

画像処理用ステートメントの記述が可能な HCLS データの提案と 小型産業用ロボットの機能高度化ニーズへの対応

松井 寛治† 永田 寅臣† 阿部 凌真† 加藤 博久† 池田 毅† 越智 裕章‡ 渡辺 桂吾§
†山口東京理科大学 ‡足利大学 §岡山大学
E-mail: nagata@rs.socu.ac.jp

1 はじめに

製造業にとっては新製品の開発に伴う生産ラインの自動化や省力化は継続的な課題であり、人手不足も深刻となる中、ロボット導入のニーズは益々高まっている。投資余力やロボットの利用技術が不足しがちな中小企業においては、これまでなかなか導入に踏み切れないといったケースがあったが、ロボットの小型化と低価格化、高度なプログラミング環境が整備されるなど導入できる環境が整ってきている。このような中、複雑な組み立てを伴う生産ラインでは複数のロボットのシーケンス制御、協調制御、画像処理、ビジュアルフィードバック (VF) 制御、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いた欠陥検出などの機能を統合的に、また、プログラマブルに利用できる利用環境へのニーズが高まってきている。

筆者らは、システム構築にかかるコスト削減の観点から、PLC (Programmable Logic Controller) を用いることなく 1 台の PC で複数のロボットを管理、制御するための制御アプリケーションを開発してきた [1, 2]。提案する Hyper CLS (Cutter Location Source) データ内に記述できる TCP/IP 通信、オブジェクト検出のための VF 制御、オブジェクトの特徴抽出のための CNN などの機能を利用することで、1 台の PC で複数のロボットによるシーケンス制御や協調制御を実現している。今回は、ロボットのカスタマイズによる高機能化を支援するために、エンドスコープカメラからの画像を使った VF 制御機能と CNN による画像内の特徴抽出機能などの実装とその有用性について報告する。

2 内容

今回は国内の製造メーカーから小型産業用多関節ロボット DOBOT MG400 や Magician を自社の製造ラインの自動化に適用したいという要望があり、まずは課題の抽出と解決策の検討を行ってきた。ユーザにはロボットの利用環境としてメーカーが開発したソフトウェア (Studio) が提供されており、ティーチングプレイバック (教示再生)、Script (言語編集)、DobotBlockly (図による言語編集) といった機能を利用できる。しかしながら Studio を用いた場合や、ユーザ側でのアプリケーション開発のために公開されている Dynamic Linking Library (DLL) を使った場合には 1 つのアプリケーションから 1 台のロボットしか動かすことができず、複数ロボットによるシーケンス動作や協調動作には直接応用できないという問題があった。また、VF 制御の機能やユーザ側で構築した CNN の実装などはそのしくみを含めて提供されていない状況にあった。

これら課題を解決するため、まず、MATLAB や

Python 環境下で実行できる一つのアプリケーションが TCP/IP 通信により複数のロボットとコネクションを確立し、それぞれを独立に制御できるようにすることでタイミングを考慮したシーケンス制御や協調動作の機能を実現した。次に、NC 工作機械の Cutter Location Source (CLS) データのようにユーザ側で統一的に利用できる表 1 のような Hyper CLS (HCLS) データを提案するとともに、それぞれのステートメントを実行するためのプログラムコードを実装してきた。HCLS データは、GOTO ステートメントを先頭に持つ行内に XYZ 座標値、グリッパの回転角度である R 値に続き、ウェイト時間を指定する PAUSE、グリッパのオープンとクローズを指定する GRIPPER、リンク補間用の MOVJ 指令あるいは直線補間用の MOVL 指令を指定する数値情報を記述できるようにしている。また、基本ステートメントである GOTO 文に加えて、VF 制御によりオブジェクトの重心位置にグリッパを移動させる VF_CONTROL、CNN により画像に含まれる欠陥などの特徴を検出できる CNN_DEFECT などの拡張用ステートメントを含ませることができるようにしている。

今回は、VF 制御のための VF_CONTROL、オブジェクトの姿勢を検出する CNN_ORIENTATION、オブジェクトの特徴を抽出する CNN_DEFECT の各ステートメントについて述べた後、それらを組み合わせることでオブジェクトの特徴に基づくピックアンドプレース動作や、複数ロボットによるシーケンス動作、協調動作を簡単に記述し、実行できることを示す。

