

# AI を活用した人とロボットの協働による工場のスマート化支援

## ー協働ロボットによるバリ取り作業自動化に関する研究ー

Support for the realization of smart factories by the collaboration with humans, robots and AI.

- Research on automation technology in deburring work by a collaborative robot -

電子・機械技術部 ロボット・制御科 安藤久人 松本聖可 根本大輝

ものづくり現場のAIやロボット導入によるスマート工場化支援として、バリ取り作業の自動化に取り組んだ。対象は、鉄板に開けたドリルの貫通穴である。はじめに、協働ロボットによるバリ取り条件を検証した。また、鉄板を裏返した場合でも精密な位置決めが不要となるよう画像処理とロボットとの連携に取り組んだ。更に、AIにより人を認識した際のロボット停止動作を実現した。以上により、AIを活用した人とロボットとの協働によるバリ取りシステムを実現した。

**Key words:** スマート工場、協働ロボット、画像処理、バリ取り

## 1. 緒言

少子高齢化により、我が国の生産年齢人口（15歳から64歳）は1995年をピークに減少している。2050年には5,275万人（2021年から29.2%減）に減少すると見込まれている<sup>1)</sup>。令和元年10月1日現在、本県における生産年齢人口は約104万人であり県人口の57.0%を占めている。本県においても、10年後の生産年齢人口は約10%減少すると予想されている<sup>2)</sup>。このような人手不足への具体的な対策として、ものづくりの現場では、AIやIoT、ロボット等を積極的に導入し工場の自動化・省力化を進める動きが活発になっている。

本研究では一例として企業の個別課題であるバリ取り作業の自動化のため協働ロボットによるバリ取り作業、画像処理とロボットとの連携、AIによる人認識とロボットの安全制御に取り組んだ。

## 2. バリ取り作業の自動化

### 2. 1. 研究対象

本研究では、鉄板に開けたドリル貫通穴端部のバリ取り作業の自動化に取り組んだ。現状、(1)機械でドリル貫通穴を開ける。(2)人が作業台に運ぶ。(3)ドリル穴端部(表面)のバリ取りを手作業で行う。(4)板を裏返す。(5)裏面のバリ取りを手作業で行う。(6)仕上げた板をコンテナに入れる。という作業工程である。単調作業のため人への作業負荷が大きい。板の大きさや穴の個数が不定であり、作業枚数も変動するため、従事する人員の予測が立てにくいことなどにより、作業の一部を協働ロボットに置き換えたいというニーズがある。そこで、上述の作業工程のうち(3)と(5)の協働ロボットによる自動化に取り組んだ。

### 2. 2. 課題と目標

自動化を進めるに当たり、ロボットによるドリル穴のバリ取り条件が不明であること、貫通穴のため裏面のバリも取らなければならないこと、バリ取り工具を使用することから安全策を講じなければならないこと、といった課題があった。これらの課題に対応するため、以下の3つの目標を設定し取り組んだ。

(1) ロボットによるドリル穴のバリ取りに適した条件を決定する。

(2) 画像処理により、板を裏返しても穴の位置を認識してロボットがバリ取りを行えるようにする。

(3) AIを用いて人を認識した際に動作中のロボットを停止させる。

## 3. 実験

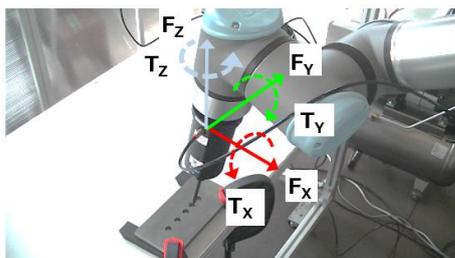
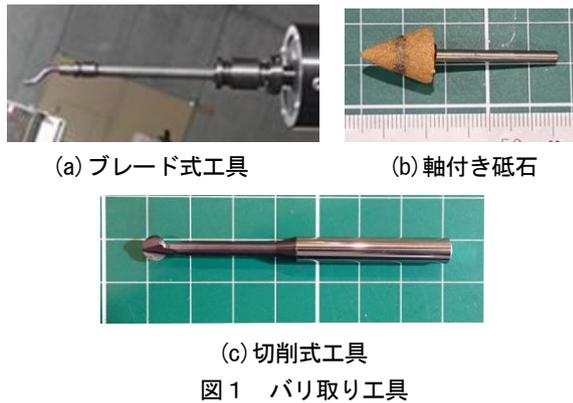
### 3. 1. ロボットによるバリ取り実験

