

# Abst

CAD/CAMシステムを用いた設計・製造工程において、各種NC工作機械の数値制御（NC）データを最終的に生成するための中間データとして、一般的にCLS（Cutter Location Source）データが使用されている。一般的なCLSデータには、主に切削工具の位置や向きを指定するためのGOTO文が含まれている。しかし、産業用ロボットやメカトロニクスシステムでは、エンドエフェクタやカメラシステム、ビジュアルフィードバックコントローラ、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）のようなAIシステムを扱うための特別な記述やカスタマイズされた記述は、このような標準化されたCLSデータではサポートされていない。

本論文では、このような生産ラインの自動化に必要な拡張機能に対応するために、デスクトップサイズの多関節ロボットのためのハイパーカッター・ロケーション・ソース（HCLS）データとその制御インターフェースを紹介する。HCLSデータには、グリッパー制御、関節選択、線形補間、カメラスナップショット制御、AIによる物体の姿勢推定、ピッキング対象物への接近のためのビジュアルフィードバック制御などの拡張数値コマンドを含めることができる。提案手法の有効性は、DOBOT Magicianと名付けられた4自由度の小型多関節ロボットを用いたピック&プレース実験により実証されました。

## 1. 緒言

多関節型やスカラ型の産業用ロボットは、多くの工業製品の生産ラインに導入されている。最近では、例えばPiotrとKrzysztofが発表したシステムでは、複数のロボットを用いた歯車の生産工程の自動化を物理的にシミュレーションすることができました。Avanzato氏は、大学の講義の一環として、MATLAB Robotics Systems ToolboxとDOBOT Magicianと名付けられたROS対応のロボットアームを使った実験演習を開発しました。ロボットを製造業で使用する場合、ティーチングデータの作成は、ティーチングペンダントを用いたオフラインでのロボットプログラミングが一般的である。プログラムによるオフライン制御も可能だが、ロボットメーカー固有の言語を使用しなければならず、汎用性に欠けることになる。

これらの問題に対処するために、ロボットアプリケーションを設計や製造プロセスで使用されるCAD/CAMシステムと統合する試みがなされている。例えば、JohannesとSigridは、Rhinoceros用のKUKA Robot Languageプラグインを開発し、製造業向けの商用3D CADソフトウェアとの親和性を高めた[Johannes-2011]。永田らは、ロボット言語を使わずに、一般的なCAD/CAMシステムで標準的に生成できるツールパスであるCLS（Cutter Location Source）データに応じてロボットを制御するシステムを提案している。PedroとNunoは、一般的な3次元CADパッケージ上で動作するCAD図面からロ

ボットをオフラインでプログラミングできるアプリケーションを提案しました。ロボット研削システムでは、Shenshunらが、NG NX3で作成したCNC G-Codeプログラムを、安川電機製ロボット用のMotomanプログラムに変換するシステムを開発しました。このように、CADシステムとのロボットインターフェースはある程度提供されているが、AIシステムやVF（Visual Feedback）コントローラとの連携はまだ確立されていないようである。

今回使用したデスクトップサイズの多関節ロボット「DOBOT Magician」を図でご紹介します。Table "magician\_param"はこのロボットの仕様を示しています。一般的な産業用ロボットの6自由度に比べ、4自由度しかありませんが、ユーザーフレンドリーなティーチングインターフェースと、キネマティクスやサーボ制御などの豊富なAPI機能を備えており、エンジニアがカスタマイズした新しいアプリケーションを開発できることが特徴です。筆者らは、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）とビジュアルフィードバック制御を応用して、DOBOTをベースとしたロボットシステムを開発し、ターゲットとなる記事の姿勢を考慮したピック&プレースタスクを実行した。このシステムでは、ロボットがテーブル上のワークを視覚的に認識し、ピックすることができます。しかし、MATLABで書かれた命令文は、作業内容の変更や修正に応じて書き換えなければならないという問題があります。そこで著者らは、オリジナルのティーチングデータに含まれるMOVJやMOVLなどの必須機能だけでなく、VF制御のためのVF\_CONTROLやカメラ制御のためのSNAPSHOTなど、新たに定義された高度なコマンドを記述することができるHCLS (Hyper Cutter Location Source) データを提案する。HCLSデータは、従来のティーチング&プレイバック型の産業用ロボットの機能や使い勝手を向上させることが期待されます。その効果を実験で示す。

## 2. スモールクリアランスでのピックアンドプレースタスクの予備実験

ここでは、ロボットの基本性能を評価するための予備実験として、クリアランスの小さいピック&プレースタスクを実施した。小型の産業用ロボットは、大手産業用ロボットメーカーから様々なものが提供されている。しかし、それらのロボットは非常に高価であり、中小規模の製造業が複数台購入することは容易ではない。本研究では、まず、研究室の学生9名による実験で、図のような卓上型4自由度ロボットの基本的なピックアンドプレース性能を評価しました。実際に実験を行ってみると、剛性の低さからくる振動の問題に悩まされることが多々ありました。特に、ワークを把持した状態で、アーム先端に取り付けられたグリッパーを左右または前方向に伸ばしきったときに発生します。

