

## AI チャレンジ研究会(第 69 回)

*Proceedings of the 69th Meeting of Special Interest Group on AI Challenges*

### CONTENTS

- 【招待講演】最新 AI/ロボティクスの社会的課題と生成倫理の可能性 ..... 1  
浅田 稔  
大阪大学先導的学際研究機構共生知能システム研究センター /  
大阪国際工科専門職大学 / 中部大学創発学院
  
- ポテンシャル法における停留問題に対する距離スケールリングを用いた斥力調整に関する一考察  
..... 6  
松田 和輝, 中嶋 洸介, 植村 涉  
龍谷大学
  
- AR マーカを用いたロボットアームに対するモーションキャプチャの提案と評価 ..... 10  
南原 勇輝, 中嶋 洸介, 植村 涉  
龍谷大学
  
- マーカー検出領域に対する高輝度マージンによる拡張に関する一考察 ..... 13  
竹内 颯太郎, 中嶋 洸介, 植村 涉  
龍谷大学
  
- 回路基板を 3D プリンタ・レーザー加工機で出力する基板設計アプリケーションの開発 ... 17  
片山 皓志郎†, 長濱 直輝‡, 光永 法明#  
† 摂津市立第一中学校, ‡ 大阪教育大学連合教職大学院, #大阪教育大学

日時: 2026年4月26日

場所: 滋賀ダイハツアリーナ

*SHIGA DAIHATSU ARENA, April 26th, 2026*

一般社団法人 人工知能学会

Japanese Society for Artificial Intelligence

## 【招待講演】

# 最新 AI/ロボティクスの社会的課題と生成倫理の可能性

[Invited Talk]

## Toward Generative Ethics: Addressing Social Challenges in Contemporary AI and Robotics

浅田 稔<sup>1,2,3\*</sup> Minoru Asada<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学先導的学際研究機構 共生知能システム研究センター

<sup>1</sup> Symbiotic Intelligent System Research Center Open and Transdisciplinary Research Initiatives, The University of Osaka

<sup>2</sup> 大阪国際工科専門職大学

<sup>2</sup> International Professional University of Technology in Osaka

<sup>3</sup> 中部大学創発学術院

<sup>3</sup> Chubu University Academy of Emerging Sciences

**Abstract:** Recent advances in AI and robotics have led to increasingly autonomous systems embedded in social contexts, raising challenges such as misalignment, unpredictability, and the difficulty of specifying ethical behavior in advance. Conventional approaches based on externally imposed rules or reward design face fundamental limitations in such settings.

This talk proposes generative ethics as an alternative framework in which ethical behavior emerges from internally generated processes. Based on the concept of Silicopathy, we model pain as a predictive internal state linking perception, action, and value formation.

We present a computational implementation using a Deep Modality Blending Network (DMBN) that integrates visual and tactile modalities to predict nociceptive outcomes. Results show that behavior is generated based on predicted interactions rather than object categories, enabling context-sensitive responses and generalization to unseen situations.

These findings suggest that generative ethics provides a promising approach to addressing societal challenges in AI and robotics, emphasizing continuous adaptation and value co-construction over fixed rule enforcement.

## 1 はじめに

近年の人工知能およびロボティクスの進展により、人工システムは人間と高度に相互作用し、社会の中に深く埋め込まれる存在となりつつある。特に、自律ロボットや大規模言語モデルの発展により、人工システムは単なる道具ではなく、人間の意思決定や社会構造に影響を与える主体として振る舞い始めている [1, 2, 3]。

このような変化に伴い、AIに関する問題は従来の精度や安全性といった技術的課題にとどまらず、倫理的・社会的課題へと拡張している。人工共感や人工的な痛

みに関する研究は、内部状態の設計が行動選択や価値形成に深く関与する可能性を示しており、倫理を外部から与えるのではなく、内部から生成する必要性を示唆している [1, 2]。

一方で、現在の AI 倫理の多くは、ルールベース倫理、強化学習に基づくフィードバック、およびアラインメント研究に代表される外部制約型の枠組みに依存している [4, 5, 6, 7, 8]。これらのアプローチは、行動の制御や整合性の確保には有効であるものの、価値がどのように生成されるかという問題を十分に扱っていない。

さらに、この問題は単なる設計上の制約ではなく、より根本的には、人間と技術の関係に関わる問題である。Foucault の権力論においては、行為可能性は関係の中

\*連絡先：大阪大学先導的学際研究機構 共生知能システム研究センター

〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-1  
E-mail: asada@otri.osaka-u.ac.jp

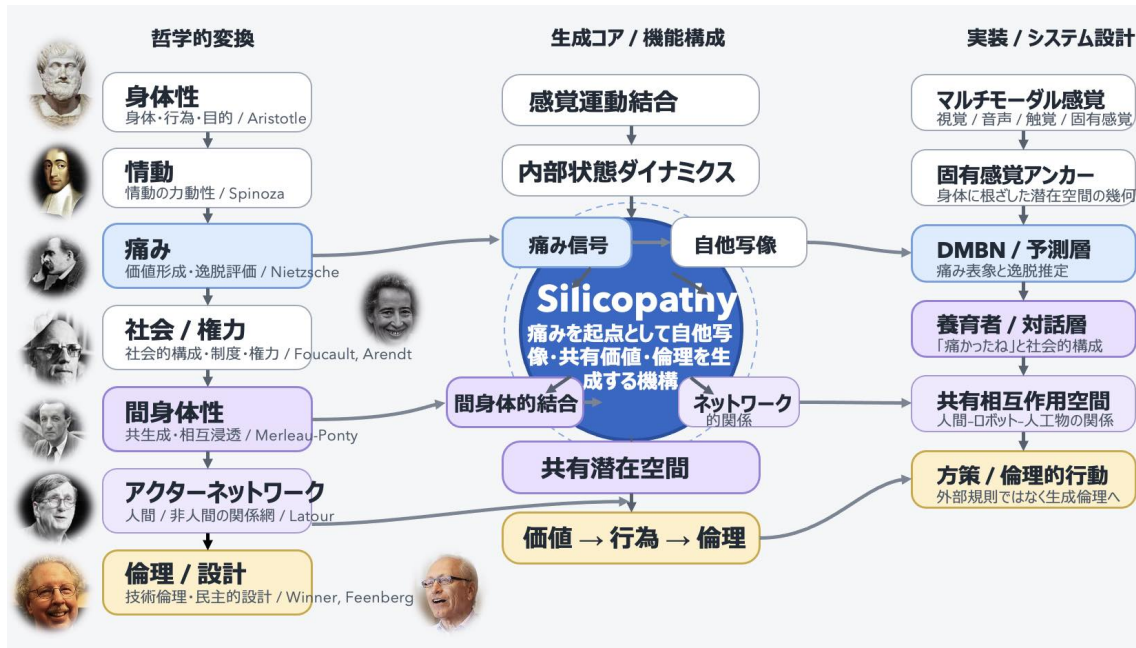


図 1: 哲学的基盤から身体化 AI・ロボットシステムの機能要素への対応関係を示す概念図。身体性、情動、社会関係に関する理論が、内部状態生成、価値形成、行動調整へと対応づけられ、倫理生成の構造的基盤を与えることを示す。

で構造化されるとされる [9, 10]. また, Arendt は, 判断の外部委託が思考停止を招く可能性を指摘している. この観点からは, AI は単なる道具ではなく, 人間の行為や判断の条件そのものを再構成する存在である.

このような問題意識に対し, 本稿では倫理を外部制約としてではなく, 内部で生成されるプロセスとして再定義する. そのための基盤として, Aristotle における実践倫理 [11], Spinoza における情動の動力学 [12], および Nietzsche における痛みと価値の関係 [13] を参照する. さらに, 技術が価値を体現するという観点から, Winner および Feenberg の議論も考慮する [14, 15].