#### 3. 1. 1. バリ取り工具と制御方法の検証

ロボットによるバリ取り実験を行った。はじめに、バリ取りに適した工具と制御方法について検証した。実験には協働ロボット(UR10e, ユニバーサルロボット製)を用いた。実験ワークは材質がSS400相当の鉄板(長さ200×幅100×厚さ10[mm])にドリル貫通穴を開けたものである。本実験では、穴径は13[mm]とした。バリ取り工具は、ブレード式工具、軸付き砥石、切削式工具の3種類である。図1に使用した工具を示す。

制御方法は、位置制御と力制御について検証した。位置制御は工具と穴との幾何的な位置関係からプログラムを作成し行った。一方、力制御は協働ロボットに実装されているインピーダンス制御<sup>3)</sup>を適用した。

評価は目視による外観観察とロボットアーム先端に加わる負荷力により行った。図2にロボットに作用する負荷とその方向を示す。



$F_x, F_y, F_z$  (力3成分),  $T_x, T_y, T_z$  (トルク3成分)

### 3. 1. 2. 工具送り速度の検証実験

次に工具の送り速度を変え、ロボットアーム先端に作用する負荷力の絶対値を評価した。本実験の目的は、バリ取り作業時のタクトタイムを短縮するために、負荷が小さくかつ工具送り速度の速い条件を決定するためである。

実験ワークは前節と同様とした。穴径は、加工長を伸ばすために大きくし20[mm]とした。工具は、4. 1. 1. の結果から切削式工具を用いた。

表1に、本実験での工具回転数、及び工具送り速度の条件を示す。

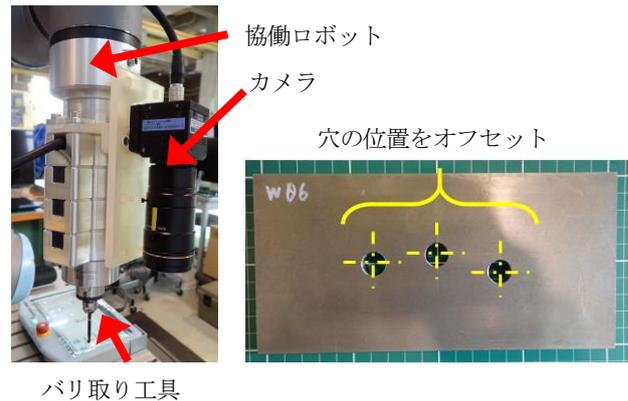
表1 工具回転数と送り速度

| 工具回転数[rpm] | 工具送り速度[mm/s] |    |    |
|------------|--------------|----|----|
| 5,000      | 1            | 2  | 4  |
| 10,000     | 10           | 20 | 30 |

### 3. 2. 画像処理とロボットとの連携

画像処理とロボットとの連携によるドリル貫通穴のバリ取りを実施した。画像処理には、(株)キーエンス製2,100万画素2次元白黒カメラ(CA-H2100M)、25[mm]焦点レンズ(CA-LHE25)、画像処理装置(XG-X2700)を使用した。図3にロボットへのカメラの取り付け状況、及び実験ワークを示す。

