

# 論文内容要旨（和文）

2017 年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学 専攻

氏 名 ZAMBRANO FUENMAYOR ADRIAN DARIO 

論 文 題 目 STUDY ON VISUAL MACHINE LEARNING ON THE OMNIDIRECTIONAL  
TRANSPORTING ROBOT  
(全方位輸送ロボットの視覚機械学習に関する研究)

本研究においては、工場や倉庫において、人間の作業者を物理的に補助することを目指して、全方向に様々な物体を滑らかに搬送する能力を持つテーブル型のロボットシステムを実現する。そのために、複数の搬送トレイを、例えその上部に物体が配置されていて、マーカーの一部が隠れていた場合においても、それぞれ判別し、所定の軌道上に制御することが可能な機械学習アルゴリズムを、ロボットシステムの上部にあるカメラからの画像情報を元に開発する。このロボットシステムは、搬送トレイが磁力カップリングで、天井板の下の歯車型動力伝達機構と連動するようになっており、天井板の上は、アクチュエータも電子回路も存在しない、洗浄しやすく、人体に本質的に安全なエリアとなっている。その機能を維持するため、搬送トレイの識別も、機械学習アルゴリズムにより強化された視覚フィードバックを、上部カメラにより「非接触」で行う必要があることが、本研究における、独自の視覚的機械学習アルゴリズムの開発の動機である。

この視覚的機械学習アルゴリズムの具体的な構成方法としては、主に以下の2つの方法を試験した。1つ目は、カメラで撮影された映像の中で、識別すべきマーカーと思われる特定の箇所をBRISKに基づいたSupport Vector Machineの手法で抽出するという従来型の方法である。2つ目は、カメラにより撮影された映像全体において、YOLOと呼ばれる簡易型畳み込みニューラルネットワークを適用する方法であり、これは本研究グループが独自にアルゴリズムとソフトウェアの開発を行った手法である。

今回の実験においては、窓から差し込む日光などの、部屋の照明の条件の変化に、上部カメラによる視覚フィードバックの精度が影響を受けないように、搬送トレイの上部に配置したマーカーの裏側に、独立の乾電池による電源を有するLED照明を配置しており、マトリクス状のマーカーのコントラストを高めているため、マーカーのカメラによる識別そのものは、容易となっている。今回解決すべき問題は、このLED照明により補強されたマーカーの一部が、搬送トレイ上部の物体に、物理的に隠されてしまった場合でも、隠されていない残りの部分の模様を上部カメラで撮影し、その撮影された映像を、機械学習アルゴリズムによる学習の結果として、正確に認識して、2つある搬送トレイを、それぞれ区別して、それぞれの搬送トレイを、所定の運動軌道上で制御することである。

氏名 ZAMBRANO FUENMAYOR ADRIAN DARIO

上記の視覚的機械学習アルゴリズムの2つの方法は、共に、搬送トレイの中央に物体が配置されたときには、トレイ上部のマーカが部分的に隠されてしまうという現象に対して、十分にロバスト（頑健）なものであることが、実験的に立証された。その上で、搬送トレイの区別のプロセスにおいて必要となる「時間の長さ」などの点で、上記の2つの機械学習アルゴリズムを比較した。その結果、本研究グループが独自にアルゴリズムとソフトウェアの開発を行った手法である、「カメラにより撮影された映像全体において、YOLO型の畳み込みニューラルネットワークを適用する方法」が、より短い時間で、一部が隠されたマーカを識別でき、ほぼリアルタイムに近い時間で、物体を運んでいるトレイをそれぞれ同定しつつ、所定の軌道上に制御することが可能であることを、統計的な有意差を持って、実験的に検証した。その上で、本研究グループ独自の手法であるYOLO型の畳み込みニューラルネットワークのアルゴリズムの改良を進めた。

本研究で開発したニューラルネットワークのアルゴリズムにより、様々な形状と大きさを有する物体を載せた複数の搬送トレイをリアルタイムで識別しつつ、16個の直流モータをシリアル接続された複数のマイコンにより協調的に制御して、それぞれの搬送トレイを所定の軌道状で制御して、セル生産システムなどで人間の作業者を補助する機能を実現可能であることが立証された。今後の発展的な課題としては、歯車機構ならではのバックラッシュに基づく搬送トレイの揺動などを、極限まで小さく抑えるために、本研究で開発したニューラルネットワークのアルゴリズムを利用してゆくことなどが挙げられる。工場や倉庫以外の、スーパー・マーケットやコンビニエンスストアおよび病院などにおいても、本研究で知能化を進めた全方向物体搬送ロボットシステムが利用可能となれば、人間同士がソーシャルディスタンスを保ちつつ、効率的な作業が可能な、洗浄しやすい、これから社会的課題に対する新たな解としての次世代オートメーションシステムへと発展してゆくことが期待される。

# 論文内容要旨（英文）

2017 年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学 専攻

氏名 ZAMBRANO FUENMAYOR ADRIAN DARIO 

論文題目 STUDY ON VISUAL MACHINE LEARNING ON THE OMNIDIRECTIONAL  
TRANSPORTING ROBOT

The scope of this research comprises the study and implementation of two machine learning algorithms on a computer vision system for the simultaneous detection of multiple carrier trays on an omnidirectional transporting robot. The integration of the visual system to the robotic mechanism aims to increase its level of automation by providing valuable information regarding the effective detection of trays under partial occlusion, their corresponding positions over the motion range of the structure and a comprehensive visual interface useful for suitable operation.

