

ロボットを介したスイッチ遠隔操作支援システムの開発

宮島 沙織, 浦池 隆文, 井川 久, 高木 友史, 川島 圭太, 吉田 道拓

Development of a Support System for Remote Switch Operation with Robots

Saori MIYAJIMA, Takafumi URAIKE, Hisashi IGAWA,
Tomohito TAKAGI, Keita KAWASHIMA, Michihiro YOSHIDA

抄 録

全国的に深刻化している人手不足の対策として、ロボットを活用した作業の自動化や遠隔化などが挙げられる。しかし、たとえばカメラ映像を観ながらロボットを遠隔操作する場合、操作盤のスイッチを押すだけのような単純な作業でも、二次元のカメラ映像のみではロボットの手先とスイッチとの正確な距離感が把握できない。そのため、操作に習熟が必要であるなどの課題がある。

そこで本研究では、遠隔地からロボットを介してスイッチの操作を直感的に行えるような遠隔操作支援システムを開発した。開発したシステムは、スイッチを操作するロボット動作の生成技術と、ユーザが直感的にロボットに対してスイッチ操作の指示を与えることができるユーザインタフェース技術で構成される。本システムを用いて人協働ロボットを動作させる検証を行った結果、押しボタン・ロッカースイッチ・非常停止ボタンの操作が可能であることを確認した。

キーワード：ロボットビジョン, 三次元点群処理, 物体検出, ロボットマニピュレーション

Abstract

Automation of work using robots is one way to counter the labor shortage, which is becoming increasingly serious in Japan. However, when a robot is operated remotely through camera footage, even simple tasks such as pressing a switch are hard to perform because it is difficult to estimate the distance or requires training the operation.

In this research, we developed a support system for remote operation that allows users to intuitively operate switches on the equipment from a remote location using robots. The developed system consists of a technology for generating switch operation actions by a robot and a user interface. We verified the system by operating a collaborative robot using the developed system and confirmed that it was possible to operate push buttons, rocker switches, and emergency stop buttons.

KEY-WORDS : Robot vision, 3D Point cloud analysis, Object detection, Robotic manipulation

1. はじめに

人手不足の解消や作業者の負担軽減のため、ロボットを活用した作業の自動化や遠隔化が注目されている。すでにロボットは物体の運搬や移載などに活用されているが、省人化を推進するには、より多様な作業への適用が求められる。本研究では汎用的な作業として機器の操作、具体的には機器に設置されているスイッチの操作に着目し、ロボットを用いたスイッチの遠隔操作技術の開発を目的とする。

作業を遠隔地から行う場合、作業現場に設置されているカメラの映像を見ながらロボットを操作することが想定されるが、二次元のカメラ映像を通してロボットと操作対象物との位置関係を正確に把握するのは困難であり、そのためロボット操作には習熟が必要となる。そこで本研究では、ユーザがロボットを直接操作するのではなく、ユーザが選択したスイッチを、ロボットに自動的に操作させるための技術を開発した。具体的には、スイッチを操作するロボット動作の生成技術¹⁾と、遠隔地にいるユーザがカメラ映像を通して操作したいスイッチを直感的に確認・選択できるユーザインタフェースを開発した。

スイッチの自動操作を可能としたロボットに関する先行研究としては、巡回ロボットへの適用を目的とし、深層学習を用いてエレベーターのボタンを認識して自動で操作する手法が開発されている²⁾。しかし、この研究ではエレベーターの押しボタンのみが対象であり、ロッカースイッチやトグルスイッチなど他の様々なスイッチの操作は対象としていない。また、Wangらが開発したロボット³⁾は様々な種類のスイッチを操作できるが、操作対象とする全てのスイッチについて操作に必要なパラメータを個別に登録しておく必要があるため、未登録のスイッチは操作できない。

本研究では、事前の操作パラメータ登録を必要とせず、様々な種類のスイッチを自律的に操作するため、次の手順に従ってスイッチを操作するロボット動作の生成を行う。

1. RGB-Dカメラを用いて装置等のRGB画像と三次元点群を取得する
2. 深層学習による物体検出を用いて、RGB画像から装置等に設置されているスイッチの種類と位置を検出する
3. 検出結果からユーザが操作したいスイッチを選択する
4. 三次元点群から取得した情報を基に、選択されたスイッチを操作するロボット動作を生成する