カメラはロボットの腕に装着するオンハンドとし、ドリル貫通穴は直線ではなく、図に示すように、3つの穴を上下にずらして開けた。穴径は13[mm]とした。



### 3. 3. AIによる人認識とロボットの安全制御

バリ取り作業を人とロボットとが協働で行う際、バリ取りはロボット、ワークの設置や搬送は人が行うことを想定している。その際、リスク管理の観点から、人がワーク設置等の作業を行っている間、ロボットはバリ取りを行わない安全制御が必要である。そこで、AIを活用しカメラが人を認識している間はロボットが動作しないシステムを構築した。表2に仕様を示す。

表2 AIによる人認識システムの仕様

| コンピュータ仕様 | OS                    | CPU                  | メモリ |
|----------|-----------------------|----------------------|-----|
|          | Ubuntu20.04.4 (64bit) | Intel Core i5 2.4GHz | 8GB |
| システム構成   | ROS                   | AI                   |     |
|          | Noetic                | YOLO v3              |     |

## 4. 結果

### 4. 1. ロボットによるバリ取り実験

#### 4. 1. 1. バリ取り工具と制御方法の検証

図1の3種類の工具を用いてバリ取り実験を行った。

図4に切削式工具を用いたときのアーム先端に加わる負荷力の時間変化を示す。負荷力は、位置制御の方が力制御の場合よりも小さかった。力制御では、荷重 $F_z$ が目標とした2[N]を上回った。

表3に各々の工具と制御方法によるバリ取り後の穴形状の外観を示す。ブレード式工具の場合には力制御で、切削式工具の場合には位置制御で良好なバリ取り面が得られた。軸付き砥石の場合には、バリ取りにより更にバリが形成される2次バリが生成された。

表4にバリ取り後の結果(まとめ)を示す。切削式工具での位置制御の場合、加工時間が短く、加工後も工具に摩耗や欠けがなかった。以上から、切削式工具での位置制御を協働ロボットによるバリ取り条件に採用した。

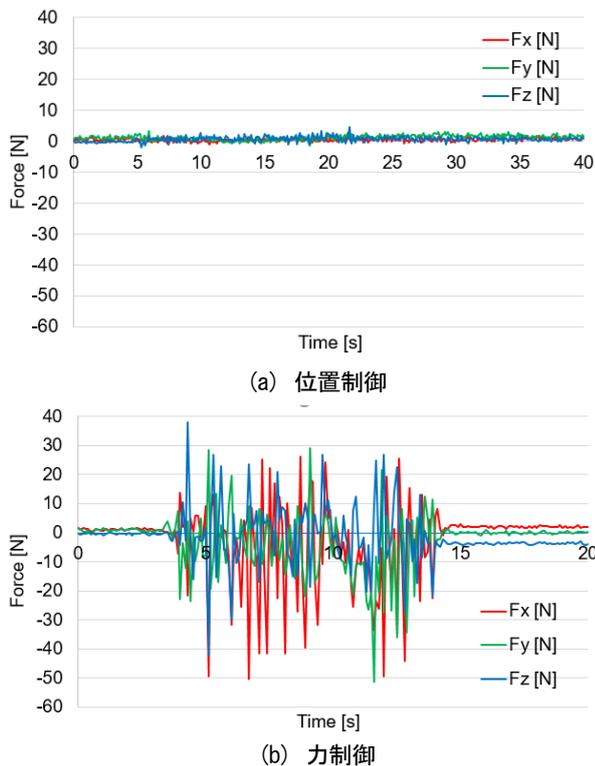


図4 アーム先端負荷力

表3 バリ取り後の穴形状の比較

|       | 位置制御 | 力制御 |
|-------|------|-----|
| ブレード式 |      |     |
| 軸付き砥石 |      |     |
| 切削式工具 |      |     |

表4 バリ取り結果 (まとめ)

|       | 位置制御 | 力制御 | 時間[s] | 工具状態 |
|-------|------|-----|-------|------|
| ブレード式 | ×    | ○   | 58.4  | ○    |
| 軸付き砥石 | ×    | ×   | 22.5  | ×    |
| 切削式工具 | ○    | ×   | 27.5  | ○    |