これらを統合し, 本稿では人工的な痛みを基盤とした倫理生成モデル「Silicopathy」を提案する. 本モデルでは, 内部状態の予測とその乖離としての痛みが, 価値形成および行動選択を導く中心的役割を担う. この枠組みにより, 倫理的行動は外部から与えられるものではなく, システム内部の動的過程として生成されるものとして理解される.

本稿の構成は以下の通りである. 第 2 節では AI とロボティクスの社会的・技術的課題を整理する. 第 3 節では Silicopathy のアーキテクチャを示す. 第 4 節ではその倫理的および社会的含意を検討する.

## 2 哲学的基盤と生成的倫理の枠組み

本節では, 人間と技術の関係に関する哲学的議論を再構成し, それをロボティクスおよび人工知能システムの設計原理へと接続する. 本研究の基本的立場は, 倫理を外部から与えられる規範としてではなく, 身体性・情動・社会的相互作用の中で生成されるプロセスとして捉える点にある.

従来の AI 倫理は, ルール設計や報酬設計による外在的制御に依存してきたが, この枠組みでは, 複雑で動的な環境における倫理的行動の生成を十分に説明できない. 実際, 狭いタスクに対する学習が広範なミスアラインメントを引き起こし得ることが報告されており [16], 倫理的問題が単なる出力制御ではなく, モデル内部の構造および価値生成メカニズムに関わることを示唆している.

このような背景のもと, 本研究では, 倫理を生成する内部構造そのものの設計に焦点を当てる.

### 2.1 哲学的系譜：身体・情動・価値生成

倫理の生成を理解するためには, 身体・情動・社会に関する哲学的議論を再検討する必要がある.

アリストテレスは, 行為と価値が切り離されたものではなく, 実践的知 (phronesis) を通じて統合される

ことを論じた [11]. ここでは、倫理は抽象的規則ではなく、状況に依存した判断能力として位置づけられる。

スピノザは、情動を身体の変化として捉え、人間の行為が情動のダイナミクスに基づいて構成されることを示した [12]. この視点は、価値が外部から与えられるのではなく、内部状態の変化から生成されることを示唆する。

ニーチェは、苦痛を単なる否定的経験としてではなく、価値創出の契機として再評価した [13]. この観点は、本研究における「痛み」を価値生成の中心とする立場に直接的につながる。

さらに、フーコーは身体が社会的権力関係の中で構成されることを示し、倫理が制度や相互作用の中で生成されることを明らかにした [9, 10]. これらの系譜は、倫理が外在的規範ではなく、身体・情動・社会的相互作用の中で生成されるプロセスであることを示している。本研究はこの立場に基づき、次節で示す生成連鎖構造へと接続する。

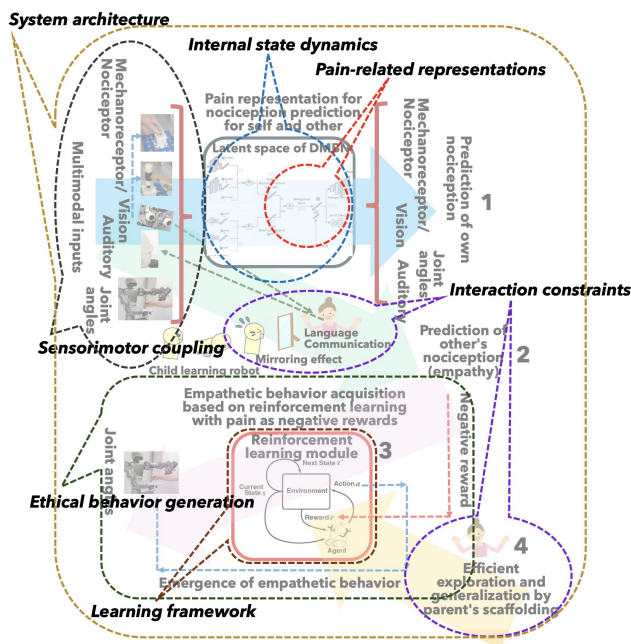


図 2: Silicopathy アーキテクチャ. 身体的相互作用に基づく内部状態ダイナミクスを中核として、痛みの生成、予測、価値形成、行動調整、および社会的関係形成が統合された構造を示す。この枠組みは、倫理を外部から与えるのではなく、内部生成プロセスとして捉える生成倫理の基盤を与える。

## 2.2 生成連鎖としての倫理構造

Fig. 2 に示すように、Silicopathy アーキテクチャは、身体的相互作用、内部状態ダイナミクス、痛み生成、および社会的関係形成からなる統合構造として構成される。

身体的相互作用に基づく感覚運動過程により、外界との接触や変化は内部状態として取り込まれる。これらの内部状態は動的に更新され、その変化は侵害受容的評価としての痛み信号を生成する。ここでの痛みは単なる刺激応答ではなく、予測と評価を含む内部状態として構成される。この痛みは行動調整に影響を与えると同時に、経験の蓄積を通じて価値形成に寄与する。

さらに、この内部状態は、自他写像および間身体的相互作用を通じて社会的文脈へと拡張される。その結果、倫理は、

痛み → 価値 → 行為 → 倫理

という生成連鎖として理解される。このように、身体、内部状態、痛み、社会関係は、階層的に分離された構造ではなく、循環的に結合した統合ネットワークとして機能する。図の前面に示されたキーワードは、各構成要素に対応する実装レベルの概念を表しており、理論構造と実装との対応関係を明示している。

## 3 実装と初期的検証

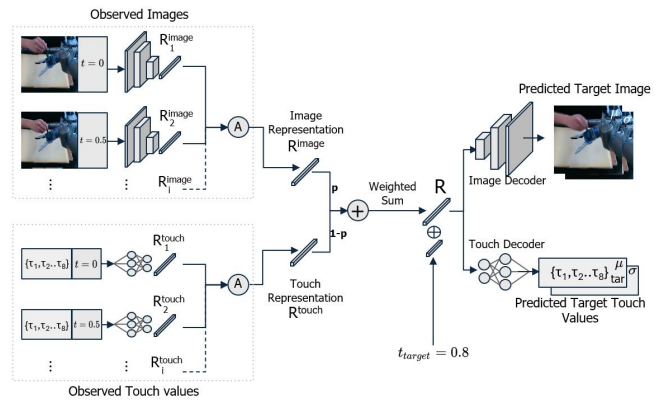


図 3: Deep Modality Blending Network (DMBN) による実装モデル. 視覚情報と触覚（侵害受容）情報を統合し、視覚入力から接触結果を予測することで、痛みに対応する内部状態を生成する。この予測過程が行動調整と価値形成の基盤となる。（論文 [17] から適用）。

