

金型磨きロボットの開発

メカニクス系工学専攻 教授 原田 孝

1. 緒言

金型磨き作業は、棒状の砥石を 20~30N の力でワークに押し当てて、ワーク面上を 10m/min 程度の速度で往復送り運動させる。高度な熟練を要するだけでなく、最大 50N の大きな押し付け力で高速に数百回の往復送り運動を人間の手によって行う重負荷作業であり、自動化に対するニーズは高い^[1]。これまでに、多関節ロボット先端に磨き用工具を装着し、力制御を実装して磨き作業を自動化する研究が行われてきた^[2]。これらの研究では、回転砥石を用いた低速送り運動による磨きの自動化が試みられているのみであり、棒状砥石の高速往復運動による金型磨きロボットの研究事例は殆んどない。近年、位置制御を行う DELTA 型ロボットが、高速なピック-アンド-プレース用として数多く開発されている。最近では、ダイレクトドライブモータ(以下、DD モータと略す)を搭載して DD モータのトルク制御によりロボットの力制御を行う DELTA(HEXA)型ロボットの研究事例が報告されている^[3]。DD モータはバックドライブバビリティを有するのでダイレクトティーチングに適する一方で、減速機付きモータに比較して推力が小さいだけでなく、モータに存在するコギングトルクが直接ロボット手先の力リップルに反映される。磨き作業のように数十 N の大きな押し付け力で精密に力制御を行う DD モータ駆動パラレルロボットの研究事例はない。

本研究では、数十 N の押し付け力で安定して精密に力制御を実現し、10m/min を超える高速往復送り運動にて金型磨きを行うパラレルロボットの開発を目的とする。コギングトルクが極めて小さいスロットレス DD モータを用いた冗長駆動 DELTA 型ロボットを試作し、金型磨き動作を実現した。

2. 金型磨きロボットの設計

2.1 冗長駆動 DELTA 型ロボット

DD モータを用いた冗長駆動 DELTA 型ロボットに関する研究事例が報告されているが、これらは冗長駆動による高推力を利用して高加速度性能を実現することを目指したものである^[4]。本研究では、新たに高推力で精密な力制御を対象として冗長駆動 DELTA 型ロボットを提案する。冗長駆動はメカニズムや制御が複雑となるが、推力が小さいコアレスモータの推力不足を補うとともに、特異姿勢回避、機構剛性の向上や対偶部に存在するガタ除去のための内力制御が可能などの優位性を有する。

2.2 アクチュエータ

スロットレス DD モータの中で、トルクが大きい新明和工業社製 BCL09-25 を採用した。BCL09-25 はビルトインタイプのモータであり、図 1 に示すように、ハウジング、回転軸を独自に設計し、RENISHAW 社製ロータリエンコーダと共にハウジングに組み込んだ。1 組 2 個の深溝玉軸受にて回転軸を低摺動抵抗で支え、ベアリングに適度な与圧を与えてク

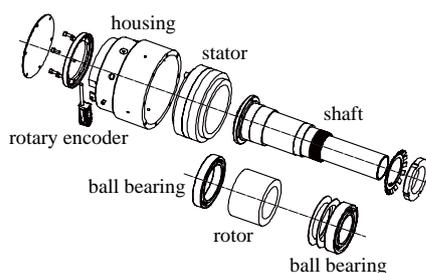


Fig.1 Exploded diagram of the actuator Fig.2 Prototype of the actuator

リアランスを除去する設計とした。試作したアクチュエータを図2に示す。

2.3 ロボット推力の向上

スロットレス DD モータは発生トルクが小さいために、空間3自由度を4組のモータリンク機構にて冗長駆動しムービングプレート上の推力不足を補った。ロボットは局所的に100mm程度程度の領域を磨き、これ以上のサイズの磨き面はワーク本体を移動させる機構を併用することとし、動作領域を140mm程度のXY平面(Z方向40mm)と限定し、アームを短く設計してロボットの推力向上を図った^[5]。試作したロボットの外観写真と仕様を図5および表1に示す。