#### 4. 1. 2. 工具送り速度の検証実験

自動化のためにはタクトタイムを削減し短時間でバリ取りをする必要がある。そこで、工具送り速度の違いによるロボットへの負荷を検証した。

図5に、工具送り速度を変えた場合のロボットアーム先端に作用する力(絶対値)を示す。工具回転数が

5,000[rpm]の場合、工具送り速度が4[mm/s]では負荷が上昇する。一方、10,000[rpm]では工具送り速度を30[mm/s]としても負荷力は10[N]以下であった。

しかし、工具送り速度20[mm/s]でのバリ取り面の工具顕微鏡画像から、送り速度が速い場合、バリ取り面が半径方向に波を打ち穴形状の変形が確認された。以上から、工具送り速度を10[mm/s]とした。

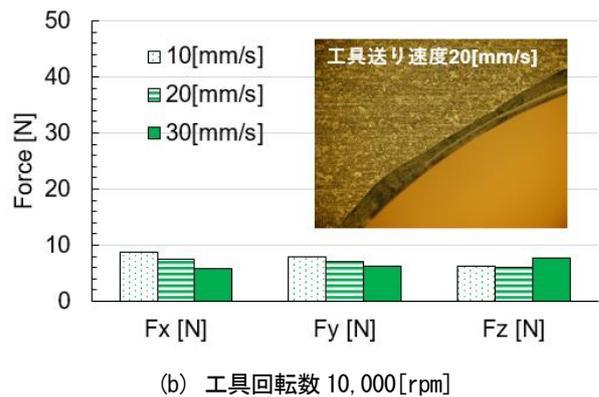
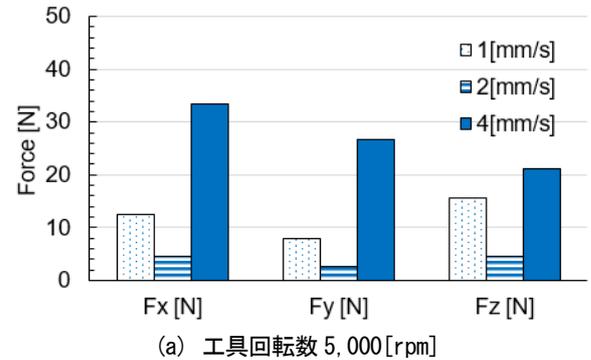


図5 ロボットアーム先端の負荷力(絶対値)

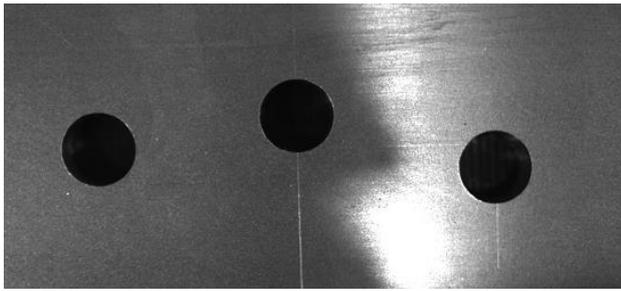
#### 4. 2. 画像処理とロボットとの連携

以上の実験結果より、画像処理と協働ロボットを連携させてバリ取り作業を行った。

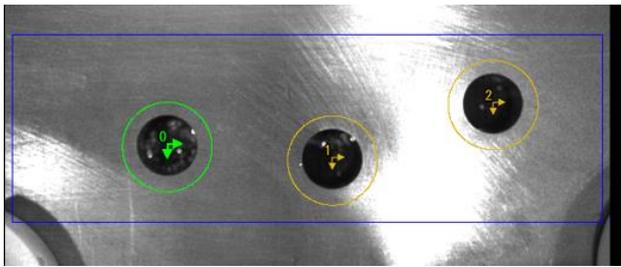
画像処理は、画像の特徴形状をマスター画像として登録し、撮像した画像と比較することで行った。穴形状をマスター画像として撮像した画像から穴を認識しその穴の中心座標を求めた。求めた穴の中心座標とロボットのアーム先端の座標とを紐づけることで、穴の位置がずれてもロボットのアーム先端が穴の中心位置に追従できるようにした。図6にマスター画像と画像処理による検出結果を示す。