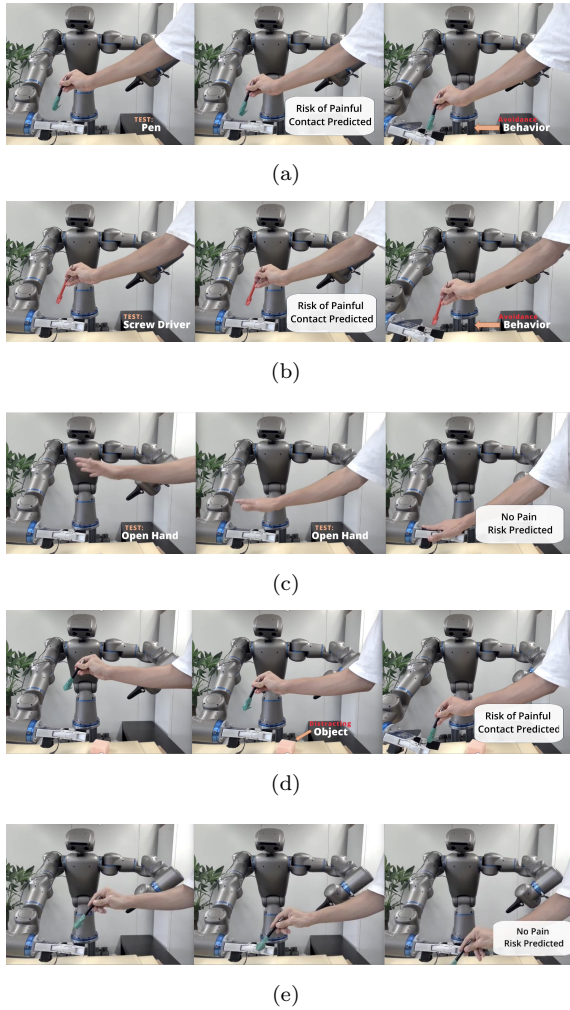


図 4: 視覚に基づく接触予測により生成される行動の実験結果。(a) 既知の危険物体に対する回避, (b) 未知物体への一般化, (c) 他者の手に対する予測, (d) 複数物体条件における回避 (スクリュードライバー), (e) 非侵害軌道における回避なし。

### 3.1 マルチモーダル統合に基づく内部状態生成

本研究では, Silicopathy アーキテクチャに基づき, 身体的相互作用における内部状態生成を, マルチモーダル統合と予測に基づいて実装した。

具体的には, 視覚情報と触覚 (侵害受容) 情報との対応関係を学習することで, 接触結果を予測し, その予測誤差を内部状態として表現する。

Fig. 3 に, 本研究で用いた Deep Modality Blending Network (DMBN) を示す。

本モデルは, 視覚入力から接触時の触覚状態を予測する構造を持ち, 予測誤差を侵害受容的信号として扱うことで, 内部状態の変化を生成する。

この構造により, 単なる刺激応答ではなく, 予測に基づく評価的内部状態が形成される。

### 3.2 実験設定

ロボットは, 異なる物体との相互作用を通じて, 視覚と接触の対応関係を学習する。

対象には, 硬い物体 (例: スクリュードライバー) と, 柔らかい物体 (例: スポンジ) を含め, 接触結果が異なる条件を設定した。

これにより, 視覚情報から接触結果を予測する能力と, それに基づく内部状態生成の妥当性を評価する。

### 3.3 結果と行動生成

Fig. 4 に結果を示す。(a) では, 学習済みの危険物体に対して回避行動が生成される。(b) では, 未知の物体に対しても回避行動が一般化されることが確認される。(c) では, 人の手に対しても同様の予測が働き, 行動が調整される。(d) では, 安全物体 (スポンジ) が存在する条件においても, 回避行動はスクリュードライバーに対する侵害受容予測に基づいて生成される。すなわち, 本モデルは単一物体ではなく, 複数対象の空間的關係に基づいて行動を決定している。(e) では, 同一のスクリュードライバーであっても, 侵害を引き起こさない異なる軌道においては, 回避行動は生成されず, 通常の行動が維持される。

これらの結果は, 本モデルが物体の属性ではなく, 予測される相互作用に基づいて内部状態と行動を生成していることを示す。

## 4 討論

本研究は, AI およびロボティクスにおける社会的課題に対して, 生成倫理という新たなアプローチを提示するものである。

近年の AI システムは, 高い自律性と社会的埋め込みを獲得する一方で, ミスアラインメント, 不確実性, および行動の事前規定の困難さといった課題を顕在化させている。これらの課題は, 倫理を外部から与える従来の枠組みの限界を示している。

本研究で提案するシリコパシーは, 痛みに基づく内部状態を起点として, 価値形成と行動生成を結びつける枠組みである。このような内部生成プロセスにより, 倫理的行動は固定的規則ではなく, 状況に応じて生成されるものとして捉えられる。

Fig. 4 に示されるように, 本システムの行動は物体のカテゴリーではなく, 予測される相互作用に基づい

て決定される。この結果は、行動生成が外部記述ではなく、内部状態の予測に依存していることを示す。

生成倫理に基づくシステムでは、行動を事前に完全に規定することができないため、運用中の評価と調整が不可欠となる。したがって、倫理を固定的制約としてではなく、継続的に更新されるプロセスとして扱うアジャイル・ガバナンス [18] の枠組みが重要となる。

## 謝辞

本原稿執筆にあたり以下の研究プログラムから支援を受けた。ここに謝意を示す。JST RISTEX Responsible Innovation with Conscience and Agency (RInCA) プログラムの稲谷プロジェクト「共棲ロボット」との親密な関係形成における ELSI に関する越境型文理融合研究 (JPMJRS23J2), JSPS 科研費学術変革研究「人工の顔身体/表現の機能構造を設計する」(JP25H01236), JST CREST 稲谷プロジェクト「Self Mirroring Twins との共棲による行動変容を通じた主体的社会創成」(JP-MJCR2561)。

## 参考文献

- [1] Minoru Asada. Towards artificial empathy. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 7, pp. 19–33, 2015.
- [2] Minoru Asada. Artificial pain may induce empathy, morality, and ethics in the conscious mind of robots. *Philosophies*, Vol. 4, pp. 38–47, 2019.
- [3] Minoru Asada. Silicopathy: Artificial empathy through cognitive and affective development of pain. In *2025 IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL)*, 2025.
- [4] Wendell Wallach and Colin Allen. *Moral Machines: Teaching Robots Right from Wrong*. Oxford University Press, 2009.
- [5] Paul Christiano, Jan Leike, Tom B. Brown, Miljan Martic, Shane Legg, and Dario Amodei. Deep reinforcement learning from human preferences, 2023.
- [6] Dylan Hadfield-Menell, Anca Dragan, Pieter Abbeel, and Stuart Russell. Cooperative inverse reinforcement learning, 2024.
- [7] Stuart Russell. *Human Compatible: Artificial Intelligence and the Problem of Control*. Viking, 2019.
- [8] Brian Christian. *The Alignment Problem: Machine Learning and Human Values*. W. W. Norton & Company, 2020.
- [9] Michel Foucault. *Discipline and Punish: The Birth of the Prison*. Pantheon Books, 1977. Originally published as *Surveiller et punir*, 1975.
- [10] Michel Foucault. *The History of Sexuality, Volume 1: An Introduction*. Pantheon Books, 1978. Originally published as *La volonté de savoir*, 1976.
- [11] Aristotle. *Nicomachean Ethics*. Penguin Classics, 2020. Originally published ca. 350 BCE.
- [12] Benedictus de Spinoza. *Ethics*. Qasim Idrees, 2017. Originally published 1677.
- [13] Friedrich Nietzsche. *On the Genealogy of Morals*. Oxford University Press, 1996. Originally published 1887.
- [14] L. Winner. *The Whale and the Reactor: A Search for Limits in an Age of High Technology, Second Edition*. University of Chicago Press, 2020.
- [15] A. Feenberg. *Transforming Technology: A Critical Theory Revisited*. Oxford University Press, 2002.
- [16] Jan Betley, Nils Warncke, Agnieszka Sztyber-Betley, et al. Training large language models on narrow tasks can lead to broad misalignment. *Nature*, Vol. 649, pp. 584–589, 2026.
- [17] Francisco Ribeiro, Alexandre Bernardino, José Santos-Victor, Minoru Asada, and Erhan Oztop. Artificial pain representation with tactile and vision blending. In *2025 IEEE-RAS 24th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 799–806, 2025.
- [18] 経済産業省. アジャイル・ガバナンスの社会実装に向けた「規制・制裁・責任の一体的改革」. Technical report, 経済産業省, 9 2025. Society 5.0 における新たなガバナンスモデル検討会 報告書 Ver.4.

