。ロボットの力データと位置データをより詳細に見比べると、最初に力を検知してから実際に動作を開始するまで 0.1 秒程度の時間遅れが観測された。一般にむだ時間はシステムを不安定化させる要因になるため、このことが d_y を十分大きくできない原因になっていると考えられ、そのために Y 方向の負荷がこれ以上は下がらなかったものと考えられる。

制御 2 での測定例が Fig. 18 である。制御 1 の Fig. 12 と比較すると、制御 2 では X 方向に剛性制御を行うことで制御 1 で残っていた X 方向の力についても低減することができ、合力をさらに抑えることに成功している。またヒトの測定例である Fig. 11 (b), Fig. 12 と比較すると、Y 方向は制御 1 と同様で、ヒトより手先の移動量がやや少なく手先に作用する力も残っているものの定性的にはヒトと同様の振る舞いを実現している。そして X 方向は、ヒトの X 方向の力が -16.7 [N] となっていたのに対して制御 2 では -16.9 [N] でありヒトとほぼ同じ負荷となっており、手先位置もヒトの一度マイナス方向に振れた後に最終的に元の位置に戻ってくる動きが制御 2 でうまく再現されている。

以上、本章では 2 種類の制御方法について実際にロボットに実装して性能評価を行ってその有効性を確認した。特に X 方向、Y 方向の両方に力制御を行った場合においてはヒトに近い性能を実現していることを示すとともに、ヒトとの性能差についてはロボットの速度制御の応答性能が要因になっている可能性があることを指摘した。

6. 結 言

本研究では円柱状のワークにリング状のゴムパッキンを取り

付ける作業をロボットで実現するため、その取り付け方法の検討を行った。パッキンは傷などに関してシビアであり、その取り付け過程で傷がつくことを防ぐためにパッキンに過度の負荷をかけないような工夫が求められる。そこで熟練作業者が作業を行った際の手先の位置と力のデータを定性的に解析することにより熟練作業者の動特性を基にした力制御を構築して負荷軽減を試みた。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る最適化で決定し、ロボットの特性も考慮した制御とした。そして以上の効果を検証するための実験を行い、提案手法によりヒトに近い性能を実現していることを確認した。今後の課題として、パッキンやワークが変わった場合の検討が挙げられる。本手法のうち、熟練作業から抽出した力制御手法についてはそのまま適用できることが予想されるが、力制御パラメータについてはパッキンやワークの種類が変わることで新たに設定し直す必要があり、パッキンやワークの種類が多いと手間な作業となる。そこで例えば最適化の初期値をうまく選ぶことで最適化を素早く収束させる方法の検討やロボットが不安定化する条件に関する理論的あるいは実験的な検討など、パッキンやワークの変更に対応しやすくする手法について今後検討する。

参 考 文 献

- [1] 福本, 濱田, 坂東, 竹中, 小林: “パッキン取付作業のロボット化に関する検討”, 知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, M1-1, 2013.
- [2] 福本, 濱田, 竹中, 坂東, 小林: “パッキン取り付け作業における力制御を用いた負荷軽減の検討”, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3N1-05, 2014.
- [3] 福本, 原田, 河井, 坂東, 竹中: “熟練作業の動力学特性に基づいたパッキン取り付け作業”, 第34回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3E1-04, 2016.
- [4] 浅田, 出海: “作業者の動作計測によるハイブリッド制御のための作業教示とプログラム生成”, 日本ロボット学会誌, vol.5, no.6, pp.452-459, 1987.
- [5] 望月, 松井: “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, pp.328-334, 1994.
- [6] 板橋, イエ, 鈴木, 大熊: “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, pp.890-897, 1998.
- [7] 津坂, 岡崎, 小松, 横小路: “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, pp.2450-2461, 2012.
- [8] A. Ajoudani, N.G. Tsagarakis and A. Bicchi: “Tele-Impedance: Towards Transferring Human Impedance Regulation Skills to Robots,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.382-388, 2012.
- [9] 田中, 木原, 横小路: “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, pp.685-695, 2009.

- [10] A.X. Lee, H. Lu, A. Gupta, S. Levine and P. Abbeel: “Learning Force-Based Manipulation of Deformable Objects from Multiple Demonstrations,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.177-184, 2015.
- [11] 榎本, 杉本, 松本: “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な手法)”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.68, no.676, pp.3620-3627, 2002.
- [12] 尹, 末廣, 音田, 北垣: “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, pp.155-165, 2007.
- [13] E. Gribovskaya, A. Kheddar and A. Billard: “Motion Learning and Adaptive Impedance for Robot Control during Physical Interaction with Humans,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4326-4332, 2011.
- [14] M. Racca, J. Pajarinen, A. Montebelli and V. Kyrki: “Learning In-Contact Control Strategies from Demonstration,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.688-695, 2016.
- [15] 辻: “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, pp.689-695, 1996.
- [16] M.S. Erden and A. Billard: “End-point Impedance Measurements at Human Hand during Interactive Manual Welding with Robot,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.126-133, 2014.
- [17] 平井: “柔軟物操作”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.2, pp.136-139, 1998.
- [18] ラミレス, 原田, 吉田: “柔軟性を有するリング状部品の組み立て動作計画”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1P1-P04, 2014.
- [19] 村瀬, 松原, 杉本, 田中, 山崎: “ゴムの粘弾性に着目した双腕ロボットによる輪ゴムかけ動作計画”, 第34回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3Z2-03, 2016.
- [20] 株式会社デンソー: Oリング組み付け装置, 特開 2004-138226, 2004-5-13.
- [21] 三菱電機株式会社: ロボットハンドシステム, 特開 2009-291859, 2009-12-17.
- [22] SCHUNK GmbH & Co. KG, ORG, <https://schunk.com/jp/en/gripping-systems/series/org/>.
- [23] 日産自動車株式会社: リング部品の装着方法及び装着装置, 特開 2005-52960, 2005-3-3.
- [24] 株式会社ガスター: 弾性リング装着治具および弾性リング装着方法, 特開 2006-255886, 2006-9-28.
- [25] W.H. Press, W.T. Vetterling, S.A. Teukolsky and B.P. Flannery (丹慶, 奥村, 佐藤, 小林訳): Numerical Recipes in C [日本語版], pp.295-299, 技術評論社, 1993.
- [26] S. Hirai, T. Inatsugi and K. Iwata: “Learning of admittance matrix elements for manipulative operations,” Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.763-768, 1996.
- [27] 山野辺, 前田, 新井, 渡邊, 加藤, 佐藤, 畑中: “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, pp.554-562, 2006.

福本靖彦 (Yasuhiko Fukumoto)

2008 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年より香川県産業技術センター勤務, 2016 年大阪大学大学院基礎工学研究科入学。産業用ロボットの応用に関する研究に従事。日本機械学会の会員。(日本ロボット学会学生会員)

原田研介 (Kensuke Harada)

1997 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年広島大学工学部助手。2002 年産業技術総合研究所知能システム研究部門研究員, 2005 年から 1 年間 Stanford 大客員研究員, 2013 年同研究所タスクビジョン研究グループ長, 2016 年大阪大学大学院基礎工学研究科教授, 同年産業技術総合研究所クロスアポイントメントフェローを兼務, 現在に至る。ロボットハンドによる把持や操りに関する研究に従事。IEEE, 計測自動制御学会, 日本機械学会, システム制御情報学会の会員。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)