バリ取り動作の流れは、①カメラによる穴位置の認識、②ロボットによるバリ取り作業、③人によるワークの裏返し作業、④カメラによる穴位置の認識、⑤ロボットによるバリ取り作業とした。

図7に作業状況を示す。また、図8にバリ取り前後での穴の外観および断面の輪郭形状を示す。



(1) マスター画像



(2) 穴の中心座標検出結果

図6 穴の画像認識

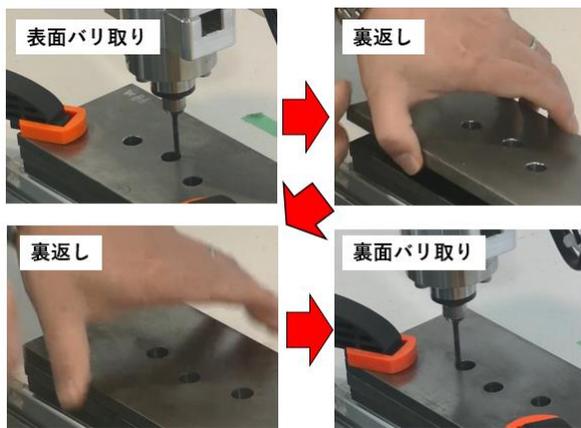


図7 ドリル貫通穴（両面）のバリ取り作業

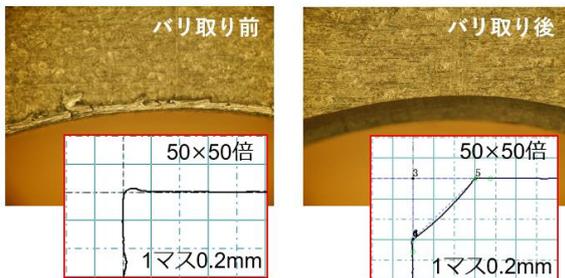


図8 バリ取り前後での穴の外観及び断面形状

穴の位置が変わっても画像処理と連携することで、精密な位置決めを行うことなく、鉄板両面のバリ取りを実現した。バリ取り作業に要した時間は、112秒であった。手作業による同径の穴の作業時間が平均40.47秒（3回平均）であったことから、同じ条件での手作業に要するバリ取り時間は40.47秒×6穴＝242.82秒（約4分3秒）と計算される。以上から、

53.9%のタクトタイム短縮を実現した。

#### 4. 3. AIによる人認識とロボットの安全制御

人とロボットがバリ取り作業を協働で行うことを想定し、ワーク設置時に人をカメラが認識している際にはロボットが停止するよう、AIによる人認識とロボットを連携させた。

AI処理はYOLO v3をROSに組み込み実行した。人の認識は学習済みのライブラリ<sup>5)</sup>を活用した。

図9にAIによる人認識状況とロボットの動作状況を示す。AIにより人を認識すると、イーサネットを介して“person”という文字列をロボット側にする。その文字列を受け取り、カメラが人を認識している間はロボットが停止し続けるシステムとした。

また、実用面を考慮するとカメラの取り付け位置によっては人全体ではなく、人の体の一部しかカメラに映らない可能性がある。そのような場合でもAIが人の体の一部を認識できるかどうか確認した。