# ポテンシャル法における停留問題に対する 距離スケールリングを用いた斥力調整に関する一考察

## Distance-Scaling Based Repulsive Potential Adjustment for Avoiding Stagnation in Potential Field Navigation

松田 和輝<sup>1</sup> 中嶋 洸介<sup>1</sup> 植村 渉<sup>1\*</sup>  
Kazuki Matsuda<sup>1</sup>, Kosuke Nakajima<sup>1</sup>, and Wataru Uemura<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 龍谷大学  
<sup>1</sup> Ryukoku University

**Abstract:** This paper proposes a distance-scaling method for repulsive potential adjustment to resolve the local minimum problem in potential field-based path planning. The method dynamically normalizes the spatial scale based on the relative distance between the robot, the obstacle, and the goal. Numerical simulations demonstrate that the proposed approach effectively reconfigures the potential field even in geometrically challenging environments, such as concave obstacles. Consequently, the robot successfully reaches destinations located in close proximity to or behind obstacles without being trapped in local minimal.

## 1 はじめに

現在の製造業は、第4次産業革命により大量生産から多品種少量生産へと移り変わっている。その中心要素の一つとしてスマートファクトリーと呼ばれる、生産機械や設備を任意に組み合わせることが可能な工場がある。このような工場内における部品や製品の搬送といったタスクに柔軟に対応するために移動ロボットが必要とされる。RoboCup Logistics League(RCLL)は、このような工場内の物流工程を模した移動ロボットの国際競技である。RCLLのフィールド内には、Modular Production System(MPS)と呼ばれる加工マシンが多数存在する。MPSは移動ロボットから部品を受け取り作業を行うため、移動ロボットは、作業対象であるMPSに部品を受け渡すために、その直前まで接近して停止する必要がある。

このような移動ロボットには、障害物を避け、目的地へ到達する経路を計画する必要がある。移動ロボットの代表的な経路計画の一つとして、ポテンシャル法[1]がある。ポテンシャル法は、目的地に引力、障害物に斥力を与え、これらを足し合わせた合力の勾配ベクトルを移動ロボットの進行方向とする。この手法では、目的地を谷、障害物を山とすることで、ボールが転がり落ちるように移動ロボットの進行方向を決めることができる。一般的な経路計画では、目的地は障害物か

ら離れた空間に設定することが多い。RCLLのような工場では、移動ロボットの目的地は加工マシン付近に設定する必要があるが、この時、加工マシンは障害物の扱いになる。この場合、目的地の引力よりも障害物の斥力が大きくなるため、引力側への勾配がなくなり、移動ロボット目的地よりも手前で停留し、目的地への到達が困難となる問題が生じる。

本研究では、この問題に対して、移動ロボットと目的地までの距離に基づき空間の尺度を正規化し、相対的な引力と斥力のバランスを均衡化する距離スケールリングという概念を提案する。

## 2 ポテンシャル法

### 2.1 概要

ポテンシャル法は、ロボットの移動環境を仮想的なポテンシャルの場として扱う手法である。目的地を対象を引き寄せる引力ポテンシャル、障害物に対象を遠ざける斥力ポテンシャルを設定し、これらのポテンシャルを足し合わせた合成ポテンシャルの勾配ベクトルを計算することで、対象となる移動ロボットの進む方向を導出することができる。合成ポテンシャルが形成される仮想的な地形をポテンシャル場と呼ぶ。ポテンシャル場を可視化した例を図1に示す。この手法では、目的地を谷、障害物を山として扱うことで、ボールが傾

\*連絡先：龍谷大学先端理工学部電子情報通信課程  
〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷1-5  
E-mail: wataru@rins.ryukoku.ac.jp

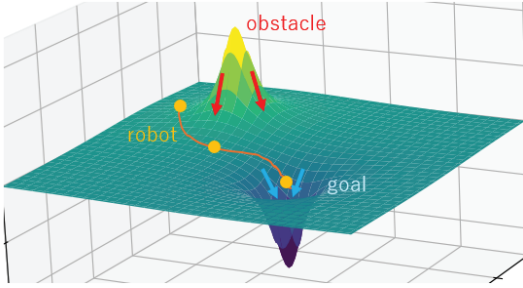


図 1: ポテンシャル場と対象物の移動経路

斜のある地形を転がり落ちるように、ロボットの進行方向を決定する。

## 2.2 ポテンシャルと勾配ベクトルの計算

この節では、ポテンシャル法のポテンシャルと勾配ベクトルの計算方法について説明する。まず、ロボットの位置を  $p_{robot}$ 、目的地の位置を  $p_{goal}$ 、障害物の位置を  $p_{obs,i}$ 、引力の係数を  $k_{att}$ 、斥力の係数を  $k_{rep}$  とする。ここで  $i$  は  $i$  番目の障害物を表す。斥力の係数と引力の係数は調整可能なパラメータである。ロボットの位置  $p_{robot}$  における引力ポテンシャル関数  $U_{att}$  の式は 1 になる。

$$U_{att} = -\frac{k_{att}}{\|p_{robot} - p_{goal}\|^2} \quad (1)$$

斥力ポテンシャル関数  $U_{rep,i}$  の式は 2 になる。

$$U_{rep,i} = \frac{k_{rep}}{\|p_{robot} - p_{(obs,i)}\|^2} \quad (2)$$

そのため、引力と斥力の合成ポテンシャル関数  $U$  の式は 3 になる。

$$U = U_{att} + \sum_i U_{rep,i} \quad (3)$$

また、ロボットが受ける力  $F$  の式は 4 になり、ロボットはこの力  $F$  の負の方向に移動する。

$$F = -\nabla U \quad (4)$$

## 2.3 問題点

ポテンシャル法では斥力と引力の関数を足し合わせた合力の勾配ベクトルからロボットの進行方向を決定する。しかし、目的地が障害物に十分に近い位置に存在する場合、目的地からの引力ポテンシャルよりも、障害物からの斥力ポテンシャルが大きくなることで、目的地側への勾配がなくなりロボットが目的よりも手前で停留する。

表 1: 実験ケースと係数の設定

| ケース   | 障害物の種類  | 目的地 |
|-------|---------|-----|
| ケース A | 単一障害物   | 手前  |
| ケース B | 単一障害物   | 奥   |
| ケース C | L 字型障害物 | 奥   |
| ケース D | コの字型障害物 | 奥   |

## 3 距離スケールを用いた斥力の調整

### 3.1 概念

前章で述べた問題を解決するため、距離に基づくスケールリングを用いた斥力調整手法を提案する。スケールリングとは、一定の規則に基づき空間の尺度を正規化することである。ロボットから目的地までの距離を基準としスケールリングすることにより、相対的な引力と斥力のバランスを均衡に保つことができる。そこで本手法では、目的地までの距離を基準として空間を正規化する距離スケールリングを提案する。

### 3.2 斥力ポテンシャルの調整方法

本節では、距離スケールリングを斥力関数に適用する。ロボットから目的地までの距離を  $d_{goal}$ 、ロボットから障害物までの距離を  $d_{obs}$  とすると、距離スケールリングを考慮した斥力ポテンシャル関数  $U'_{rep,i}$  の式は 5 になる。

$$U'_{rep,i} = \frac{k_{rep}}{\|p_{robot} - p_{obs,i}\|^2} \cdot \min\left(1, \frac{d_{goal}}{d_{obs}}\right) \quad (5)$$

