

協働型双腕ロボットによる複雑形状部品の仕上げ加工に関する試験研究事業

石川 卓* 飯村 修志**

1. はじめに

茨城県には自動車部品を製造する企業が多く、それに関連したダイカスト部品を扱う企業も多い。ダイカスト部品は、寸法精度や機械的強度、生産性が高く、複雑な形状にも対応できる特徴がある。しかし、その製造工程において、金型鑄造からトリミングまでの自動化は進んでいるものの、バリ取りや表面研磨といった仕上げ工程は自動化が進んでいない。その原因として、形状の複雑さとバリの不均一性が考えられる。人が製品を手に取り、バリの有無を目で確認しながら仕上げ処理をしているのが現状である。一方で、製造現場へのロボット導入は進んでおり、ロボットの作業の幅も広がっている。近年は労働安全衛生規則の一部改正により、規定を満たすことで安全柵なしでロボットを設置できるようになった（以下、「協働型ロボット」と表記）。協働型ロボットの利点として、人とロボットが作業領域を共有して作業できることが挙げられる。仕上げ工程の自動化については、ロボットを用いた試みも行われている。しかし、現状の方法では複雑形状で複数面にバリのある部品に対しての展開が難しい。双腕ロボットを用いることで部品と工具の各々の自由度が増え、複雑形状部品に対しても柔軟に対応できる可能性がある。

そこで、複雑形状部品を対象として、協働型双腕ロボット（カワダロボティクス製NEXTAGE）を用いた仕上げ加工システムの構築及び仕上げ加工方法の提案を目的に、平成29年度より研究に取り組んでいる。これまでの2年間に於いて、まず安定的な部品の把持方法の検討と部品把持用ハンドの構築を行った。3次元形状の物体を安定的に把持するために、フォームクロージャ（form closure）と呼ばれる幾何学的拘束原理を考慮し、ロボット指の設計を行った。そして、造形したロボット指を汎用グリップに取り付け、部品把持用ハンドとした。次に、協働型ロボットの適用可能性を評価するため、力覚評価システムを使って仕上げ処理にかかる力とモーメントを計測した。実験での最大負荷は5Nほどであり、このくらいの負荷をかけられれば仕上げ処理に対して協働型ロボットの適用が可能であることを確認した。さらに、カメラを使ってバリ位置の検出を試みたところ、バリの面の特徴を認識することでバリ位置を検出することが可能であることがわかった。なお、これまでの結果の詳細については既報¹⁾²⁾に準ずる。

2. 目的

本研究では、複雑形状部品を対象として、協働型双腕ロボットを用いた仕上げ加工システムの構築及び仕上げ加工方法の提案を目的とする。本稿では、対象とした微細バリの検出方法とバリ取り用ハンドの構築方法を提案し、協働型双腕ロボットによる仕上げ加工システムの構築結果を報告する。

3. 研究内容

3.1 対象部品とバリ

本研究で対象にしたダイカスト部品を図1に示す。材質はアルミニウム合金であり、大きさはおおよそ110×100×95mm、重さは約160gである。自動車部品として用いられている。表面仕上げを施す箇所を図1の斜線で示す。処理を施す箇所が各面に散在している。また、部品の箇所によって仕上げ処理に用いる工具が異なる。そのため、対象とするバリを選定しなければならない。

ダイカスト部品は鑄造後に金型から取り外す際に、エジェクタピンで押し出す工程がある。そのため、ダイカスト部品には必ずそのピンの跡が円形状のバリとして生じる。対象部品には3種類の大きさの円形バリがあり、図1のバリ A, B, C はそれぞれ直径 5mm, 4mm, 2mm である。本研究ではバリ A と B を仕上げ加工の対象とする。対象のバリ周辺を表面粗さ計で測定したところ、円形の内側と外側で 0.1mm の高低差があった。また、バリの高さは一様ではないが、1mm 以下のものが多かった。