このような背景から、クリアランス0.7mmという小さな条件でのピック&プレース作業を通して、ロボットの実際の性能を評価する実験を行いました。図①は、プラスチック製の治具と円筒形の樹脂成形品で構成された例です。ジグには、直径8mmの穴が7mm間隔で10個並んでいる。成形品の直径は7.3mmです。

ティーチングの過程では、9人の学生が同じ種類の9台のロボットを使って個別にティーチングを行い、異なる9つのティーチングファイルを作成しました。ティーチングでは、ティーチングポイントを細かく設定するだけでなく、グリッパーの開閉の一時停止時間を調整しました。ティーチングには、深圳岳江科技有限公司が提供するDobotStudio-V1.9.4を使用しました。図①は、9人の学生が行ったピックアンドプレース実験の一例です。

実験の結果、9台のロボットは、それぞれのピック&プレース作業を数時間安定して続けることができたという。特に、成形品の穴への挿入は、軌道が直線から外れるMOVJではなく、直線的な動きをするMOVLを選択することで、スムーズに行うことができた。このように、低コスト・低剛性の卓上ロボットであっても、本項で紹介したようなピックアンドプレースタスクに適用できることが確認できた。

## 3. ハイパーカッターロケーションソース (HCLS) データの提案

### 3.1. HCLSデータについて

ここでは、HCLSデータの概念と、ロボットとのインターフェースについて説明します。HCLSデータは、VFコントローラ、欠陥検出や姿勢推定のためのCNNなどの有望な拡張機能をロボットに持たせ、実行させることができる。

前節では、DobotStudioという付属のティーチングソフトウェアを使って、ロボットを使った簡単なピックアンドプレースのタスクを紹介しましたが、このソフトウェアは図のような再生ファイルを生成することができます。再生ファイルは、テキストコードで構成されており、メモ帳などのテキストエディタで編集することができます。しかし、ファイルの構造上、改行コードが含まれていないため、ユーザーが内容や意味を素早く理解することは難しい。また、現段階では、DobotStudioは、ビジュアルフィードバックコントローラの実装や、CNN、SVMなどのAIなど、新たな高機能を求めるユーザーのニーズには対応していません。

本研究では、カメラのシャッタータイミング、ビジュアルフィードバック制御、Z軸やR軸などの単軸動作、各種CNNの利用など、表に示すような拡張機能や高度な機能に対応できる図のようなHCLSデータを提案している。従来の標準化されたCLSデータは、Creoなどの一般的なCAD/CAMシステムのメインプロセッサで生成されており、NC工作機械のツールパスに合わせて、直線補間のGOTOや円弧補間のCIRCLEなどの2つの主文が順次記述されている。一方、提案するHCLSデータでは、GOTO文の中に、さらに数値情報、すなわち、休止時間、グリッパーのオープン(1)またはクローズ(2)、モ

ーションモードがMOVJ(1)またはMOVL(2)のいずれかであることを追加することができる。例えば、DOBOT Magicianの場合、GOTO文は次のように書かれます。

$$GOTO\ x, y, z, r, 0.5, 1, 2$$

ここで、 $(x, y, z)$ はロボット絶対座標系での位置、 $r$ は $R$ 軸の回転角、0.5は休止時間、後続の1と2はそれぞれグリッパーオープンとMOVELの動作モードを意味します。

さらに、表に示すように、他のいくつかの高度なステートメントを含めることができる。例えば、ORIENTATIONはAPI関数であるregionprops( )を使って物体の向きを計算し、CNN\ORIENTATIONは事前に学習したCNNを使って物体の向きを推定し、VF\_CONTROLは実装したビジュアルフィードバックコントローラを起動して物体を追跡し、CNN\DEFECTはスナップショット画像に含まれる欠陥を検出する。

## 3.2. HCLSデータを用いたプレイバック実験

図①は、この小型卓上ロボットを操作するための、HCLSデータに基づく制御インターフェース、すなわち操作ダイアログを示しています。この制御インターフェースはMATLAB上で開発されており、サーボ制御や工具のオフセット長を考慮した運動学関連の計算には、ロボットメーカーが提供するAPI関数を使用しています。

冒頭の実験で作成した再生フォーマットのデータを、ダイアログを用いてHCLSデータに変換したところ、HCLSデータを用いて同じロボットのピックアッププレースタスクを成功させることができました。このことから、HCLSデータと開発した制御インターフェースは、提供されているロボットユーザーインターフェースDobotStudioと比較して、安定性と応答性の面で同等の性能を持つことが確認できました。