なお、装置を撮影するRGB-Dカメラはロボットの手先に取り付けられていると想定する。次章より、詳細な手法と成果について述べる。

2. 深層学習によるスイッチの検出

2.1 検出対象スイッチの定義

スイッチとは、機械的に電気信号を切り替えることができる装置全般を指す。装置等に使用されているスイッチはJIS C4256において規格が定義されている。そのうち、本研究では以下の2点に当てはまるスイッチを操作対象とした。

- ・人の手指によって操作されるもの
- ・操作部が壁や装置に固定されているもの

したがって、操作部が固定されていない引きひもスイッチや足で踏むフットスイッチ、握ることでオンになるグリップスイッチ等は対象外とした。

前述の項目に当てはまるスイッチについて、操作方法や外観に基づき10クラスに分類し、深層学習による検出対象とした。さらに、各スイッチを操作する動作を次の3通りで定義した。

- ・垂直に押す動作
- ・平行に押す動作
- ・回転させる動作

分類した10クラスのスイッチについて、画像例と操作部の概要図を図1に示す。概要図には、そのスイッチの操作動作を矢印で示している。



図1 検出対象のスイッチと操作部の概要

2.2 データセットの作成とスイッチの検出

装置等のRGB画像からスイッチの種類と位置を検出するため、独自のデータセットを作成し、深層学習による物体検出アルゴリズムYOLOv5⁴⁾に転移学習を適用することでスイッチ検出モデルを作成した。

作成したデータセットは、工作機器や医療機器、家電機器など様々な装置や電気機器類のスイッチ画像844枚から構成され、各画像にはスイッチの位置を示す矩形領域とスイッチの種類を示すラベルの情報を付与した。ラベルは図1に示した10種類に、スイッチと類似した外見を持つ「ランプ」と「鍵穴」を加えた12種類である。

データセットを訓練用画像657枚、検証用画像187枚に分割し、バッチサイズ16、エポック数300としてYOLOv5sモデルの転移学習を行った。学習後のスイッチ検出モデルの精度を検証するため、データセットに含まれない94枚の画像を用いてスイッチの検出を行った。検証によって得られたクラス別の検出精度を図2のグラフに示す。また、検出結果の例を図3に示す。検出精度の指標としてはAverage Precision⁵⁾(以下AP)を使用した。グラフより、キースイッチとスライダを除く8種類のスイッチについてはAP>0.7と7割以上の精度で検出された。本研究では検出結果を受けて人間が操作するスイッチを選択するため、8種類のスイッチについては十分な精度が得られたと考えられる。

一方、キースイッチのAPが0.16、スライダのAPが0.55と、検出精度が低い結果となった。これは、データセットに含まれるキースイッチの画像が不足していること、同じクラスのスイッチでもデザインや形状など外見のばらつきがあることなどが原因と考えられる。使用したデータセットのクラス内訳を図4に示す。これらのスイッチの検出精度を向上するためには、学習データの追加や、データ加工・拡張による学習データの増強が必要である。

3. スイッチ操作動作の生成

3.1 操作動作の構成要素

2.1節で述べた3種類のスイッチ操作動作のうち、本研究では直線的な動作である「垂直に押す動作」の生成に取り組んだ。この動作は次の3つの要素から構成されると仮定し、各要素を取得する手法を提案する。

- ・押す位置
- ・押す方向
- ・押し動作の終了条件

押す位置と押す方向を求める手法については、次節以降で述べる。押し動作の終了条件として、本研究ではスイッチを押している際にロボットの手先に作用するスイッチからの反力をロボットに内蔵された力センサで計測し、反力が閾値を超えた場合に押し動作を終了するとした。

3.2 押す位置の取得

取得した三次元点群とスイッチ検出モデルによってRGB画像から検出したスイッチの位置(矩形領域)を用いて、スイッチを押す位置を取得する方法について述べる。

垂直に押す動作によって操作される押しボタン、タッチパネルボタン、非常停止ボタン、ロッカースイッチの4種類のうち、ロッカースイッチ以外の3種類はどの位置を押しても操作可能であるため、検出されたスイッチの位置を示す矩形領域の中心点を押す位置と設定した。