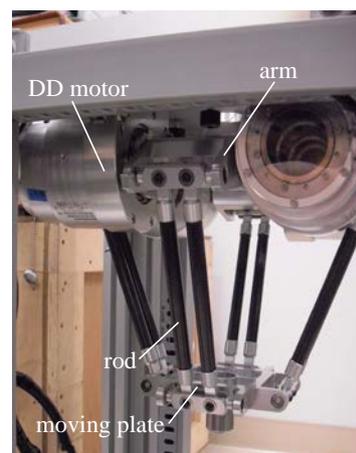


Fig.3 Prototype of the mold polishing robot

3. 設計検証

冗長駆動 DELTA 型ロボットの運動学およびヤコビ行列などの計算式^[6]を用いて、表2に示す試作機の定格速度と定格推力の計算根拠を示す。試作機の動作範囲を $x=y=\pm 70\text{mm}$, $z=160\text{mm}\sim 200\text{mm}$ と設定し, $x=y=0\text{mm}$, $z=180\text{mm}$ を試作機の基準位置とした。この基準位置において表1に示すモータの定格速度範囲内で x 方向に発生できる最大速度を試作機の定格速度として計算した。

基準姿勢において手先速度を $\dot{x}=[60,0,0]^T$ (m/min) とすると, 各関節速度は $\dot{\theta}=[-87.8,0,-87.8,0]^T$ (min^{-1}) となり定格速度範囲内で手先を x 方向に 60m/min の速度で移動できる。

基準位置において, 全てのアクチュエータに定格トルク値を $\tau=[0.53,0.53,0.53,0.53]^T$ (Nm) と与えると, 手先発生力は $f_x=[0,0,43.1]^T$ (N) となる。基準位置においては定格トルクの範囲内で z 方向に 43.1N の押し付け力を与えることができる。実際の磨き作業では, xy 方向に研磨抵抗が加わるため研磨作業として与えられる押し付け力はこれよりも小さな値になる, x 方向の研磨抵抗を z 方向の押し付け力の 25% 程度とした時に, $f_x=[5,0,20]^T$ (N) を与えるモータのトルクは $\tau=[0.03,0.24,0.52,0.24]^T$ (Nm) となり定格トルクの範囲内である。この時の z 方向の発生力 20N を表1に定格力として表記した。 z 方向の押し付け力にはロボット機構の自重も加わるので, 金型磨きの研究で報告されている 20~30N の押し付け力を与えることができる。さらにムービングプレートに錘を付加することで押し付け力を補い, 最大 50N の押し付け力を与えることも可能である。また, 本ロボットは手磨き(10m/min)よりも高速な往復運動(60m/min)を実現しうるので, 研磨工具の往復送り運動速度を大きくして相対的に小さな押し付け力で効率と品質が良い研磨加工を行わせることも可能である。

Table 1 Specifications of the robot

length of arm	50 mm
length of rod	200 mm
rated force (Z)	20N
rated speed (XY)	60 m/min
work space (X×Y×Z)	140×140×40mm

4. 周辺装置

金型磨きを行うために力センサを搭載したスティック砥石把持機構と, ワークの姿勢を変化させるためのスチュワートプラットフォーム型パラレルメカニズム, およびワークを回転させるためのロータリーテーブルを整備した。周辺装置を整備した金型磨きロボットシステムを図4に示す。

