

# 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\* 若生 進一\*

## 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、ダイカスト製品を扱う企業も多い。ダイカスト製品は、その製造方法ゆえに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。そのため、ダイカスト製品は自動車部品の他にも、電化製品、機械部品、玩具などにも適用されている。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きており、ロボットの作業幅も広がっている。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、「協働ロボット」と表記)。協働ロボットの利点として、少ないスペースで設置でき、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。

## 2. 目的

本研究では、複雑形状部品を対象に、協働型双腕ロボットによる安定的な部品の把持方法及びバリの検出方法の検討と仕上げ処理にかかる力の特性評価を行い、協働ロボットによる複雑形状部品の仕上げ加工方法の確立及びシステムの構築を図る。その中で今回は、安定的な部品の把持方法の検討と仕上げ処理にかかる力の特性評価についての研究経過を報告する。

## 3. 研究内容

### 3.1 安定的な把持方法の検討

#### 3.1.1 物体把持に関する先行研究

3次元形状の物体把持に関して、様々なロボットハンドが研究されている。拘束手法では、物体を幾何学的に拘束するフォームクローージャ(form closure)が提案され<sup>1)</sup>、広く研究に用いられている。

Gopalakrishnanら<sup>2)</sup>は、対象物の凹部に対し、2本の円柱指が付いたグリップを用いてフォームクローージャを形成する‘v-grip’を提案した。凹部を有する対象物を把持する際に有効な手法である。また、土橋ら<sup>3~5)</sup>は、対象物を精確に把持し、組立作業ができるような複数の円柱指が付いた汎用ハンドの研究を進めており、外レンチと指先力の大きさの関係から最適な把

持点を決定する手法を提案した。しかし、複雑形状の物体に対して、把持のみであれば円柱指を有するハンドの適用が考えられるが、対象物の仕上げ処理に対しては指が処理工程の妨げとなる可能性がある。

また、製品化された多指ハンドもある<sup>6~10)</sup>。これらの多指ハンドの形状や動作は人間の手を模範としていて、対象物に対する汎用性が高い。ただ、器用な動作を実現できるがために、機構や構造が複雑となりコストが高くなる。ダイカスト部品を把持対象とする際、人の手であれば必ずしも最適な把持ができるというわけではない。そのため、複数種類のダイカスト部品が把持対象になった場合、1つのハンドで対応することは困難であり、部品ごとに専用のハンド、もしくは治具が必要になると考えられる。

#### 3.1.2 物体の幾何学的拘束

部品に仕上げ処理を施すためには、外力に対して部品をより安定して固定する必要がある。そのためには、フォームクローージャとなる幾何学的拘束ができることが理想である。この拘束方法には、部品の位置・姿勢が一意に決まるという利点もある。

図1のように4点(A~D)で支持された長方形物体(剛体)を例に幾何学的拘束について説明する。

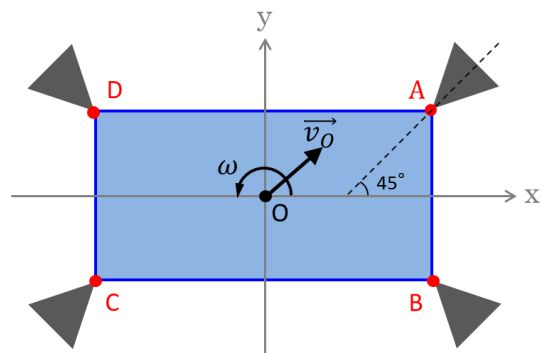


図1 長方形物体の模式図①

ここで、接触点における摩擦はないものとし、点Oにおける速度と角速度をそれぞれ  $v_O = (v_{Ox}, v_{Oy})$  と  $\omega$  とする。また、点Aの速度  $v_A$ 、支持側への法線ベクトル  $n_A$  として点Aにおける運動を考えると、支持により運動の向きが制約される(図2)。

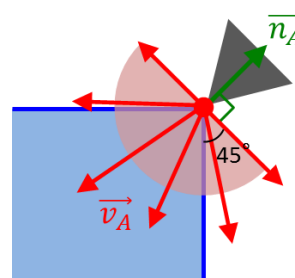


図2 点Aにおける運動の制約

この制約条件を式で表すと、式(1)のように表され、展開すると式(2)となる。

$$\begin{aligned} n_A \cdot v_A &\leq 0 && \dots (1) \\ n_A \cdot v_O + (x_A \times n_A) \cdot \omega &\leq 0 && \dots (2) \end{aligned}$$