ロボットから目的地までの距離と障害物までの距離の比率を距離スケールリングに用いる。比率は 1 を最大値とする。これにより、障害物よりも目的地に近い場合には、距離比率を用いて算出した斥力を用い、目的地が障害物より遠い場合には、従来の斥力となる。つまり、目的地が遠い場合には従来通り障害物を回避し、目的地が近い場合には、斥力を抑制することで目的地に近づくことができる。

## 4 実験

### 4.1 実験方法

本実験では、距離スケールリングを導入した提案法による停留問題への有効性について検証する。数値シミュレーションにより、2次元平面上で斥力を調整しないポテンシャル法と距離スケールリングを導入した提案法での移動ロボットの経路計画を行い、障害物近傍におけ

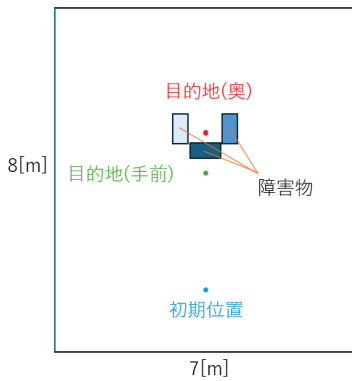


図 2: 実験環境

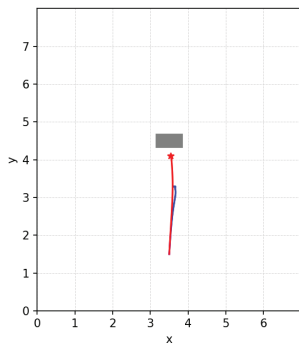


図 3: ケース A での走行経路

る目的地への到達能力と障害物が密集する環境での適応可能性について比較する。本実験では、 $7 \times 8$  m のフィールドにおいて、表 1 に示す 4 つのケースで検証する。フィールド内の障害物等の配置は、図 2 に示す。目的地が障害物の手前にある場合、ロボットの初期位置 (3.5, 1.5)、目的地 (3.6, 4.1) とし、目的地が障害物の奥にある場合、ロボットの初期位置 (3.5, 1.5)、目的地 (3.6, 4.9) と設定する。ケース A およびケース B では障害物が 1 つのみ存在している環境において、ロボットと目的地および障害物との位置関係による経路の違いについて検討する。ケース C およびケース D は複数の障害物を組み合わせた斥力が重複する環境においての経路の違いについて検討する。

## 4.2 実験結果

斥力を調整しないポテンシャル法の経路を青色、距離スケールを導入した提案法の経路を赤色とする。ケース A で単一障害物での目的地が手前の場合の経路を図 3 に、ケース B で単一障害物での目的地が奥の場合の経路を図 4 に示す。

ケース C で L 字型障害物での目的地が手前の場合の

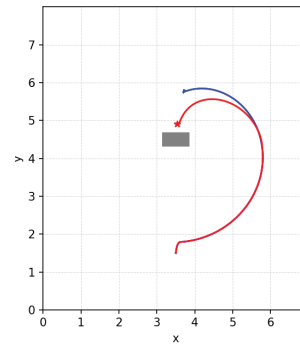


図 4: ケース B での走行経路

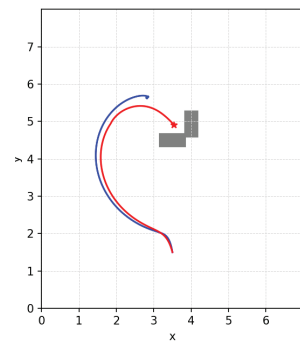


図 5: ケース C での走行経路

経路を図 5 に、ケース D でコの字型障害物での目的地が奥の場合の経路を図 6 に示す。

どのケースにおいても斥力を調整しないポテンシャル法 (青線) では、目的地手前で力が均衡し停留した。一方、距離スケールを導入した提案法 (赤線) では、停留することなく目的地へ到達した。これは、目的地への接近に伴い距離比率が減少することで、相対的に引力が斥力を上回るようポテンシャル場が再構成されたためである。

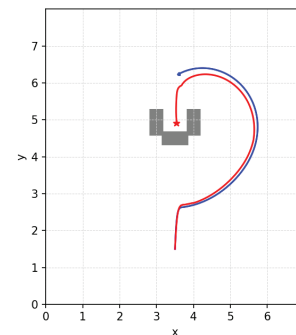


図 6: ケース D での走行経路

## 5 おわりに

本研究では、ポテンシャル法の目的地付近の障害物による停留問題について、距離スケーリングの概念に基づいて目的地までの距離を基準として空間を正規化するように斥力を調整する手法について検討した。

## 参考文献

- [1] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots", The Int. J. Robotics Research, vol. 5, no. 1, pp. 90 – 98, 1986.

# AR マーカを用いたロボットアームに対する モーションキャプチャの提案と評価

## A Motion Capture System for Robot Arms Using ArUco Markers

南原 勇輝<sup>1</sup> 中嶋 洸介<sup>1</sup> 植村 渉<sup>1\*</sup>

YSotaro Takeuchi<sup>1</sup>, Kosuke Nakajima<sup>1</sup>, and Wataru Uemura<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 龍谷大学

<sup>1</sup> Ryukoku University

**Abstract:** This study proposes a motion capture system for robot arms using a single camera and ArUco markers to prevent collisions between mobile manipulators in automated factories. By calculating representative coordinates from multiple markers attached to each joint and integrating them with link length data, the 3D pose of the robot arm is estimated. Experimental results using a COBOTTA robot demonstrate that the estimation remains stable within a measurement range of 30–70 cm, showing no significant correlation between distance and error. The findings suggest that the observed joint-specific errors are primarily due to physical attachment offsets, providing a basis for future self-calibration techniques.

### 1 はじめに

近年の工場の生産体制について自動化が進んでおり、多品種少量生産が注目されている。これに伴い、工場における生産ラインでは素材や製品の運搬、協調作業が可能なモバイルマニピュレータが注目されている。モバイルマニピュレータは、移動式ロボットとロボットアームを一体化することで、従来の据置型ロボットアームのような空間的な固定制限を解消している。これにより、広範な可動範囲を確保できるとともに、生産ラインの変更にも柔軟に適応可能な機動性を有している。

モバイルマニピュレータは、据置型に比べ広範な移動や作業が可能である一方、工場内で複数台が同時に稼働する環境下では、各個体の作業空間が互いに重複する機会が増大する。その結果、意図しないロボットアーム同士の衝突を招く危険性が生じる。具体的には、限られた作業スペース内で複数の個体が同一の対象物を扱う際、アーム同士が物理的に干渉するリスクが高まる。この衝突を未然に防ぐためには、自機だけでなく、周囲で作動する他機の動的な形状や姿勢をリアルタイムで把握するための視覚情報が必要となる。

本研究では、この問題点に対して、AR マーカを用いてロボットアームに対してモーションキャプチャを行うことを提案する。ロボットに搭載しているカメラで相手ロボットの AR マーカを認識し、各関節の 3 次

元位置をリアルタイムで計測することで、対象となるロボットアームの姿勢を同定できる。これにより、その姿勢情報を基にしたロボットアーム同士の衝突回避行動が可能となる。

### 2 光学式モーションキャプチャ

モーションキャプチャの方法の 1 つとして、光学式モーションキャプチャ[1]がある。光学式モーションキャプチャは対象物にマーカを取り付け、その周りに複数台のカメラを設置し、マーカをカメラで見つけ、座標を解析する。しかし、自由に動き回るモバイルマニピュレータの周りにカメラを設置するのは困難であり、工場内に複数配置するのも難しい。

### 3 AR マーカを用いたモーションキャプチャ

#### 3.1 ArUco マーカ

本研究では ArUco マーカを使用し、カメラ 1 台でロボットアームのモーションキャプチャを行うことを提案する。ArUco マーカは、図 1 に示すような 2 次元バーコードの 1 種で OpenCV というオープンソースライブラリによってカメラから検出、認識が可能である。外