The two machine-learning algorithms considered in this work include the Support Vector Machines classification method based on the BRISK descriptors extracted from a region of interest within an image and a simplified convolutional neural network method known as YOLO (You Only Look Once) run on a full-size input image. Both approaches proved to be robust against the partial occlusion of tray images, when materials were positioned on top of their surface for transportation. Also, the use of custom markers and LED arrays on the trays allowed the visual system to perform accurate detection regardless of the changes on the external lighting conditions.

A comparative analysis was carried out between both methods in terms of their performance on measuring the position of trays on the robotic mechanism, the time required to process each frame in a video sequence and the occlusion patterns supported by the software implementation.

The data results proved the feasibility of the implementation of the visual machine-learning system as an innovative solution to detect multiple carrier trays on the robot under challenging image conditions, while preventing the installation of additional hardware on the carrier trays that may hinder the generation of smooth motion trajectories of carrier trays on the mechanical system.

# 学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和 2年 8月 5日

理 工 学 研 究 科 長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 水戸部 和久

副査 井上 健司

副査 村松 鋭一

副査 多田限 理一郎



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	機械システム工学専攻 氏名 ZAMBRANO FUENMAYOR ADRIAN DARIO		
論文題目	STUDY ON VISUAL MACHINE LEARNING ON THE OMNIDIRECTIONAL TRANSPORTING ROBOT (全方位輸送ロボットの視覚機械学習に関する研究)		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	令和 2年 7月 22日～ 令和 2年 8月 5日
論文公聴会	令和 2年 8月 5日	場所	工学部 6-508 教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日	令和 2年 8月 5日

## 学位論文の審査結果の要旨 (1,000字程度)

本論文は、工場や倉庫において、任意の形状を有する物体を、全方向に輸送できるロボットを新規に製作し、複数の搬送トレイを、その上部の物体のためにマーカーの一部が隠れていたとしても、正確に判別し、所定の軌道上で制御できる機械学習アルゴリズムを、ロボットの上部のカメラからの画像情報を元に開発するものである。

第一章では、この独自に開発した全方位輸送ロボットシステムの機構を説明した。このロボットにおいては、搬送トレイが磁力カップリングで、天井板の下の歯車と連動しており、天井板の上は、アクチュエータも電子回路も無いために、人体に本質的に安全な領域となっている。第二章においては、その特長を維持するため、搬送トレイの識別も、機械学習により強化された視覚フィードバックを、上部カメラにより「非接触」で行う必要があることを説明している。第三章では、この視覚的機械学習アルゴリズムの具体的な方法として、主に以下の2つの方法を、ソースコードのレベルから独自に記述して、適切な条件の下で比較した。1つ目は、カメラの映像の中で、マーカーと思われる「特定の箇所」のみをBRISKに基づいたSupport Vector Machineの手法で抽出するという従来型の方法である。使用するマーカーは、格子模様をマトリクス状に配置し、その左上に、複数のトレイを識別するための「色付きのセル」を配置して裏側のOLEDで照らしたものを作成した。2つ目は、カメラの映像「全体」において、YOLOと呼ばれる畳み込みニューラルネットワークを適用する方法である。マーカーは、より多くの形状の物体に対してロバストに構成するために、左上の「色付きのセル」の無い、格子模様のみを配置した、より簡素なものを自作して使用した。第四章においては、各種の軌道上で物体を載せたトレイを走行させ、上記の2通りの手法を、厳密に比較した結果、両者は共に、トレイ上に物体が配置されたときに、マーカーの一部が隠されることに対して、十分にロバストであることを、実験的に立証した。第五章では、トレイの区別のプロセスにおいて必要となる「時間の長さ」や「区別の正確さ」の点で、上記の2種のアルゴリズムを定量的に比較し、「カメラで撮影した映像『全体』において、YOLOを適用する方法」が、より短い時間で、トレイを識別でき、リアルタイムに搬送トレイを同定しつつ、所定の軌道上で制御できることを、統計的な有意差を持って、実験的に検証して、論文全体の結論とした。このように、本学位論文は、適切な構成と共に、論理的に論点が記述されており、設定した研究テーマに沿った明確な結論が述べられている。上記の研究成果は、この学位論文に密接に関連する査読付き筆頭著者論文1報が学術雑誌に掲載され、かつ別の査読付き筆頭著者論文1報が全文査読付き国際会議にてフルペーパーのプロシーディング論文として発表されている。

以上より、本論文により得られた知見およびその成果は、ロボット工学及び機械工学の発展に寄与するところが少なくない。よって、博士（工学）の学位論文として合格と判定した。

なお、本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

## 最終試験の結果の要旨

最終試験は、学位論文に関する1時間の口頭発表の後に、主査・副査の教員により、40分以上に渡り質疑応答を行いう形で実施された。当該学生の、専門的知識と、学位論文の妥当性・論理性について、深い議論が行われた。その結果、博士の学位を授与するのに十分な知識と能力を有していると判断されたため、最終試験について合格と判定した。