各点における制約条件から、速度と角速度の関係を導出することができる。図1のような長方形物体の場合、解は  $(v_{Ox}, v_{Oy}, \omega) = (0, 0, 0)$  に限られる。つまり、この物体はどのような運動も許容されない状態にある。この状態のことをフォームクロージャと言う。フォームクロージャ状態になるためには、少なくとも(拘束すべき自由度) + 1個の点接触が必要である。

また、図3のように支持側の法線と長方形の対角線が一致している場合、解は

$$(v_{Ox}, v_{Oy}, \omega) = (0, 0, C) \quad C: \text{任意の定数}$$

となり、回転運動を許容してしまう。そのため、フォームクロージャを形成するには接触点の位置と角度を考慮する必要がある。

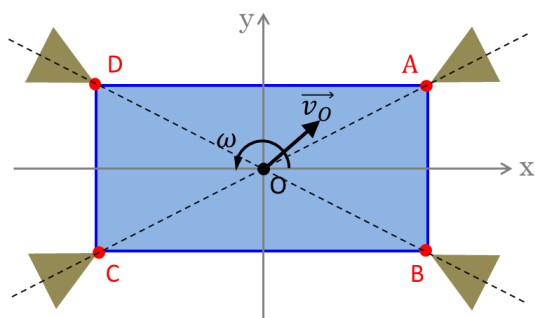


図3 長方形物体の模式図②

### 3.1.3 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4と図5に示す。材質はアルミニウム合金であり、大きさはおよそ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4と図5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。

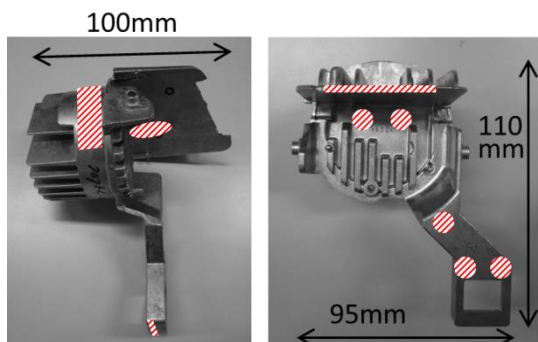


図4 研究対象のダイカスト部品 (1/2)

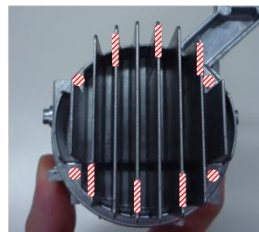


図5 研究対象のダイカスト部品 (2/2)

ダイカスト部品は鋳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。図4(右図)では5箇所、図5では4箇所にピン跡のバリが生じている。このバリの特徴として、部品の両面に生じることが挙げられる。バリの大きさとしては、直径が3~5mmで、高さは1mm以下のものが多い。本研究ではこの円形状のバリを対象とする。

### 3.1.4 ロボット指の設計

ロボットのハンドは、低コストであることと、ロボットへの装着が容易であることから汎用グリップを用いることとする。そして、開閉ストロークやアタッチメント間距離等を考慮し、空圧式平行開閉型の幅広タイプを選定した。指となるアタッチメントは形状を設計し、3Dプリンタで試作した。以下にその設計手順を説明する。

対象部品が複雑形状であり、また、グリップの可動域が直線状であるといった制約から、対象部品を幾何学的に拘束するアタッチメントの形状を製作することは容易ではない。そこで、まず、対象区画を平面に置き換え、その平面形状を2次元的に拘束する。その後、その平面形状を3次元に展開し、追加される自由度を拘束するアタッチメントの形状を構築する。

保持対象とした区画を図6に示す。この区画には突起が2つあるものの、それを除けば円柱形とみなすことができる(図7)。

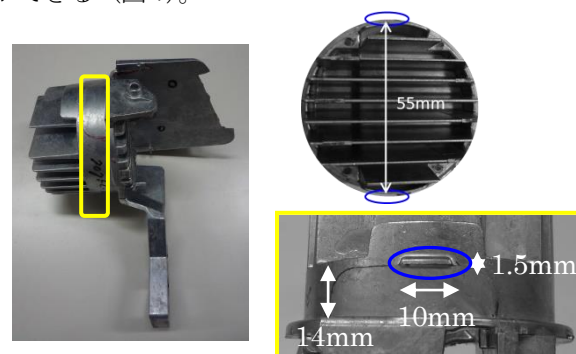


図6 ロボット指の対象区画と突起の位置

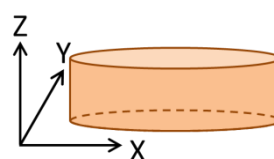


図7 対象区画の概略図

図7のように座標系をとると、XY平面において4つの接触点を設けることでX Y平面の並進運動を拘束することができる。Z軸回りの回転運動については、摩擦がなかった場合、拘束することができない。そのため、各接触点にラバーを貼り、摩擦によって回転運動を拘束した。3次元への展開は、指の平面形状を対象区画の厚さだけZ方向に厚みをもたせた。そのため、最終的なロボット指は図8となった。ラバーとの摩擦力により、Z軸方向の並進運動、X軸とY軸回りの回転運動を抑制できる。このロボット指は3Dプリンタで出力し、空圧式グリッパに取り付けて対象部品の把持ができることを確認した。