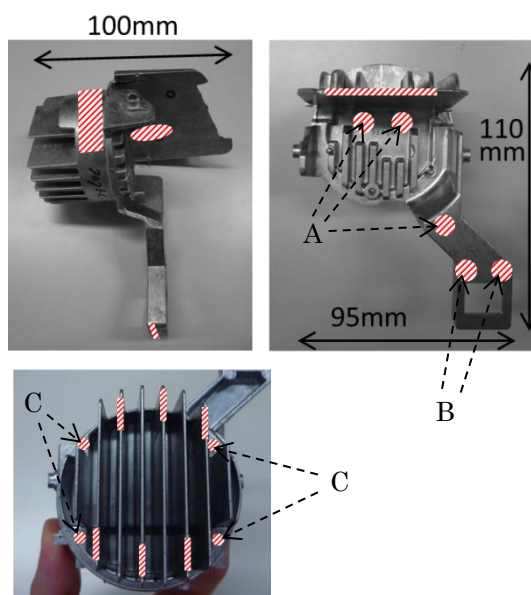


図1 研究対象のダイカスト部品

3.2 バリ検出

3.2.1 把持された部品の位置・姿勢補正

これまでの研究において、構築した部品把持用ハンドでロボットが対象部品を把持できることを確認した。しかし、ロボットが部品を把持するとき、つまり、グリップが閉じるときに部品がわずかに移動・回転する。ロボットが仕上げ加工するためには、把持された部品の位置・姿勢（角度）精度を検証する必要がある。そこで、作業台上方にカメラ（約47万画素）を設置し、部品に印字された文字の位置計測と評価を行った。対象部品には金属光沢があるため、複数の方向から光を

照射できるリング照明を使用した。

計測方法は次のとおりである。定位置に置かれた対象部品をロボットが把持し、カメラの撮影位置まで移動する（図2）。ここで定位置とは、平面において±1mm、±2度の位置、姿勢のずれは許容するものとする。そこで撮影した画像から画像処理にて文字「L」を検出し（図3の破線で囲まれた領域）、文字位置から中心座標を算出する。基準として使用するマスター画像を登録し、マスター画像の文字の中心位置からのずれ（位置と姿勢）を評価する。

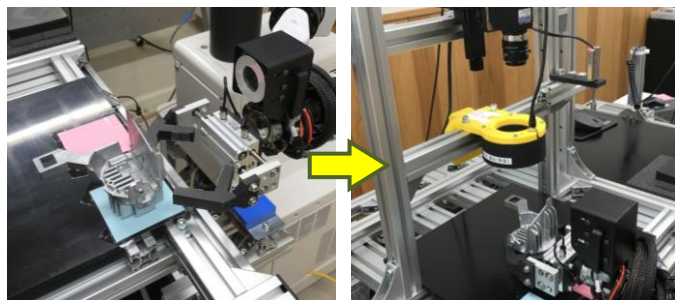


図2 ロボットに把持された部品の位置計測

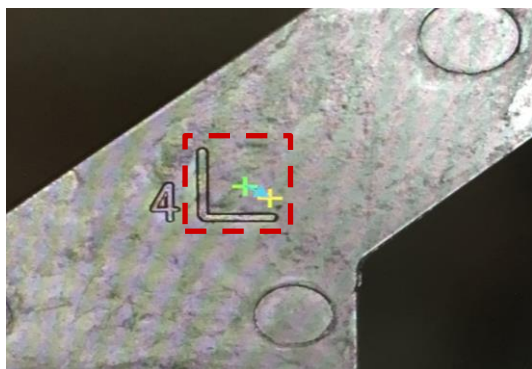


図3 対象部品の位置・姿勢検出

上記の計測を10回行ったところ、ロボットに把持された部品とマスター画像との位置ずれは平均0.83mm、標準偏差0.60mmであり、姿勢ずれは平均0.4度、標準偏差0.8度であった。

この位置・姿勢のずれを解消するために、ロボットとカメラを通信させ、両方で位置座標を共有できる環境を整えた。これにより、カメラで捉えた特徴等の地点にロボットはハンドを移動させることができる。この環境を用いて、位置・姿勢のずれをロボットにフィードバックし、マスター画像の位置に移動させたときにどこまで近づけるかを検証した。検証手順として、まず、前述の計測方法と同様に、定位置に置かれた対象部品をロボットが把持し、カメラの撮影位置まで移動する。そこで撮影した画像の文字の中心位置について、マスター画像の文字の中心位置からのずれ（位置と姿勢）を計測する。ロボットはそのずれ情報（水平距離と角度）を受信し、その分だけハンドを移動・回転させる。ロボットがハンドを動作させた後、再度カメラで対象物を撮影し、マスター画像との位置・姿勢を比較する。

検証の結果、位置ずれは平均-0.02mm、標準偏差0.01mm、姿勢ずれは平均0.0度、標準偏差0.1度まで解消した。ただし、1画素の大きさが約0.05mm四方のため、それ以下の議論はできないが、カメラを利用することでロボットが把持した部品を0.1mm以内の精度で一意的な位置・姿勢にできることがわかった。