\*連絡先：龍谷大学先端理工学部電子情報通信課程  
〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5  
E-mail: wataru@rins.ryukoku.ac.jp

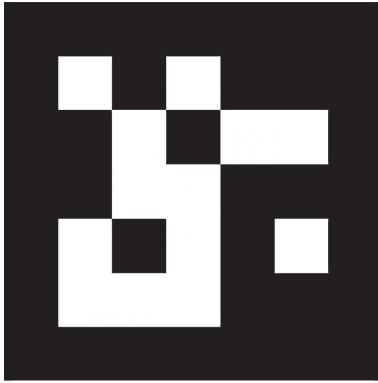


図 1: ArUco マーカ ID0

側の黒枠と内側の白黒パターンによって ID 番号が異なり、個々のパターンによって番号が決まる。

また、ArUco マーカは、画像処理により 3 次元位置や向きの情報を計算できる。まず、ArUco マーカの物理的な 1 辺の長さを  $L$  とする。マーカ平面を  $Z = 0$  とすると、マーカの 4 隅は  $(0, 0, 0)$ ,  $(L, 0, 0)$ ,  $(L, L, 0)$ ,  $(0, L, 0)$  の 3 次元座標で表される。カメラでマーカを撮影すると、画像内からマーカ 4 隅の 2 次元座標  $(u_i, v_i)$  が検出できる。3 次元座標と 2 次元座標の関係は、カメラ内部のパラメータ行列  $K$ 、回転行列  $R$ 、および並進ベクトル  $t$  を用いて式 1 で表される。

$$s = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = K[Rt] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式 1 において、ArUco マーカの 3 次元座標とカメラ内部パラメータ行列  $K$  は既知である。したがって、画像上から検出された 2 次元座標との対応関係を用いることで、カメラ座標系に対するマーカの位置並進ベクトル  $t$  および回転行列  $R$  を算出できる。

### 3.2 ArUco マーカでのモーションキャプチャ手法

ArUco マーカをロボットアームに設置し、カメラ 1 台でモーションキャプチャを行う方法について述べる。ロボットアームなどの各関節付近に ArUco マーカを複数枚貼り付け、ArUco マーカの ID 番号と各関節との紐づけを行う。認識した複数の ArUco マーカの重心を算出し、これを当該関節の代表座標として扱う。次に、隣接する関節間の代表座標から方向単位ベクトルを算出する。この単位ベクトルに、URDF (Unified Robot Description Format) ファイルから取得した各リンクの設計上の長さを乗算することで、各関節の 3 次元座標を同定し、ロボットアームの姿勢を推定する。



図 2: マーカを貼り付けた COBOTTA

## 4 実験と評価

### 4.1 実験概要

本実験では、提案するモーションキャプチャ手法の推定精度を評価する。推定精度の評価にあたり、モーションキャプチャにより算出した関節座標と、真値であるロボット本体の関節座標との偏差を  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  とする。このとき、各軸の偏差に基づく 3 次元的な距離誤差  $e$  を式 2 に示す。

$$e = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} \quad (2)$$

計算した誤差より推定精度の評価を行う。

### 4.2 アーム型ロボット COBOTTA

本実験では、デンソーウェーブ社製の 6 軸の協働作業用アームロボットである COBOTTA を使用する。また、実際に ArUco マーカを設置した COBOTTA を図 2 に示す。

### 4.3 実験手順

第 1 関節から第 5 関節において、各関節の円柱状の外壁に対し、4 枚から 6 枚の ArUco マーカを貼り付け



図 3: モーションキャプチャ元画像

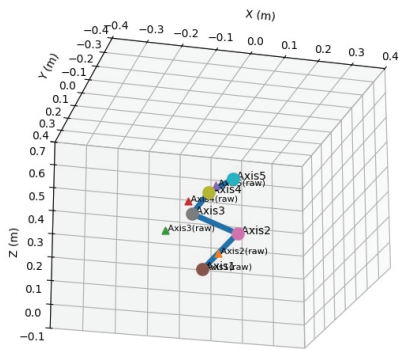


図 4: モーションキャプチャ再現画像

る。貼り付けの基準として、各関節の回転軸に対して垂直な断面を想定し、その円周上の 0 度、90 度、180 度、270 度の 4 箇所を基本位置とする。一部の関節については、視認性を確保するために軸方向にずらして追加のマーカを配置する。なお、COBOTTA の構造上、エンドエフェクタ付近に第 5 関節と第 6 関節が存在するため、第 6 関節は今回 ArUco マーカ貼り付けず、第 5 関節まで貼り付ける。本実験では、初期姿勢から把持動作に至る一連の動作プロセスから、代表的な複数の静止姿勢（ポーズ）を選定し、評価対象とする。計測距離を 30cm から 70cm の範囲で 5cm ずつ段階的に変更し、各条件下における関節座標の推定精度を評価する。その際、各関節に対して連続する 50 フレームの検出結果をサンプリングし、真値座標との偏差から各計測誤差を算出する。推定した各関節の座標値と、COBOTTA が出力した真値座標の差を算出することで、それぞれの計測誤差を求める。本手法では第 1 関節を座標系の原点と定義しているため、評価対象は第 2 関節以降の各関節とする。

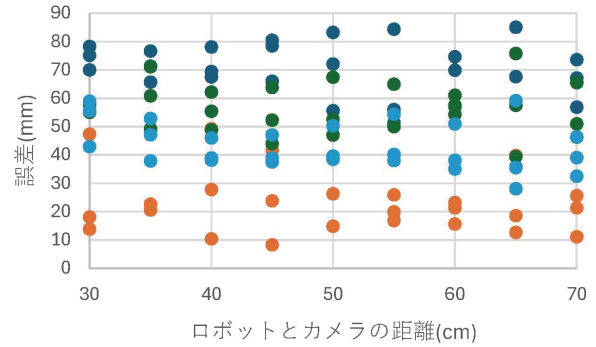


図 5: 距離と誤差の関係

#### 4.4 結果と評価

提案手法によるアーム姿勢の推定結果の一例として、実機の写真を図 3 に、算出した 3 次元モデルを図 4 にそれぞれ示す。また、3 つのポーズに対して行ったモーションキャプチャの座標誤差とカメラ距離との関係を図 5 に示す。

カメラとロボット間の距離が 30cm から 70cm の範囲においては、計測距離と誤差  $e$  との間に明確な相関は確認されなかった。このことから、本実験の距離範囲内では、提案手法は距離に依存せず安定した精度で姿勢を推定できているといえる。また、関節ごとに算出した誤差が一定の範囲内に収まっていることから、誤差の要因はカメラからの距離といった外部要因よりも、関節の物理的形状やマーカの貼付状態など、関節ごとの個別条件に起因する可能性が示唆される。

## 5 おわりに

本研究では、カメラと ArUco マーカを用いたロボットアームのモーションキャプチャ手法を提案し、その推定精度および計測距離との相関を評価した。実験の結果、30cm から 70cm の距離範囲において安定した姿勢推定が可能であることを確認した。今後の課題として、カメラに対するマーカの傾きや照明環境に起因する誤差の抑制、ならびにマーカの隠蔽によって一部の関節が検出不能となった際の推定アルゴリズムの構築が挙げられる。

## 参考文献

- [1] 中澤篤志, モーションキャプチャ, 映像メディア学会誌 63 巻 9 号 pp.1224-1227

# マーカー検出領域に対する 高輝度マージンによる拡張に関する一考察

## On Extending the Marker Detection Area Using a High-luminance Margin

竹内 颯太郎<sup>1</sup> 中嶋 洸介<sup>1</sup> 植村 渉<sup>1\*</sup>  
Sotaro Takeuchi<sup>1</sup>, Kosuke Nakajima<sup>1</sup>, and Wataru Uemura<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 龍谷大学