一方、ロッカースイッチは図1に示すように操作部がシー

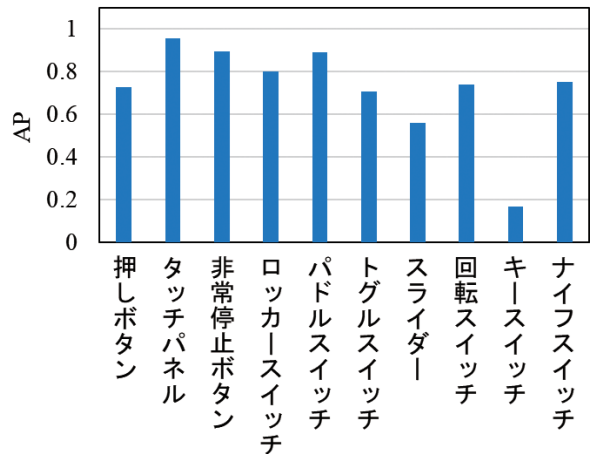


図2 種類別のスイッチ検出精度 (AP)

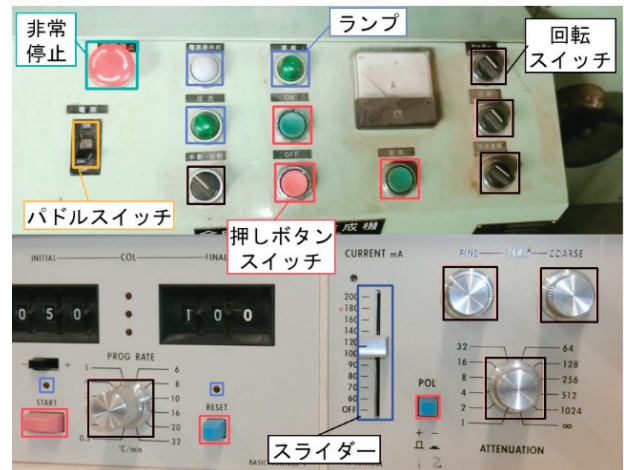


図3 検出したスイッチの位置(矩形)とラベルの例

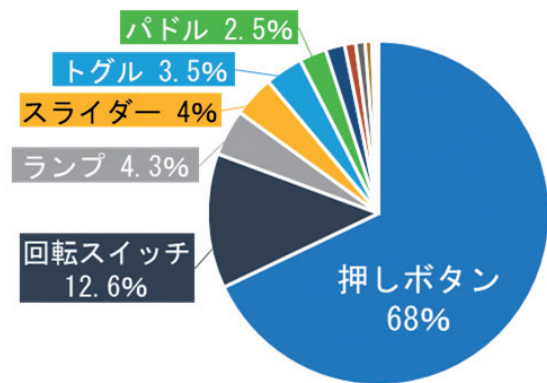


図4 データセットに含まれるスイッチの内訳

ソーのように傾いており、立ち上がっている片側を押す必要がある。そこで、矩形領域を長辺の二等分線で分割し、各領域に含まれる三次元点群の高さの平均値を比較することで、立ち上がっている片側を識別した。この識別された片側領域の中心点を押す位置と設定した。

3.3 押す方向の取得

次に、押す方向を取得する方法について述べる。押す方向を取得する最も単純な方法は、スイッチ検出モデルによって検出された矩形領域内の点群を抽出して法線方向を求める方法である。しかし、スイッチには操作部が半透明のもの、光沢があるものなど、点群に欠けが生じやすいものが多く存在する。そこで、スイッチは装置等の平面上に設置されていると仮定し、矩形領域内の点群のみではなく設置面内の点群全てを使用して平面推定を行い、その設置面の法線方向を、スイッチを押す方向とした。具体的には、次の手順によって押す方向を求めた。

1. 取得した全点群に対し Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN)⁶⁾ を適用してクラスタリングを行い、スイッチと設置面の両方が含まれる点群クラスタを取得する
2. 取得した点群クラスタについて Random Sample Consensus (RANSAC) を適用し、近似平面と平面の法線ベクトルを算出する

3.4 押す位置と方向の取得試行

前述の手法を用いて、実際のスイッチに対する押す位置と押す方向の取得を試行した。試行には図5に示す複数種類のスイッチを取り付けた樹脂パネルを使用した。押す位置と押す方向の取得結果を、RGB-Dカメラで取得した点群とあわせて図6に示す。図内の矢印は押す方向を表している。

押しボタンと非常停止ボタンについては、設定したとおりにスイッチの中心を垂直に押す矢印が描画されている。加えて、パネルに設置された4個全てのロッカースイッチに対し、立ち上がっている片側を押す位置とした矢印が描画されており、提案した手法で押す位置と押す方向の取得が可能であることが確認された。