3.2.2 接触式変位センサによるバリ検出

対象としたバリの高さが1mm以下であることと、バリ周辺の形状を考慮するとバリの検出には0.1mm程度の測定精度が必要である。そこで、本研究では接触式変位センサ（繰り返し精度：3μm）を用いることとした。測定対象に接触するセンサの先端にはローラータイプの接触子を取り付け、センサを作業台上方に固定した（図4）。これにより、ロボットが部品を把持し、部品をセンサに接触させた状態で水平移動することで、接触した領域の凹凸を測定することができる。

ロボットがこのセンサを用いて部品を測定するときの精度を検証するため、ロボットが把持した部品の高さを測定した。具体的には、定位置に置かれた対象部品をロボットが把持し、センサの測定位置まで移動し、センサと部品が接触したときの高さを測定した。これを10回繰り返し、標準偏差を求めたところ、0.007mmであった。これはロボットの位置決め精度（0.03mm以内）より小さい値である。そのため、ロボットの仕様を考慮すると、ロボットが部品を把持したとき、部品の鉛直方向のずれは0.03mm以内であると言える。この結果、接触式変位センサを用いた鉛直方向の測定精度は±0.03mmであり、本研究で対象とした1mm以下の微細バリの検出が可能であることがわかった。

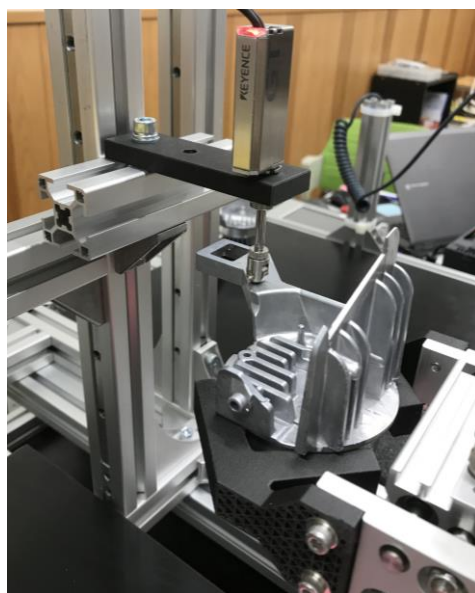


図4 接触式変位センサによるバリ検出

3.3 ロボットによる仕上げ加工

3.3.1 ロボットを用いた仕上げ動作

これまでの研究において、力覚評価システムを使って対象部品の仕上げ処理にかかる力を計測した実験、最大負荷は5Nほどであった。本研究で用いているロボ

ットの片腕の可搬重量は1.5kgである。0.48kgのハンドカメラが付いているため、片腕にかけられる実質的な重量は約1kgであるが、5Nの力を加えることは可能だと考えられる。そこで、ロボットによる仕上げ動作を評価することにした。ロボットの腕に工具を取り付け、バリを模擬した凹凸が付いた樹脂プレートに対してロボットが仕上げを行う（図5）。鉛直方向に0.1mmずつ動かしながらバリ除去の様子を観察した。その結果、回転する工具の先端がバリに接触すれば1Nほどの力でもバリが除去されることを確認した。ただ、工具の先端がバリに触れた状態のときにさらにロボットを動かして工具をバリに押し当てると、工具の研削力が増し、バリだけでなく表面までも削られてしまった。そのことから、ロボットハンドに単に工具を付けただけだと、ハンドの移動がそのまま工具の移動となり、微細バリを除去するためには高い位置精度と複雑な位置制御が必要となることがわかった。そのため、微細バリの除去にはこれらの問題を解消する機構をハンドに取り入れることが求められる。



図5 ロボットによるバリ除去

3.3.2 バリ取り用ハンドの構築

ハンドの移動を工具側で吸収し、ある一定の押し当て力を容易にかけることができる仕組みがあれば、ロボットの複雑な位置制御が不要になる。そこで、ロボットアームと工具の間にばねとリニアガイドから構成される駆動部を取り入れることとした。このコンプライアンス機構を構築するため、THK インテックス製のコンプライアンスツールユニットを用いた。このユニットにはコンプライアンス機構の他に、駆動部の位置を検出する2つのセンサが付いている。駆動部の位置は取り付けした工具が受ける力によって変わるため、駆動部の移動量と工具が受ける力の関係がわかれば、2つの位置検出センサから工具にかかっている力を推定することができる。そこで、コンプライアンスユニットを仲介し、工具をロボットアームに取り付けた。このハンドで微細バリを除去させたところ、対象部品に負荷がかかり過ぎてしまうことがわかった。そこで、コンプライアンスユニットのばねの種類と取り付け位置、位置検出を行うセンシング位置を変えることにした。最終的に構築したバリ取り用ハンドを図6に示す。