2.1 TCP/IP プロトコルを用いた複数の MG400 の制御

前節で紹介した DLL を用いた場合、HCLS データ内で利用できるハンドシェイク通信用 SET と GET ステートメントによるシーケンス制御は可能になったものの、複数のロボットをほぼ同時に動作させるなどの協調制御は困難であった。また、1 台の PC 上とはいえ、ロボットの台数に応じて MATLAB アプリを複数起動しなければならないことも実用上の課題となった。この課題を解決するために、公開されている TCP/IP プロトコルベースの API [3] を用いた MATLAB アプリケーションを開発した。TCP/IP プロトコルを用いることで、図 1 に示す一つのアプリケーションの中で複数のロボットとの高速通信や、ブロードキャストによる複数ロボットの同期制御が可能になった。なお、ここでの同期制御は目視上同時に動いている程度の精度であり、60 fps のビデオのフレーム解析の結果、16.7 msec 毎フレーム画像内に各ロボット間の動作の遅れなどは見受けられなかった。

Table 1 Examples of the proposed HCLS statements available for MG400 manipulator.

Absolute	Header of HCLS
GOTO/x,y,z,r,0,0,1	Go to a position
SNAPSHOT	Take a photo using a camera
ORIENTATION	Pose estimation by image processing
CNN_ORIENTATION	Pose estimation using CNN
VF_CONTROL	Visual feedback control
CNN_DEFECT	Defect detection or feature extraction using CNN
GRIPPER_DISABLE	Gripper power off
GRIPPER_OPEN	Gripper open
GRIPPER_CLOSE	Gripper close
PAUSE	Wait a pause time as 'PAUSE 2'
MOVZ	Z-directional motion as 'MOVZ 10'
GET	Wait a number from a MG400 as 'GET 10'
SET	Sent a number to a MG400 as 'SET 10'
SPEED	Set motion rate [%] as 'SPEED 50'
OFFSET	Camera offset in x -direction
GRIPPER_SUCK	Sucking using a suction cup
GRIPPER_BLOW	Blowing using a suction cup
R	Tool, e.g., gripper rotation angle [degree] as 'R 45'
DO 12 1	Set DO port No. 12 to 1 (ON)
DO 5 0	Set DO port No. 5 to 0 (OFF)
GRIPPER_OPEN	Electromagnetic gripper open
GRIPPER_CLOSE	Electromagnetic gripper close
LOOP_START	Repeating from next statement to LOOP_END as 'LOOP_START 3' for 3 times
LOOP_END	End position of LOOP_START
SNAPSHOT_DIFF 3000 2	SNAPSHOT, e.g., in 2 seconds after an area consisting of 3000 pixels changed

2.2 VF制御用のVF_CONTROL

ここではピックアンドプレースロボットを実現するためのビジュアルフィードバック (VF) 制御について述べる。HCLS データ内に VF_CONTROL を記述することで、カメラシーン内のワーク重心位置にエンドエフェクタを移動させることができる。VF 制御は、DOBOT のエンドエフェクタ付近に新たに装着した小型のエンドスコープカメラを用いて行う。本制御の目標は、図2のようにカメラで撮影した画像の中心座標 \mathbf{X}_d とオブジェクトの重心位置座標 $\mathbf{I}(k)$ との偏差が0になるようエンドエフェクタの位置を制御することであり、カメラ座標系での偏差 $\mathbf{e}(k) = [e_x(k) \ e_y(k)]^T$ は次式で計算される。

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{X}_d - \mathbf{I}(k) \quad (1)$$

ここで、 k は離散時刻であり、 $\mathbf{X}_d = (\frac{x_r}{2}, \frac{y_r}{2})$ はカメラ座標系の中心座標である。この偏差 $\mathbf{e}(k)$ をもとに、エンドエフェクタの速度 $\mathbf{v}(k) = [v_x(k) \ v_y(k)]^T$ を操作量とし、図3の座標系を考慮すると次式のようなPI制御則を適用できる。

$$v_x(k) = -K_p e_y(k) - K_i \sum_{n=1}^k e_y(n) \quad (2)$$

$$v_y(k) = -K_p e_x(k) - K_i \sum_{n=1}^k e_x(n) \quad (3)$$

ここで、 K_p と K_i はそれぞれ P 制御と I 制御のゲインである。これによりカメラ座標系とロボット座標系のキャリブレーションを行くことなく、画像の中心位置と