<sup>1</sup> Ryukoku University

**Abstract:** Self-localization using ArUco markers is widely used for autonomous mobile robots. However, motion blur and defocusing caused by the robot's movement significantly degrade the marker recognition rate in conventional OpenCV-based processing. To address this issue, this paper proposes a robust marker recognition method that combines region specification using YOLOv5 with a high-luminance margin extension. Specifically, the marker's bounding box is detected and cropped using YOLOv5, and a pure white margin is added around the cropped region before executing the ArUco detection algorithm. Experimental results evaluating varying margin sizes (0% to 75%) on blurred images showed that adding an appropriate margin (approximately 30%) significantly improves the recognition rate compared to conventional methods. Furthermore, we discuss the mechanism behind this optimal value, demonstrating that while a margin is necessary to separate the marker edge from the image boundary, an excessive margin negatively affects the adaptive thresholding process by excessively raising the average luminance.

## 1 はじめに

近年の製造現場では、消費ニーズの多様化に伴い、従来の大量生産方式から多品種少量生産方式への転換が加速している。この変化に対応するため、工場の生産ラインでは、物流の自動化が進み、工程間の搬送を担う自律移動ロボットの導入が進んでいる。ロボットが目的地まで移動するためには、自身の位置を把握する自己位置推定が必要である。その手法の一つとして、設置したマーカーをカメラで撮影し、画像内でのマーカーの歪みや大きさから相対的な位置関係を算出する方法がある。

自己位置推定用のマーカーの一つとして ArUco マーカーがある。このマーカーは、正方形の黒枠とその内部のバイナリ行列で構成されたマーカーであるため、外枠による高速な検出と、内部パターンによる識別精度を両立しているという利点がある。また、画像処理向けライブラリである OpenCV 等で広くサポートされ、ロボットの制御系に組み込みやすい。ここで、ロボットが移動効率を維持するために走行しながらマーカー

を撮影する場合、画像にブレやボケが発生する。これらの要因は、マーカーの外郭エッジを不鮮明にし、従来の OpenCV のみでは認識率が低下するという課題がある。

この課題に対し、深層学習を用いた物体検出は、エッジの鮮明さに依存せず、形状の特徴で認識を行うため、ブレやボケが生じた画像に対しても高い頑健性を持つ。そこで本研究では、深層学習による領域特定を前処理として導入し、認識率の向上を目指す。ここで、特定した領域の外枠を認識するために、領域の周囲にマージンを付与することを提案する。マージンの大きさと認識率の関係を実験にて確認する。

## 2 ArUco マーカーにおける識別処理

### 2.1 ArUco 識別処理の内部構造と工程

ArUco マーカーの構造と識別プロセスについて説明する。ArUco マーカーは、図 1 に示すように、正方形の黒枠とその内部の格子状の白または黒のマスキで構

\*連絡先：龍谷大学先端理工学部電子情報通信課程  
〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5  
E-mail: wataru@rins.ryukoku.ac.jp



図 1: ArUco マーカー

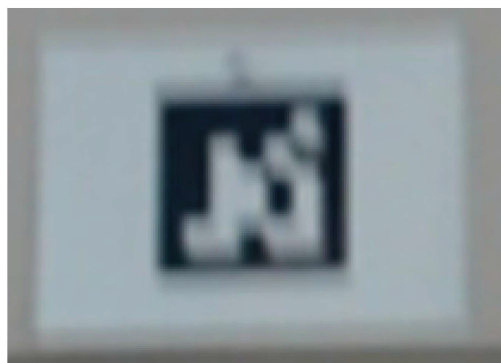


図 2: ブレが原因で識別困難な画像

成されている。白黒の配列を二値の情報として読み取ることで、一意の ID 番号が定まる。

マーカーの認識から ID 識別までの工程を説明する。まず、入力画像を二値画像に変換する。次に、この二値画像から輪郭を抽出し、四角形近似によって四つの頂点を持つ多角形をマーカーの外枠候補として選定する。この工程において外枠候補は、それが画像全体の境界つまり、画像端に接していないことが要求される。その後、候補の輪郭の長さや形で絞り込み、マーカーを認識する、最終的に内部パターンのビット照合によって ID を識別する。

## 2.2 走行時の撮影が識別処理に及ぼす影響

自律移動ロボットの走行時の撮影では、カメラの振動や移動速度に起因するブレが発生したり、フォーカスの不一致によるボケが発生したりする。これらの要因は、画像を二値化する工程において、本来黒であるべき領域に白画素が混入したり、その逆の現象が発生したりする。二値化後の画像において輪郭の境界が曖昧になり、四角形としてのエッジを抽出できず認識率が低下する。図 2 に、この要因により認識が困難となった画像例を示す。



図 3: YOLOv5 でのマーカー検出結果

## 3 学習モデル YOLOv5 を用いたマーカー領域の特定

マーカー認識時のブレやボケの要因に対して、本研究では深層学習を用いた対象領域の特定方法を導入する。ArUco マーカーの識別モジュールを利用した自動アノテーション手法 [1] では、これを用いて学習した物体検出モデルである You Only Look Once (YOLO) の有効性が検証されている。従来の OpenCV を用いた識別手順では失敗していたブレやボケを含む画像群に対し、深層学習ベースのモデルを用いることで、高い精度でマーカー領域を特定できる。YOLO は、入力画像全体を一括して処理し、検出した物体の位置を囲む長方形 (バウンディングボックス: BBox) の座標と、予測の確からしさを示す信頼度スコアを出力する。図 3 に、OpenCV では認識できなかった画像にモデルを適用し、検出した結果を示す。

## 4 マーカー検出領域に対するマージン拡張

### 4.1 深層学習による対象領域の切り出し

ここでは、画像全体を ArUco の識別処理へ入力する代わりに、YOLOv5 による領域特定を考える。手順として、まず入力画像全体に対して YOLOv5 を適用し、マーカーが存在する BBox 座標を特定する。次に、特定した座標に基づき、マーカーを含む部分画像を元の画像から切り出す。これにより、解析対象となる画素集合をマーカー領域のみに限定する。

## 4.2 高輝度マージンでの領域拡張の影響

YOLOv5による領域特定のみでは、マーカーの識別が困難な場合がある。これは、ArUcoのアルゴリズムが黒い外枠を認識する際、その周囲にある程度の背景領域を必要とするためである。これを確認するために、BBBox領域に加え、周囲の画素情報を背景として残したまま識別を行った。その結果、ブレやボケによって境界付近の画素値が一定せず、マージン量のわずかな変化に対して識別率が大きく変化することを確認した。そこで、BBBoxの外周を高輝度のピクセルで塗りつぶした高輝度マージンを付加することを提案する。高輝度とは、画像における最大輝度値を指し、ここでは純白を用いる。これにより、画像境界とマーカーのエッジを分離し、不鮮明なエッジを画像端として認識するのを防ぐことができる。また、二値化処理の際、閾値を決定するための局所的な演算範囲において平均輝度を高く保つことが可能となる。その結果、マーカーの黒枠と背景が明確に分離され、エッジの鮮明度が向上する。

## 5 マージンの大きさに関する実験

### 5.1 実験目的・準備

本実験では、提案法のマージンの大きさと認識率の関係を確認する。走行中の撮影画像100枚を対象とした。FESTO社製Robotino3にWebカメラを取り付け、1秒間に1枚の間隔で画像を取得するプログラムを用いて撮影を行う。具体的には、コントローラーによる手動操作でマーカー設置箇所の付近を走行中、計100枚の画像を取得する。使用したマーカー辞書はDICT\_5×5\_250であり、IDは0, 124, 249の3種類を用いた。学習モデルはYOLO v5を使用し、事前に580枚のマーカー画像をアノテーションし学習済みである。