図6の赤色の破線領域と矢印は駆動部とその移動方向を表す。



図6 バリ取り用ハンド

次に、構築したバリ取り用ハンドの押し当て力と駆動部の変位の関係性を評価した。ロボットにバリ取り用ハンドを取り付け、工具の先端を多分力計に押し当て、ハンドを鉛直方向に移動させた。そのときの駆動部の変位を表す2つの位置検出センサ（「センサ①」、「センサ②」と表記）のON/OFFを図7に示す。工具が対象物に接触する前は2つのセンサはOFFである。工具が対象物に接触し、工具に力がかかり、駆動部が少し移動するとまずセンサ①がONになる。その後、さらに工具を対象物に押し当て、工具に負荷をかけると、駆動部がさらに移動し、センサ②がONとなる。図7によると、工具の先端に1.2Nの力が加わるとセンサ①がONとなり、さらに力を加え2.1Nになるとセンサ②がONとなっていることがわかる。つまり、工具にかかる力が1.2N未満のとき2つのセンサはOFF、1.2N以上2.1N未満のときセンサ①のみがON、2.2N以上のとき2つのセンサがONとなる。このことから、位置検出センサの情報を基にロボットを制御することで、1.2～2.1Nの押し当て力で仕上げ加工を行うことができる。

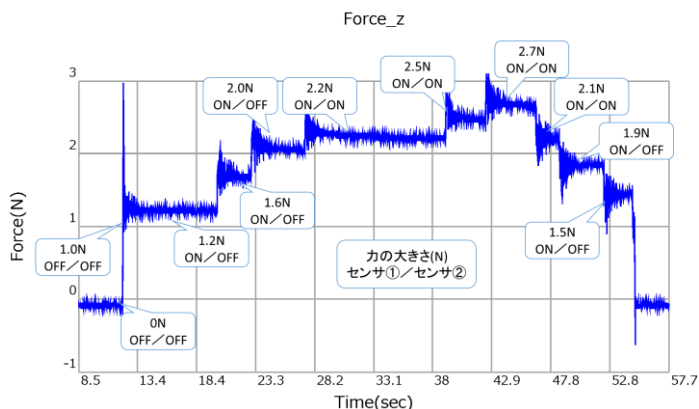


図7 バリ取り用ハンドの押し当て力と2つの位置検出センサの出力結果

3.4 システム構築

ロボットの右腕と左腕にそれぞれバリ取り用ハンドと部品把持用ハンドを取り付け、対象部品を仕上げ加工するための動作計画を作成した（図8）。まず、ロボットは定位置に置かれた部品を把持し、カメラ撮影位置まで移動させる。部品をカメラで撮影し、その画像に対して画像処理装置で文字検出を行い、登録しておいたマスター画像とのずれ（位置と姿勢）を算出する。そのずれをロボットにフィードバックし、ロボットは把持した部品の位置と姿勢を補正する。次に、部品のバリ測定を行うため、ロボットは部品を接触式変位センサの位置に移動させ、部品表面にセンサを接触させる。その状態からロボットはハンドを水平に移動させ、バリ周辺領域の測定を行う。センサの値はPLCで処理を行い、高さの閾値を超えていた場合はバリがあると判断し、両腕ともバリ取り位置に移動する。部品把持用ハンドで固定された部品に対して、バリ取り用ハンドで一定の力（1.2～2.1N）で仕上げ処理を行う。その後、バリが除去されたか確認するため、再度接触センサで測定を行う。測定値が閾値以内であれば、バリが無いと判断し、仕上げ加工が終了となる。