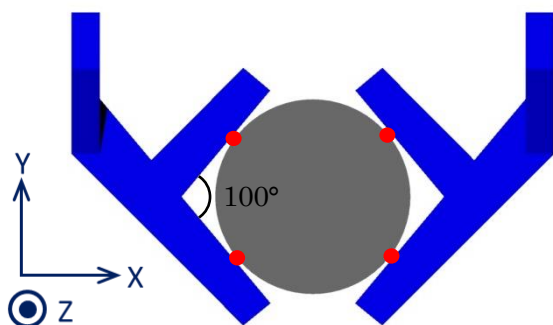


図8 ロボット指の設計図

### 3.2 仕上げ処理にかかる力の定量的評価

#### 3.2.1 力覚評価システムの構成

協働ロボットに仕上げ処理をさせるためには、対象部品の仕上げ処理にどのような力がどのくらいかかるか、力の定量的特性を把握しておく必要がある。力覚評価を行うために図9のようなシステムを用意した。力を測定するためのセンサとして、6軸（X/Y/Z軸方向の力と各軸回りのモーメント）の力が測定可能な多分力計（図9の①）を用意し、6軸の力を同時に計測するデータレコーダ（図9の②）と接続する。また、仕上げ処理の様子を映像として記録するため、ビジュアルレコーダとカメラを用意した（図9の③と④）。バリの特徴と仕上げ処理の力を対応させて評価するために、データレコーダとビジュアルレコーダは同期して記録する。



図9 力覚評価システムの構成

①多分力計、②データレコーダ、③ビジュアルレコーダ、④カメラ

多分力計とグリッパは直接固定することが困難だったため、多分力計用とグリッパ用のプレートを製作した（図10）。そのため、多分力計とワークとの間には、アタッチメント、グリッパ、2枚のプレートが介在する。

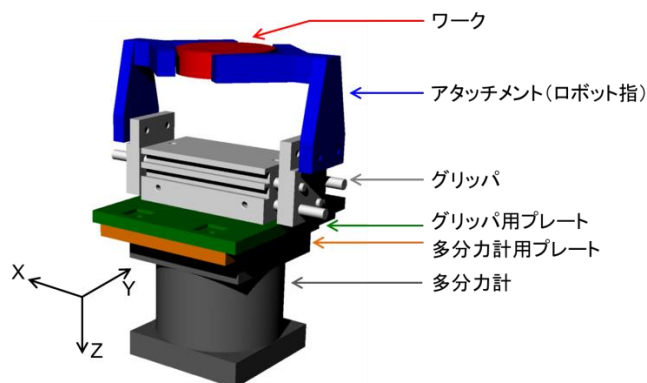


図10 多分力計とグリッパの固定

仕上げ処理の工具として、先端に表面用エンド型のブラシを付けたマイクログラインダーを用いた。一定方向から部品に工具を当てられるように、グラインダーは専用スタンドに固定した（図11）。このスタンドに設置されたグラインダーは、手動で鉛直方向（図10の+Z方向）に動かすことができる。



図11 工具の固定

#### 3.2.2 力覚評価システムを用いた定量的評価

対象のバリを表面仕上げした際の結果を記述する。使用したブラシは推奨回転速度（7000回/min）で回転させた。図12のとおり、表面仕上げ処理によりバリのあった箇所が研磨されていることがわかる。この仕上げ処理を施したときに多分力計にかかった力（F）とモーメント（M）を図13と図14に示す。なお、この図の座標系は図10と同じである。グラインダーを+Z方向に動かしたため、+Z方向に最も力がかかっている。Fzの時間変化は、工具が部品に接触する瞬間に大きい力がかかる傾向が観察できる。その後、工具の高さを一定にしておくことでFzもほぼ一定の力がかかっていた。Fzの最大値は5.02Nであった。それに比べてFxとFyは小さいものの、回転工具を使用したため、どちらも最大2Nほどの力がかかった。

Z方向の力が卓越していたため、モーメントについてはMzよりMxとMyの方が変化量が大きかった。この実験ではXY平面における第一象限で+Z方向に負荷をかけたため、Mxが正、Myが負の値となった。MxとMyの絶対値はほぼ同じ値で推移しており、絶対値の最大はどちらも0.37Nmであった。