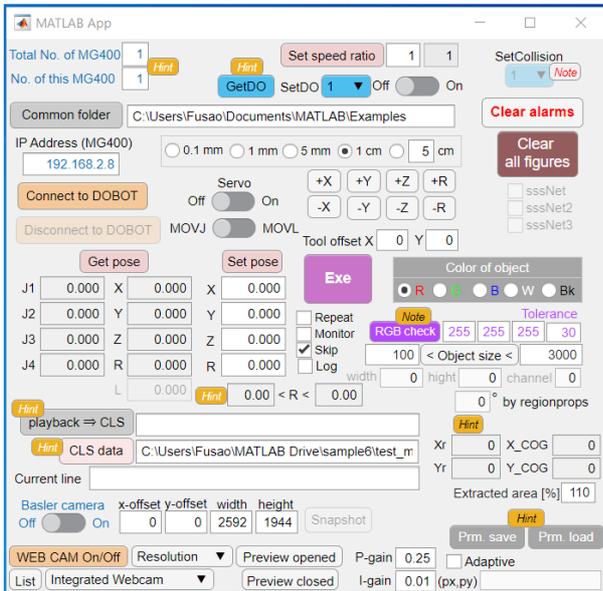


Figure 1 HCLS data-based MATLAB application to cooperatively control multiple robots, in which visual feedback controller for object detection and CNN for classification can be executed.

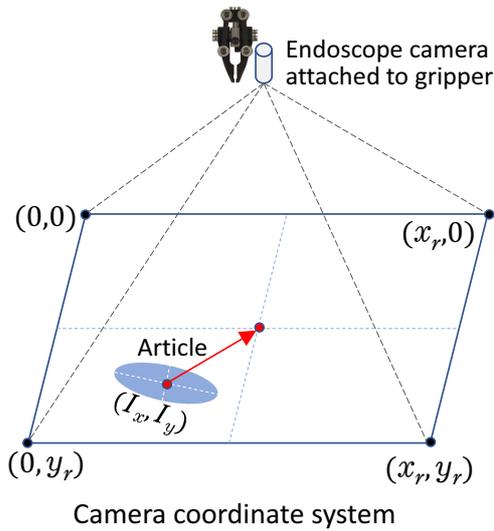


Figure 2 Relation between camera coordinate system and robot coordinate system, in which position of endoscope camera in camera coordinate system is controlled so that I and X_d are overlapped. Consequently, gripper can be positioned just above the object.

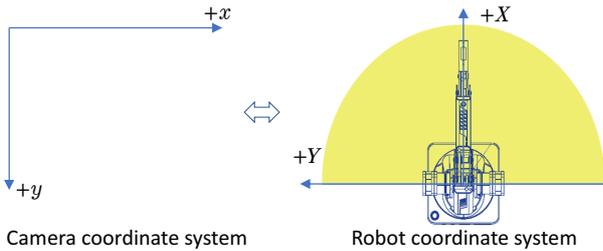


Figure 3 Relation between camera coordinate system and robot coordinate system. Note that directions of axes are different each other.

オブジェクトの重心位置が重なるようにエンドエフェクタの位置を制御できるようになった。なお、この時点ではカメラがオブジェクトの真上にある状態なので、エンドエフェクタの先端がオブジェクトの真上に来るようにするには、エンドスコープカメラの中心位置からエンドエフェクタの中心位置までのオフセット分だけの距離をテーブルに対して平行移動させればよい。今回の実験ではオフセット値を実測した結果、図4のように40 mm程度であった。

本節で紹介した VF_CONTROL ステートメントを HCLS データ内に記述することでエンドエフェクタを目標オブジェクト上部まで移動させることができるようになった。

2.3 ワークの姿勢を検出する CNN_ORIENTATION ステートメント

MATLAB 環境でも利用可能な regionprops 関数を用いれば画像領域のプロパティの計測から検出されたオブジェクトの姿勢が推定できるが、ここでは HCLS データ内に CNN_ORIENTATION ステートメントを記述することで事前に訓練された姿勢推定用の CNN を呼