3.5 ロボット動作の生成

まず、ロボットの手先に取り付けられたRGB-Dカメラを用いて操作対象の装置を撮影し、RGB画像と点群を取得する。この時のロボットの手先位置を撮影位置と呼称する。次に3.2節・3.3節の手法を用いて押す位置と押す方向を取得し、押す位置から押す方向と逆向きに10mm離れた位置を初期位置とする。

また、ロボットの手先に作用するスイッチからの反力を F 、押し動作を終了する手先反力の閾値を \hat{F} として、スイッチを操作するロボット動作を次の手順にて設定した。

1. ロボットの手先を初期位置に移動
2. 手先反力 $F \leq \hat{F}$ の間、押す方向にロボットの手先を移動し続ける
3. 手先反力 $F > \hat{F}$ の時、ロボットの手先を初期位置に戻す

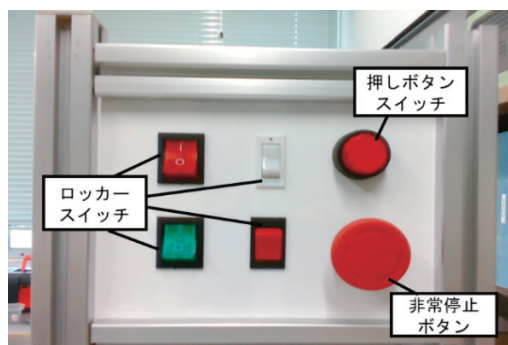


図5 試行に使用した樹脂パネル

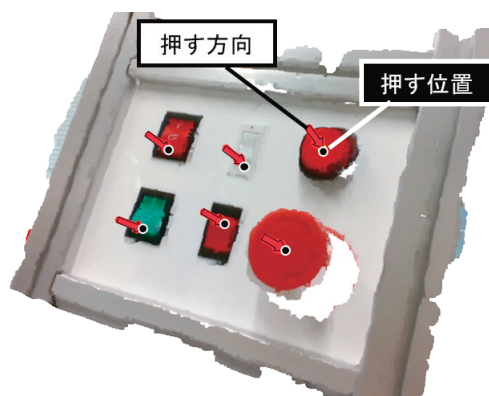


図6 取得した押す位置と押す方向 (矢印として描画)

4. ロボットの手先を撮影位置に戻す

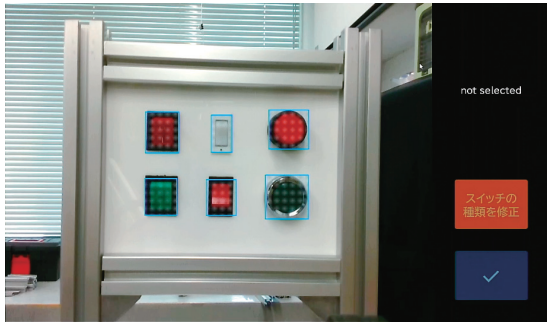
上記の手順により、スイッチがロボットの可動範囲内に存在する限りスイッチを押す動作の生成が可能である。

4. ユーザインタフェースの作成

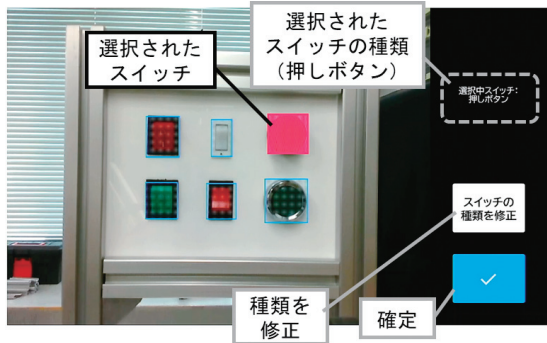
遠隔地から簡便に、操作対象となるスイッチをロボットに指示するためのユーザインタフェース(以下UI)を作成した。UIはスイッチを選択する画面、ロボットの動作を確認する画面の2つで構成した。タッチ操作のみで直感的に操作できるように、作成にはPythonのtkinterというグラフィックユーザインタフェースツールキットを使用した。

作成したUIの画面遷移を図7に示す。スイッチを選択する画面は図7(1)と(2)である。本画面では撮影したRGB画像上に検出したスイッチの矩形領域を重畳表示し、矩形領域をタッチすることでスイッチの選択ができるよう設定した。図7(1)の画面でスイッチをタッチ選択すると、図7(2)のようにUIの右上に選択されたスイッチのクラス名が表示される。万が一クラス分類に誤りがある場合は、クラス名表示の下の「スイッチの種類を修正」ボタンを押すことでクラスを再設定できる。選択した内容に問題がなければUIの右下にある確定ボタンを押し、操作するスイッチを確定する。