(a) 仕上げ前 (b) 仕上げ後  
(点線で囲まれた部分が研磨箇所)  
図12 仕上げ処理前後のバリ

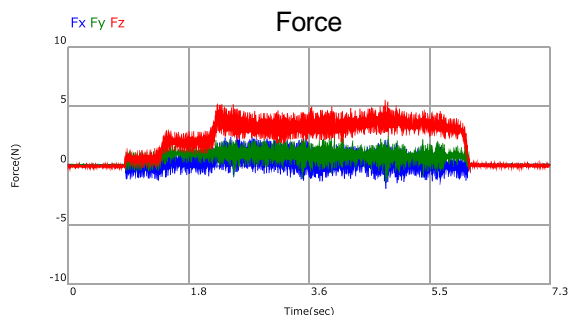


図13 多分力計で計測された力

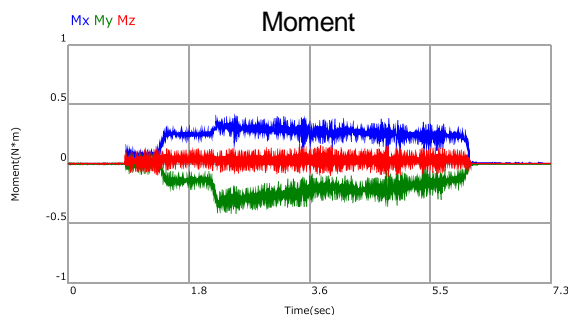


図14 多分力計で計測されたモーメント

#### 4. 研究結果と考察

- ・複雑形状部品を対象にロボット指の試作をした。フォームクロージャの拘束原理に基づいて安定的な把持方法を検討し、設計に反映させた。その際、まず、対象区画を平面に置き換え、その平面形状を2次元的に拘束し、その後で平面形状を3次元に展開して接触点の位置を検討した。
- ・協働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。これまでの実験での最大負荷は5Nほどであった。しかし、バリの形状や大きさ、工具によって結果が変わることが予想されるため、引き続き実験を行う。

#### 5. まとめ

協働ロボットによる複雑形状部品の仕上げ加工方法の確立及びシステムの構築に向けて、安定的な部品の把持方法の検討と仕上げ処理にかかる力の特性評価を行った。

#### 6. 今後の課題

- ・対象部品の種類を増やして、ロボット指の試作と力覚評価を行う。
- ・仕上げ処理前後のバリの高さの計測を行う。
- ・バリの検出方法を検討する。
- ・ロボットを用いた把持実験を行う。

#### 7. 謝辞

研究にご協力いただきました国立研究開発法人 産業技術総合研究所 知能システム研究部門 マニピュレーション研究グループの永田和之氏に感謝いたします。

#### 8. 参考文献等

- 1) F. Reuleaux, “The Kinematics of Machinery”, Macmillan, 1876.
- 2) K. “Gopal” Gopalakrishnan and Ken Goldberg, “Gripping Parts at Concave Vertices”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1590-1596, vol.2, 2002.
- 3) 土橋, 横小路, 野田, 奥田, “ロボットセルにおける組立作業用汎用ハンドの設計手法”, 電子情報通信学会技術研究報告ヒューマン情報処理, vol.108, no.282, pp.177-182, 2008.
- 4) 土橋, 横小路, 野田, 奥田, “準静的押し操作解析に基づく多指ハンドによる把持シミュレーションと対象物体の許容初期誤差範囲の導出”, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.10, pp.1201-1212, 2010.
- 5) 土橋, 神岡, 深尾, 横小路, 野田, 長野, 永谷, “組立作業のための平行スティック指汎用ハンドによる三次元形状部品の把持の最適化”, システム制御情報学会論文誌, vol.28, no.6, pp.258-266, 2015.
- 6) 2-Finger Adaptive Robot Gripper, ROBOTIQ, <http://robotiq.com/products/adaptive-robot-gripper/>
- 7) W. Townsend, “The BarrettHand Grasper-Programmably Flexible Part Handling and Assembly”, Industrial Robot: An International Journal, vol.27, no.3, pp.181-188, 2000.
- 8) Shadow Dexterous Hand, Shadow Robot Company, <https://www.shadowrobot.com/products/dexterous-hand/>
- 9) H. Liu, K. Wu, P. Meusel: “Multisensory Five-Finger Dexterous Hand: The DLR/HIT Hand II”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3692-3697, 2008.
- 10) T. Mouri, H. Kawasaki, K. Yoshikawa, J. Takagi, and S. Ito, “Anthropomorphic Robot Hand: Gifu Hand III”, Proc of International Conference on Control, Automation and System, pp. 1288-1293, 2002.