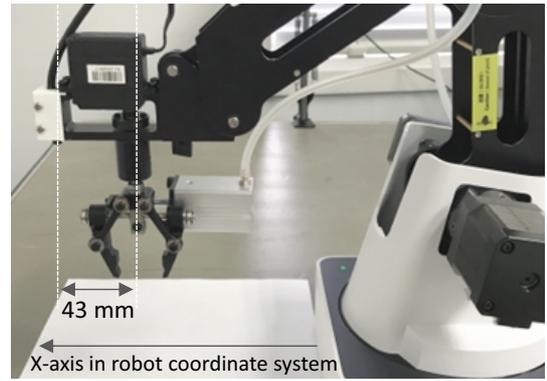
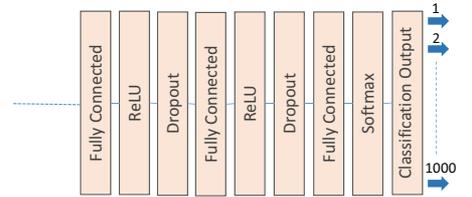


Figure 4 Camera offset (43, 0, 0) between the endoscope camera and the gripper.

Original AlexNet



Transferred CNN

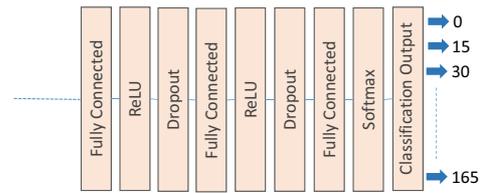


Figure 5 Replacement of fully connected layers for dealing with the target classification task, i.e., 12 categories.

び出せるようにしている。今回は転移学習により CNN モデルを構築している。

転移学習については、新たな CNN の設計の容易さと訓練時間の大幅な短縮などの効果から、様々な課題に対する応用が広まっている。既に紹介している CNN 設計 & 訓練ツール [4] でも転移学習の利用環境を提供している。例として、これまでに応用例の多い AlexNet の転移学習を用いてワークの姿勢情報を検出し、ピックアンドプレースロボットの把持ツールの目標角度に用いるシステムに利用している。CNN の設計時には図5のように15°の分解能で0°から165°までの姿勢情報を出力できるように最後の全結合層を置き換えている。図6には、45°の姿勢情報を学習させるために用いた訓練データの一部を示す。

訓練後の汎化性を評価するために、図7のようなテスト画像を分類したところ、図内の数値のような結果が得られた。訓練に用いた画像は全て解像度が200×200の正方形であったため、転移学習用に設計したCNNに与える前にはその入力層に合わせて227×227の解像度に拡大している。一方、テスト画像には縦横比の異なる、すなわち様々なアスペクト比を持つ画像が含まれており、転移学習で得られたCNNの入力層に合わせて

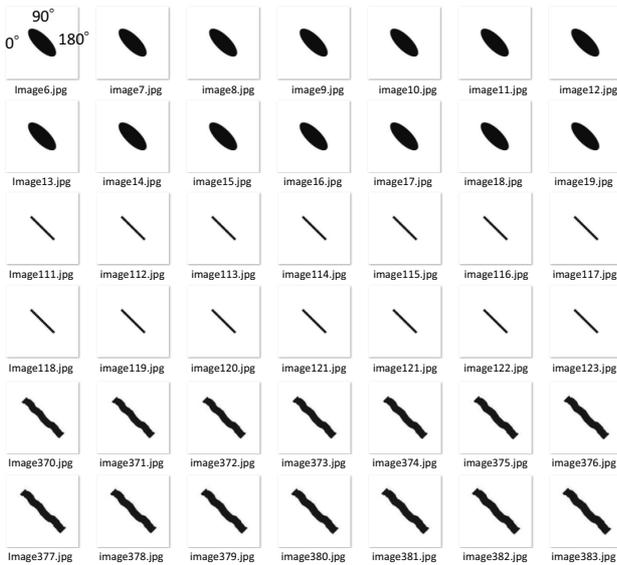


Figure 6 Examples of training images for the orientation of 45°.