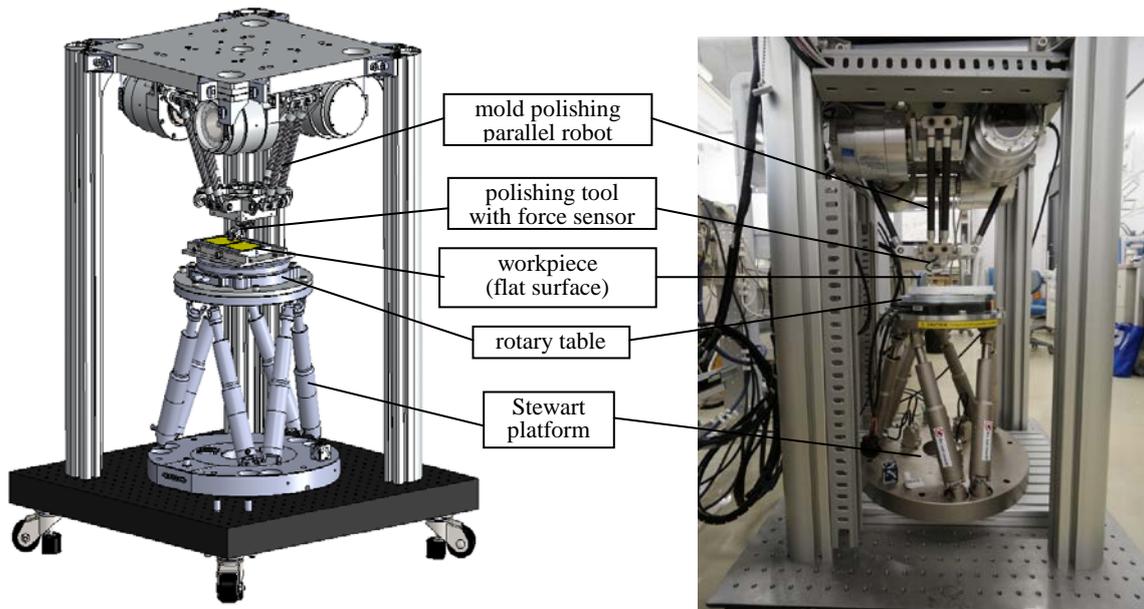


Fig.4 Mold polishing robot system

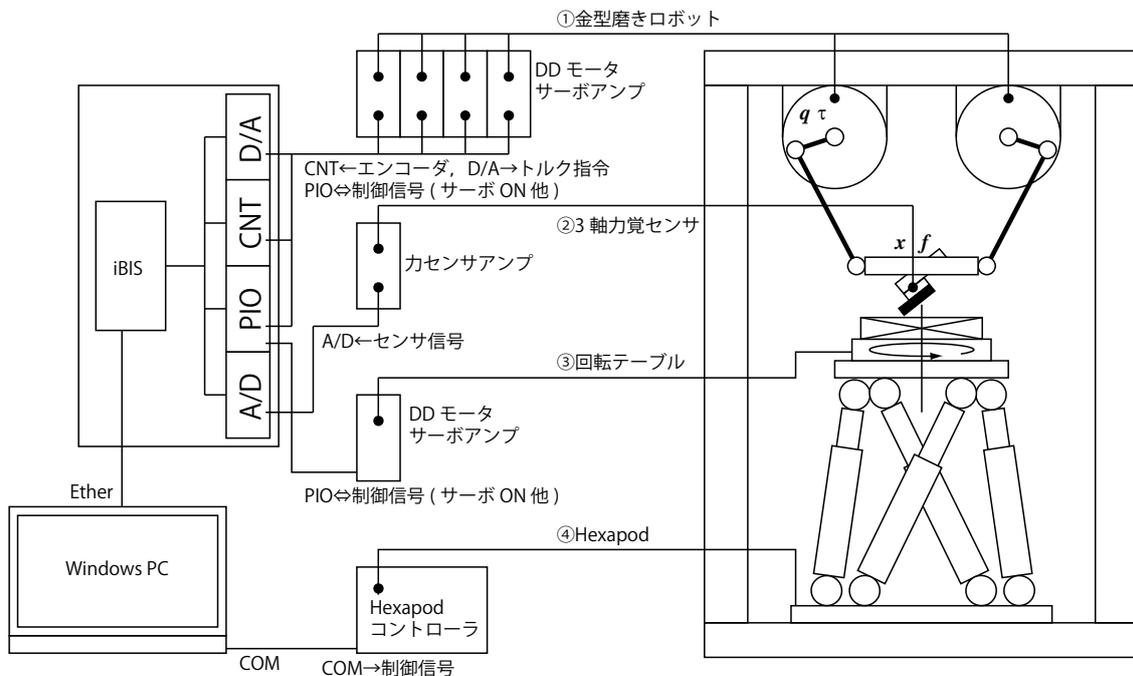


Fig.5 Control system of the mold polishing robot

5. 制御装置と制御則

制御装置には D/A コンバータ, A/D コンバータ, PIO, エンコーダカウンタを搭載した MTT 社製 iBIS を用いた. iBIS 用のソフトウェアは Simulink を用いたモデルベース設計を行った. iBIS はリアルタイムで上位のホストコンピュータとデータ通信が可能であり, 金型磨きロボットの制御パラメータの変更や, ロボットの位置・速度・加速度と磨き力をリアルタイム表示・保存を可能とした. 制御装置全体の模式図を図 5 に示す. 制御則は力指令型のインピーダンス制御を実装し, 手先のインピーダンスを設定し安定した磨き作業を行わせる事が出来るようにした. 手先のインピーダンスはホストコンピュータからリアルタイムに設定変更を可能とした.