操作対象を確定すると、図7(3)に示すロボット動作を確



(1) スイッチ選択前画面 (RGB-Dカメラ画像)



(2) スイッチ選択後画面 (RGB-Dカメラ画像)



(3) ロボット動作中の様子 (ロボット動作確認用カメラ画像)

図7 作成したUIの画面遷移

認する画面が表示される。本画面では、図7(2)まで表示していたRGB-Dカメラの画像を、ロボット動作確認用カメラの映像に切り替えて表示している。このカメラは図8に示すようにロボットハンドの先端が写るようロボットの手に設置しており、選択したスイッチが想定どおりに操作されたかを確認できる。加えてUIの右下にはロボットを停止させる丸型のボタンを配置し、不具合が生じた場合はスイッチ操作を中断し、ロボットの手先を前述の撮影位置に戻すことが可能である。また、画像上には「ロボット動作を生成しています」「操作中です」等のメッセージを表示させ、作業状況を把握できるようにした。

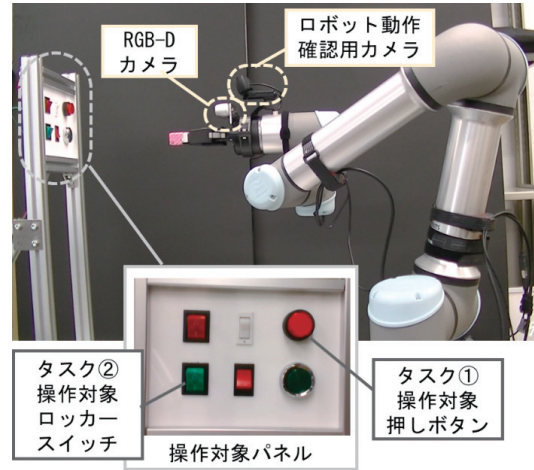


図8 実験環境と使用した機器類

5. 人協働ロボットへの実装とユーザによる操作試行実験

5.1 実験の概要

開発したスイッチ操作動作の生成技術とUIを使用し、ロボットを介して指定されたスイッチを遠隔操作する実験を行った。

スイッチの操作には人協働ロボット (UR5e・Universal Robot社製) を使用した。ロボットの手先には電動グリッパ (2F-85・ROBOTIQ社製) を取り付け、閉じたグリッパの先端でスイッチを押すようにした。また、RGB画像と三次元点群の取得にはRGB-Dカメラ (RealsenseD435・Intel社製) を使用し、ロボット動作確認用カメラとしてウェブカメラ (C1000eR・Logicool社製) を使用した。加えて、操作対象のスイッチは樹脂製の操作対象パネルに設置した。使用した機器と操作対象のスイッチを図8に示す。

本実験は30代から50代の男性4名・女性3名の計7名の被験者を対象に行った。被験者にはUIを操作して以下2つのタスクを個別に実施してもらった。

- ・タスク①：右上の赤い押しボタンを操作する
- ・タスク②：左下の緑色のロッカースイッチを操作する

被験者は「開始してください」の指示を受けてUIの操作を開始し、指示されたスイッチを選択して確定ボタンを押す。その後、操作が終了したと被験者が感じた時に「終了しました」と申告してもらうこととした。加えて、タスク終了後にヒアリングを実施し、UIの使いやすさ等を調査した。

5.2 実験結果と考察

実験の結果、全被験者がタスク①・②ともに実施に成功した。タスクの実施にかかった作業時間を、開始の合図から被験者による終了の申告までとすると、タスク①の作業時間は平均で33秒、タスク②の作業時間は平均で24秒であった。被験者別の作業時間を図9に示す。作業時間のうち、被験者の介入を必要としないロボット動作生成などの内部処理が終了