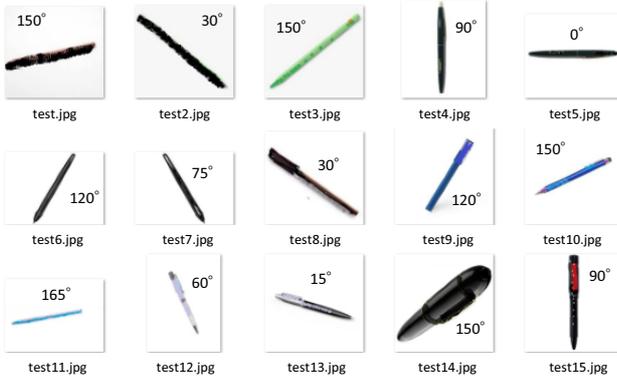


Figure 7 Classification results of test images using the transfer learning based CNN.

227×227 の解像度に調整して与えられたため、test.jpg と test3.jpg のように同じ分類結果でも元画像に含まれるオブジェクトの姿勢が大きく異なっている場合があった。テスト画像を正方形で抽出することでこの問題点は解決できるものと思われる。なお、このような転移学習ベースの CNN を欠陥検出システムに応用する場合は CNN の最後の全結合層部を 2 クラス分類用に置き換えればよい。

AlexNet や VGG19 などの転移学習により新たな CNN を設計する場合の課題としては、入力画像のサイズを転移される CNN の入力層に合わせる必要があることである。このため、解像度の高い画像を収集していたとしても 227×227 のようなサイズにダウンサイジングされた後に CNN に入力されるため、微小な特徴が失われてしまう恐れがあり、注意を要する。

ここで紹介した CNN モデルは、HCLS データ内の CNN_ORIENTATION ステートメントによりメモリ上にロードされ、ロボットが画像内の姿勢の特徴を抽出する際に利用できる。図 8 は適用例であり、スライダ上に搭載した Magician は左右に連続移動しながら VF_CONTROL によりオブジェクトを探索し、検

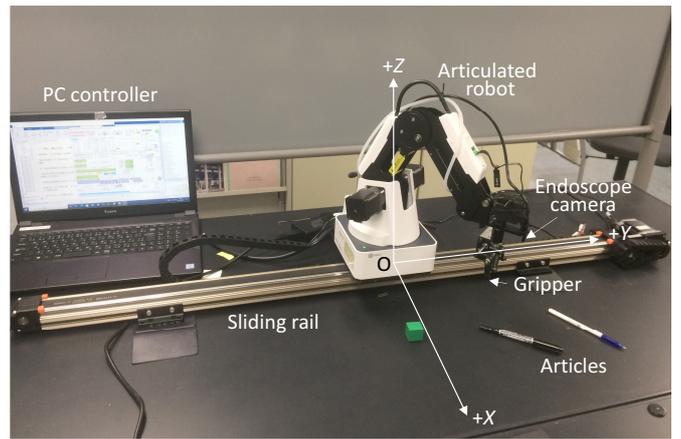


Figure 8 DOBOT Magician extended using a slider rail for picking articles with arbitrary orientation.

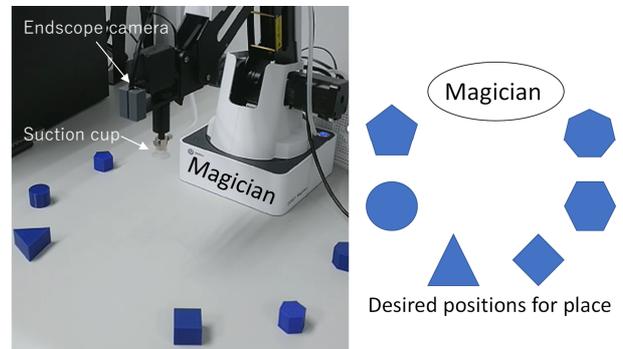


Figure 9 Picking and placing scene using a suction cup type end-effector, in which a CNN model for shape estimation is loaded.