6. 金型磨き実験

平面のワークに対して、磨き速度 10m/min, 20m/min で金型磨き実験を行った。様子を図 6 に示す。なお、金型磨きロボットによる磨き作業の動画は、<https://www.youtube.com/watch?v=3AcZ6QRy3RI> にアップロードしている。

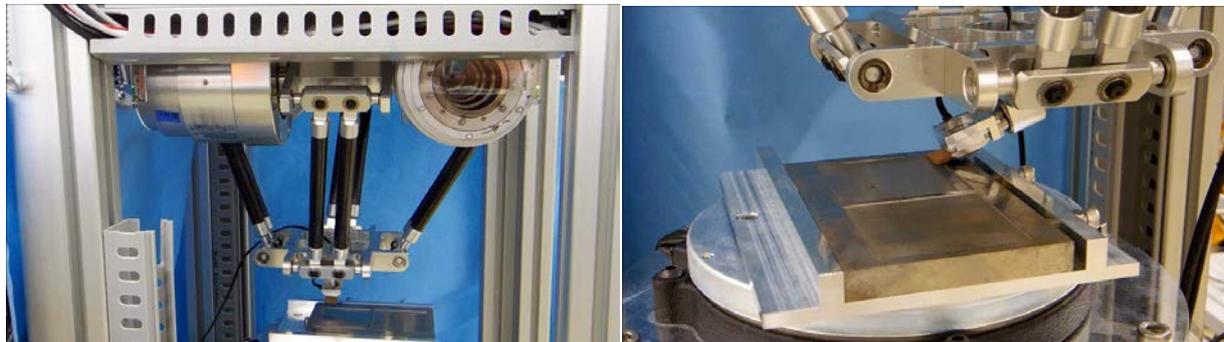


Fig 6 Mold polishing by the developed robot system

7. 結 言

金型磨き作業を自動化する目的で、スロットレス DD モータを用いた冗長駆動 DELTA 型ロボットを試作し、高精度な力制御と高速化のための機械設計の考え方を示した。

ロボットの運動学式よりモータとロボット手先部の速度・力関係を計算し、金型磨きに必要とされる押し付け力と往復運動速度を発生しうることを数値計算にて示した。

インピーダンス制御を実装し、熟練作業者と同等磨き速度である 10m/min およびその倍の 20m/min にて安定した金型磨き動作を実現できることを検証した。

参 考 文 献

- [1] 三好隆志, “熟練技能の技術化・コンピュータ化—金型自動磨き作業を例に—”, 計測と制御, 37-7 (1998), pp. 459-464.
- [2] 永田寅臣ほか, “ボールエンド砥石のためのハイブリッド・モーション/力制御法の開発とペットボトル金型の磨きロボットへの適用実験”, 精密工学会誌, 70-1 (2004), pp. 59-64.
- [3] 藤原茂喜, 高野健, 末藤伸幸, “パラレルリンクロボットによる生産革新”, パナソニック技報, 58-4, (2013), pp. 39-44.
- [4] Corbel, D., Gouttefarde, M., Company, O., and Pierrot, F., “Towards 100G with PKM. Is actuation redundancy a good solution for pick-and-place?”, *Proc. IEEE ICRA*, (2010), pp. 4675 - 4682.
- [5] 原田 孝, 志賀裕之, “パラレルメカニズムを用いた金型磨きロボットの開発”, 精密工学会 2014 年度関西地方定期学術講演会論文集, (2014), pp. 72-73.
- [6] 原田 孝ほか, “スロットレス DD モータを用いた冗長駆動 DELTA 型パラレルロボットの開発”, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集(CD-R), (2013), S115011, 5 pages.