## 4. HCLSデータを用いた高度なステートメントによる実験

表2は、HCLSデータで利用可能なアドバンスドステートメントを含む。このセクションでは、VF\_CONTROL、OFFSET、CNN\_ORIENTATIONを使ったピックアッププレースの実験を紹介する。これらは、我々が開発したVFコントローラ、図5に示したグリッパと内視鏡カメラ間の工具オフセット補償器、CNNによるオリエンテーション推定器のステートメントである。

### 4.1. Visual feedback controller

VF制御は、グリッパーの近くに設置された解像度  $640 \times 480$  の小型内視鏡カメラ（オプション）を用いて行う。VF制御の概要を図に示します。この制御では、画像座標系における物体のCOGと、画像の中心位置との誤差がゼロになるように、エンドエフェクタの位置を制御することを目的としています。まず、背景の画素値を0、物体の画素値を1とした2値画像の場合、以下の式で算出したCOGの位置を求めます。

$$I_x = \frac{\sum_{x=1}^{640} \sum_{y=1}^{480} xP(x, y)}{\sum_{x=1}^{640} \sum_{y=1}^{480} P(x, y)} \quad (1)$$

$$I_y = \frac{\sum_{x=1}^{640} \sum_{y=1}^{480} yP(x, y)}{\sum_{x=1}^{640} \sum_{y=1}^{480} P(x, y)} \quad (2)$$

ここで、 $(x, y)$  は画像座標系における画素の位置、 $P(x, y)$  はその位置における画素値を表す。次に、カメラ座標系におけるCOG ( $\mathbf{I} = [I_x \ I_y]^T$ ) と図の中心 ( $\mathbf{x}_d = [\frac{640}{2} \ \frac{480}{2}]^T$ ) との誤差  $\mathbf{e}(k)$  は以下のように与えられます。

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{x}_d - \mathbf{I}(k) \quad (3)$$

ここで $k$ は離散時間である。なお、カメラ座標系とロボット座標系の関係は図のようになっている。この関係を考慮すると、PI制御則 $\mathbf{v} = [v_x \ v_y]^T$ は最終的に次のように与えられる。

$$v_x = -K_p e_x(k) - K_i \sum_{n=1}^k e_x(n) \quad (4)$$

$$v_y = -K_p e_y(k) - K_i \sum_{n=1}^k e_y(n) \quad (5)$$

## 4.2. 実験

VF\_CONTROLやCNN\_ORIENTATIONなどの高度なステートメントを含むHCLSデータを用いた実験を行い、その有効性と妥当性を実証しています。HCLSデータの詳細は図に示す。主な制御手順は以下の通りである。(1)グリッパーが初期位置に移動、(2)VF\_CONTROLにより内視鏡カメラが対象物の真上に接近、(3)CNN\_ORIENTATIONにより対象物の向きを推定、(4)推定された向きに応じてロボットの $R$ 軸を回転、(5)OFFSETによりグリッパーが対象物の真上に $(x, y)$ で移動、(6)グリッパーが開く、(7)グリッパーが $z = -33.0$ まで下がり、(8)グリッパーが閉じて対象物を取り、(9)最後に対象物を任意の位置に配置する。

この実験で使用されたCNNはGoogLeNetの転移学習によって構築されたものであることに注意してください。また、位置補償値 $(x, y)$ は、内視鏡とグリッパーの間のカメラオフセット距離 $Deltad$ を用

いて、次のように得られます。

$$x = \Delta d \cos(J_1) \quad (6)$$

$$y = \Delta d \sin(J_1) \quad (7)$$

ここで、43mmはこの実験では $\Delta d$ に設定されています。 $J_1$ は第1関節の角度です。

HCLSのデータを使った実験風景を図に示します。2種類の長方形のワークをピックし、長軸の正確な中心を把持しながら目的の位置に移動させることに成功した。VFの制御ゲイン $K_p$ と $K_I$ は、それぞれ0.1と0.01に設定した。

## 5. 結言

卓上型ロボットの基本的なティーチング&プレイバック機能を評価するために、まず、ロボットメーカーが提供するユーザーインターフェースを用いて、わずか0.7mm程度のクリアランスで樹脂成形品のピック&プレース実験を行い、ロボットが数時間にわたって安定して作業を続けられることを確認した。次に、MATLABで開発しているロボット用制御インターフェースの基本機能を評価しました。ティーチングされたデータ（再生ファイル）からHCLSデータを生成した後、HCLSデータを用いてロボットが同様に長時間の再生動作を実現した。今回提案したHCLSデータを用いた制御インターフェースの優れた点は、ビジュアルフィードバック制御、カメラ制御、CNNなど、様々な高度な記述が可能な拡張性にあります。

今後は、この小型ロボットと提案したHCLSデータに基づく制御インターフェースを、人手に頼っている欠陥検出や結果の分類を必要とする他のピックアンドプレース作業の自動化に応用する予定である。