出後にオブジェクト上方にグリッパを移動させた後、CNN_ORIENTATION によりその姿勢を推定している。その後、姿勢推定値をもとに掴みやすいヨー角にグリッパを回転させ、スムーズなピックアップを実現している。

2.4 ワークの欠陥などの特徴を検出する CNN_DEFECT

欠陥検出や特徴抽出など様々な用途で構築した CNN モデルは、HCLS データ内の CNN_DEFECT ステートメントにより実行することができる。図 9 は提案システムの適用の容易さを確認するために、研究室の学生が取り組んだピックアップ実験の例である。ここでは、3D プリンターを用いて 6 カテゴリに分類可能な単純な形状のモデルを作成し、写真を撮影することで訓練データを準備した後、15 層程度の簡単な形状認識用 CNN モデルに学習させた。ロボットが HCLS データに基づき動作実行中に CNN_DEFECT ステートメントに到達するとエンドスコープカメラで写真撮影後にこの CNN モデルで分類できるようにしている。HCLS データ内に CNN_DEFECT ステートメントを加えることで、図 8 のグリッパをサクシオンカップに取り替えたロボットは、テーブル上に投げられた 6 種類の形状のワークをそれぞれ所定の位置までピックアップとプレッシングできていた。

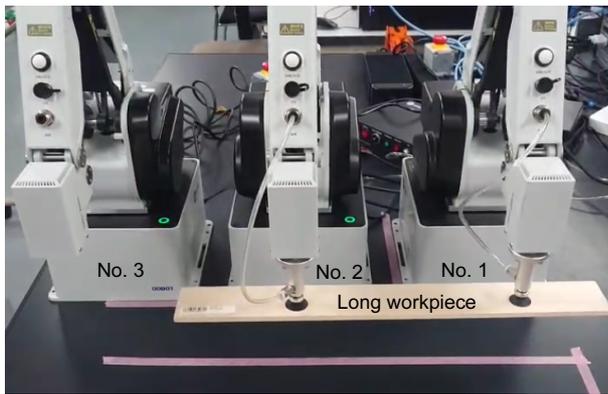


Figure 10 Robotic cooperative control application using multiple MG400s.

2.5 複数ロボットを同期させた協調制御

このほか、SNAPSHOT_DIFF 3000 2 のようなステートメントを用いるとカメラシーン内で指定したピクセル数 (3000 ポイント) 以上の変化があり、さらにその後指定した時間 (2 秒) だけ変化がなかった場合に次の処理に進めるような動作を可能にしている。この機能により、例えば、図 10 のように待機している複数のロボットの前に大きなワークが置かれた場合に、一定時間経過後にそれぞれが同期した協調制御によるピッキングやプレーシングを行うような作業にも適用可能となった。

3 結果

システム構築にかかるコスト削減と、拡張性、操作性およびカスタマイズ性向上の観点から PLC などを用いることなく 1 台の PC で複数のロボットを管理、制御できるように Hyper CLS (Cutter Location Source) データをベースとした制御アプリケーションを紹介した。提案する HCLS データ内に記述できる TCP/IP 通信、オブジェクト検出のための VF 制御、オブジェクトの特徴抽出のための CNN などの機能を組み合わせて用いることで、1 台の PC による複数のロボットのシーケンス制御や同期制御によるカスタマイズを実現した。

今後は、実際に製造ラインを流れる工業製品のピッキングから、CNN による欠陥検出、欠陥の有無によりそれぞれのロットへプレーシングを行う工程への適用実験を行い、画像処理用ステートメントの記述が可能な HCLS データをベースとした複数ロボットシステムの有用性の評価を行う予定である。

References

- [1] 三木康平, 永田寅臣, 古田 慧, 有馬滉宜, 清水竜樹, 加藤博久, 渡辺桂吾, “デスクトップ型多関節ロボットのための制御インタフェースの開発 - Hyper CLS データの提案と基本機能の実装 -”, 第 39 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2D1-02, 3 pages, 2021.
- [2] 阿部凌真, 永田寅臣, 寺崎大貴, 加藤博久, 渡辺桂吾, “小型産業用ロボットの機能拡張と操作環境改善のための Hyper CLS データの提案 -複数ロボットのシーケンス制御のための HCLS ステ

トメント”, 第 40 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 4C3-06, 3 pages, 2022.

- [3] <https://github.com/Dobot-Arm/TCP-IP-Protocol/blob/master/README-EN.md>
- [4] 永田寅臣, 渡辺桂吾, “畳み込みニューラルネットワーク (CNN)・畳み込みオートエンコーダ (CAE)・サポートベクタマシン (SVM) のための設計支援ツールの開発”, 画像ラボ, Vol. 32, No. 12, pp. 20-26, 2021.