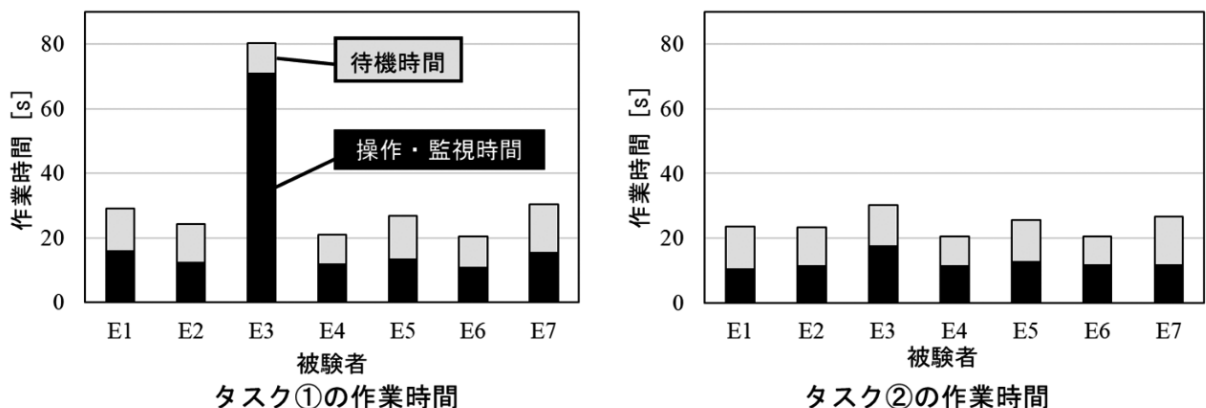


図9 被験者別の作業時間とその内訳

するまでの待ち時間を「待機時間」として灰色で示し、被験者の介在が必要な、UIを操作している時間やロボットが動作している時間を「操作・監視時間」として黒色で示している。E1～E7は被験者の識別番号である。

被験者E3のタスク①における「操作・監視時間」は70秒と他の被験者の約5倍だが、これは操作方法の理解に時間がかかったためである。またE3以外の被験者の「操作・監視時間」の平均値はタスク①で13秒、タスク②で12秒であり、短時間でスイッチの操作が行えたと考えられる。

タスク後のヒアリングでは、多くの被験者からスイッチを選択・確定するだけでよいため操作が簡単であるという感想が得られた。一方で操作方法の理解に時間がかかったという意見もあり、実際にタスク①ではシステムの操作方法が理解できず、作業にもたつく被験者もいた。しかし、タスク②では全被験者がスムーズにUIを操作でき、図9のグラフからもタスク②ではタスク①よりも全体的に操作時間が短縮していることから、タスク①を通して十分操作に慣れることができたと考えられる。

以上の結果から、開発したシステムにより、ロボットを介したスイッチの遠隔操作が簡便に実行可能であることが確認された。今後のUIの改善点として、操作ガイドを追加するなどユーザの理解を助ける改良が考えられる。加えて、多くの被験者から処理を待つ時間が長く不安を感じたとの意見があったことを受け、処理アルゴリズムの最適化による応答性の向上と待ち時間の短縮や、処理状況を示すアイコンやインジケータ等の追加が有用と考えられる。

6. おわりに

本研究では、ロボットを介して遠隔地の装置に設置されているスイッチを簡便に操作することが可能なロボット動作生成技術とユーザインタフェースを開発した。被験者7名による検証実験の結果、開発したシステムを用いて実際にスイッチの操作が可能であることが確認された。

今後の展望としては、今回対象としなかった平行に押すスイッチや回転式スイッチの操作動作の生成に加え、開発したロボット動作生成技術とUIを自律移動が可能な巡回ロボット等へ実装し、プラントやデータセンター等の実作業環境でのスイッチ類遠隔操作検証実験を目指す。また、本システムを使用しない場合との比較実験を行い、システムの有用性を評価する必要がある。

参考文献

- 1) 宮島沙織, 橋本 学, 他:「ロボットによる多様なスイッチ操作自動化のためのスイッチ位置と姿勢の認識」, 動的画像処理実利用化ワークショップ2024講演論文集, pp.83-88, (2024)
- 2) Shang Li, Yujing Chen, Yuhao Meng, et al.: “Autonomous Elevator Button Recognition and Operation Framework for Multi-Floor Mobile Manipulator Navigation,” in *Proc. of IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.383-388, (2021)
- 3) Fan Wang, Gerry Chen and Kris Hauser : “Robot Button Pressing in Human Environments,” in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.7173-7180, (2018)
- 4) Glenn Jocher : “YOLOv5 by Ultralytics,” *doi:10.5281/zenodo.3908559*, (2020)
- 5) Rafael Padilla, Wesley L. Passos, Thadeu L. B. Dias, et al. : “A Comparative Analysis of Object Detection Metrics with a Companion Open-Source Toolkit,” *Electronics*, Vol.10, No.3, 279, (2021)
- 6) Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander, et al. : “A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise,” in *ACM SIGKDD Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining*, Vol.96, pp.226-231, (1996)