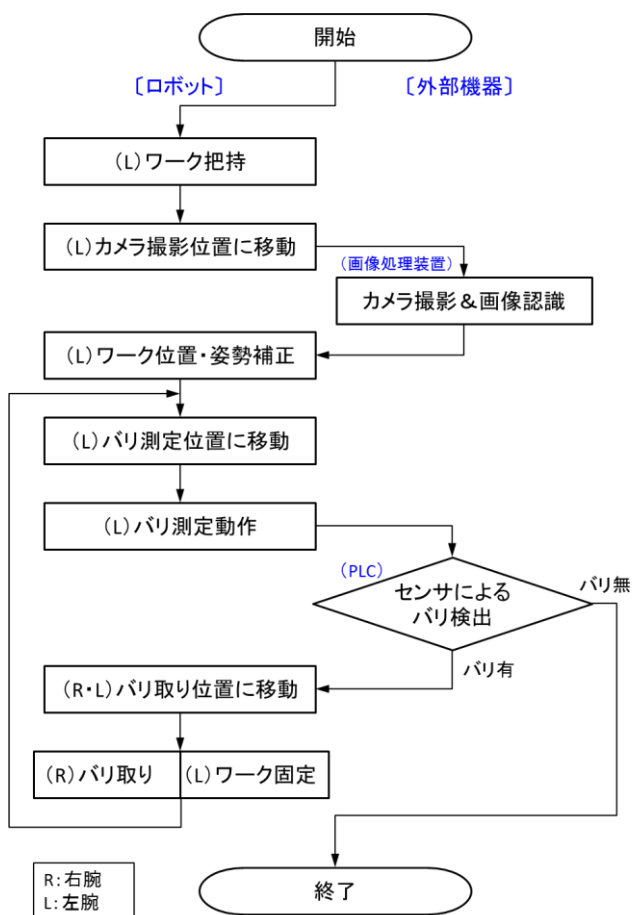


図8 ロボットによる仕上げ加工の動作計画

この動作計画に基づき、ロボット、画像処理装置、PLC のプログラムを作成した。そして、計画どおりにロボットが動作することを確認した（図9）。

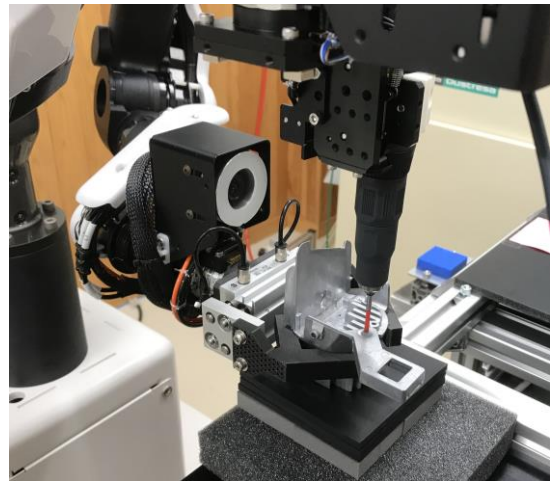


図9 ロボットによる仕上げ加工

4. 研究結果

本研究では、対象とした微細バリの検出方法とバリ取り用ハンドの構築方法を提案し、協働型双腕ロボットによる仕上げ加工システムを構築した。

- ・ロボットが部品を把持する際に部品の位置・姿勢がずれることがあるが、カメラを用いることで位置・姿勢を0.1mm以内の精度で補正できることがわかった。
- ・接触式変位センサを用いてロボットが把持した部品の鉛直方向の測定精度を検証したところ、本研究で対象とした1mm以下の微細バリの検出が可能であることを確認した。
- ・ロボットハンドに単に工具を付けただけでは微細バリを除去するために高い位置精度と複雑な位置制御が必要となることがわかった。そのため、コンプライアンス機構を有し、一定の力を加えることができるバリ取り用ハンドを構築した。
- ・構築した2つのハンドを取り付けたロボットの動作プログラムを作成し、対象部品に仕上げ加工を施すシステムを構築した。協働型ロボットが2本の腕を用いながら微細バリの仕上げ加工を行うことができたことを確認した。

5. まとめ

複雑形状部品を対象とした協働型双腕ロボットによる仕上げ加工システムを構築した。システム構築を通して、作業用ハンドの構築方法と把持したワークの位置補正方法、微細バリの検出方法を提案した。また、微細バリであれば協働型ロボットを適用することができ、双腕ロボットを用いることで人と同じように両腕でバリ取り作業を行うことができたことがわかった。

6. 参考文献等

- 1) 石川, 若生, 茨城県産業技術イノベーションセンター研究報告書第46号, P5～8(2018)
- 2) 石川, 若生, 茨城県産業技術イノベーションセンター研究報告書第47号, P5～8(2019)