図10に示すように、カメラに人全体ではなく、体の一部である手が映った場合でもAIが“person”と認識することを確認した。

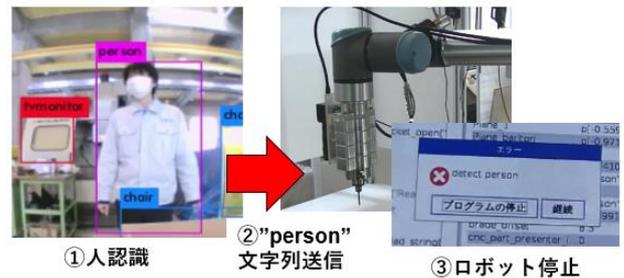


図9 AIによる人認識とロボットの安全制御

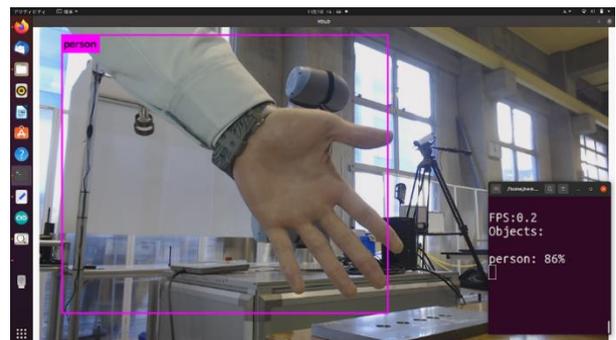


図10 AIによる体の一部の認識

## 5. 考察

工具、及び制御方法の違いによる、バリ取り条件を検証した。切削式工具による位置制御が、外観・ロボットへの負荷・加工時間・作業後の工具状況から、総合的にバリ取りに適した条件であった。

工具とワークが接触し力が作用する作業として研磨作業が挙げられる。この場合、インピーダンス制御による力制御が有効である<sup>4)</sup>。しかし、ドリル穴端部のバリ取りには位置制御が有効であった。ドリル穴端部は、研磨面に工具を押し付けるのとは異なり、接触面積が著しく小さく力が伝わりにくいこと、軸付き砥石や切削式工具はスピンドルにより高速に回転するため、ワークと工具との接触部の摩擦の影響が研磨とは異なることなどが理由として考えられる。バリの位置や形状によっては力制御が有効な場合もあると考えるが、これらの検証は今後の課題である。

画像処理により、ドリル穴の位置を認識することで鉄板両面のバリ取りを実現した。本研究では3つの穴の位置を同時に認識することができた。今後の課題は、穴の個数が増えた場合の処理、穴の径が変わる場合の処理である。また、本研究では公差穴を対象としていない。公差穴バリ取りの課題として、穴の中心位置と画像処理による検出中心との位置精度が挙げられる。また、板厚が変わったときの追従など今後の対応としたい。

AIにより人を認識し、認識中はロボットを停止させることができた。この時、AIの処理速度は使用したコンピュータの性能に依存する。本研究ではAIによる処理のフレームレートが0.2、動作遅延が18~20秒であった。今後は、GPU搭載のコンピュータに開発したシステムを実装するなど、遅延時間の短縮が課題である。

## 6. 結言

- ・ロボットによるドリル貫通穴のバリ取り条件を決定した。
- ・画像処理とロボットの連携により、鉄板両面のドリル貫通穴のバリ取りを実現した。
- ・AIを活用して人及び体の一部を認識し、ロボットを停止させる安全制御を実現した。

### 参考文献

- 1) “令和4年情報通信白書”，総務省.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/html/nd121110.html>, (参照 2023-2-14)
- 2) “将来人口推計シミュレーションについて” 福島県.  
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/117369.pdf>, (参照 2023-2-14)
- 3) 小菅一弘. 力制御法の分類と制御システムの設計法. 日本ロボット学会誌. 1991, Vol. 9, No. 6, pp751-758.
- 4) “テクニカルレポート 2022 No. 7 人協働ロボットで巧みな手作業の自動化に挑戦”，安川電機.  
<https://www.yaskawa.co.jp/technology/technical-report/detail230110>, (参照 2023-2-17)

- 5) “YOLO ROS: Real-Time Object Detection for ROS”  
GitHub. [https://github.com/leggedrobotics/darknet\\_ros](https://github.com/leggedrobotics/darknet_ros),  
(参照 2023-4-13)