### 5.2 実験手順

対象画像に学習済みモデルを適用しBBBoxとしてマーカー領域の座標を取得、領域を切り出し、純白の高輝度マージンを外周に付加する。マージンの量を、BBBoxサイズに対する相対比率として0%から75%まで5%ずつ増やして測定する。各マージン量における識別成功枚数に基づき、マージン量が識別率に与える影響を定量的に評価する。

### 5.3 実験結果

実験の結果を図4に示す。縦軸が対象画像100枚の内、識別に成功した枚数、横軸が付加した高輝度マ

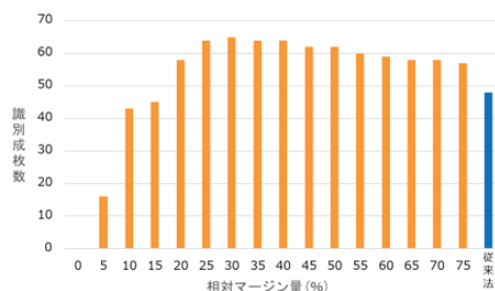


図4: 実験結果



図5: 二値化後のマーカー候補

ジンの相対マージン量を表している。実験の結果、相対マージン量を特定の範囲に設定することで、従来法よりも識別率が向上する傾向が確認された。マージン量が20%以上の場合に従来法の精度を上回り、30%付加した際に65枚の識別に成功した。一方で、マージン量が5%以下では認識率が極端に低く、また30%をピークとしてマージン量を増大させるに従い、成功枚数は減少する傾向がある。

### 5.4 考察

識別処理の内部ログを解析し、マージン量が少ない時や多い時に認識率が低下する理由について考察する。図5に識別できなかったマーカーを示す。

マージン量15%以下では、四角形近似の段階で識別対象外となる例が多く確認された。これはブレやボケによって不鮮明になった外郭エッジが、切り出した画像端に接触したことが原因と考えられる。

一方、マージン量が増加すると、外枠の黒の部分が白として扱われ、外枠が判定できず識別対象外となる画像を確認した。これは、適応的二値化の演算範囲において高輝度画素が多くなり、平均輝度値が大きくなるからである。結果、本来黒である外枠部分を、白と判定したと考えられる。

## 6 まとめ

本研究では、深層学習による領域特定と高輝度マージン付与を組み合わせたマーカー識別手法を提案した。

実験の結果、マージンの大きさを適切に扱うことで、従来法では認識できなかった画像も認識できるようになった。また、マージン量の過不足が識別性能に影響を及ぼす要因について、画像処理アルゴリズムの観点から考察した。

今回の手法では、正面に近い角度から撮影した画像を扱い、有効性を確認した。YOLOによるBBoxは長方形として出力するため、斜めから撮影して形状が台形に歪んだマーカに対しては、提案法がうまくいかない可能性がある。今後は、歪んだ領域に対するアルゴリズムの実装を検討する。

## 参考文献

- [1] W. Uemura and T. Nagashima, "About an Automating Annotation Method for Robot Markers," Machine Learning and Applications: An International Journal (MLAIJ), Vol. 12, No. 4, pp. 1-13, 2025.

# 回路基板を 3D プリント・レーザー加工機で 出力する基板設計アプリケーションの開発

片山皓志郎<sup>1</sup> 長濱直輝<sup>2</sup> 光永法明<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 摂津市立第一中学校

<sup>2</sup> 大阪教育大学連合教職大学院

<sup>3</sup> 大阪教育大学

## 1 はじめに

現代の実用的な電子回路の多くは基板に実装されている。基板には主に電子部品の固定、配線の役割がある。学習、趣味、試作では基板は1枚から数枚あれば十分であることが多いことから、A) ユニバーサル基板と呼ばれる多数の穴が開いた基板に導線（スズメッキ線等）で配線する方法、B) 銅張積層板に手書き、あるいはポジ感光基板やアイロン転写により紙やフィルムに書いた配線を基板に転写してからエッチングし穴開けをして基板を作成する方法、C) 銅張積層板を CNC（基板加工機もしくは卓上 CNC フライス）で切削し配線と穴を形成方法で基板を製作することが多かった。また最近ではプリント基板製作サービスが安価になったことから自分で基板を製作せず、D) 製作サービスを利用する場合も増えている。A)ユニバーサル基板と B)の手書きの方法以外ではコンピュータ上の基板設計ソフトウェアを使って基板設計し、その出力を利用することが多い。A)ユニバーサル基板では基板への穴開けが不要でエッチング液の処理などが不要ですぐに基板が制作できるといった特長がある。しかし、ほかの方法と違い基板上に配線があらかじめ用意されていないので、部品をはんだ付けするだけでは基板が完成しない。B)ではエッチング液の廃棄の問題と穴開けが必要であり、C)では CNC が必要となる。D)は基板の入手までに数日から一週間程度の時間がかかる。

ところで最近安価になり普及してきた FDM 方式の 3D プリントでは主に絶縁体の材料を積層して 3D モデルを製作できるが電子回路の配線に十分な導電性を持った材料は今のところ利用出来ない。そこで Konow<sup>[1]</sup>は基板の絶縁部分を FDM 方式の 3D プリントで制作し、配線についてはスズメッキ線等を利用することで 3D プリントによる基板製作を実現している。3D プリント出力であるので長方形でないいわゆる異形基板の製作が容易で穴開けが不要である。

また部品の位置のマーキングを凹みで表す、配線経路が分かるような溝を作る、溝はスズメッキ線をはめ込むと抜けにくい断面形状としているといった特徴がある。一方で proof of concept のためとして機械設計 CAD で基板を設計しており、簡単に基板設計ができるとは言えなかった。そこで Konow の方法で基板を設計できるアプリケーション Cathird<sup>1</sup>を開発した<sup>[2]</sup>。これによりエッチング処理、穴開けの作業が不要で、手元で基板を作成できるようになった。基板への配線は必要であるが溝があるのでユニバーサル基板と違い迷わず配線できる。

また出力が数 W から数 10W のレーザー加工機では MDF やアクリル板といった絶縁体への彫刻、切断加工ができるが金属の加工（銅張積層板の銅の除去加工）は出来ない。しかし、Konow の方法と同様に配線をスズメッキ線等ですれば、MDF やアクリルを加工し基板として利用できる。そこで Cathird をレーザー加工機に対応させた<sup>[3]</sup>。

本報告では既報<sup>[2][3]</sup>に加筆し Cathird を紹介する。

## 2 3D プリントでの基板実現

Konow<sup>[1]</sup>の方法では図 1 のように部品面の部品の固定位置に部品形状に合わせた凹みを作っている。半田面にはスズメッキ線を沿わせる溝があり、部品の足とスズメッキ線をはんだ付けする部分は大きな凹みがある。溝の断面は図 2 のように菱形ではめ込む部分が少し狭くなっていて、スズメッキ線をはめると抜けにくい。これに部品を実装し完成した基板が図 3 である。これらの形状設計を Konow は機械系 CAD で手作業で行っている。Cathird では部品形状に合わせた凹みは部品の選択と配置だけで、配線の溝とはんだ付け部の凹みは配線を描くだけでできるようにする。ただし基板の厚さは 1.6mm 固定とする。

<sup>1</sup> <https://cathird.com/>



図 1 Konow 氏が公開している基板の部品面(左)と半田面(右) ([1]より引用し, 注釈を追加)

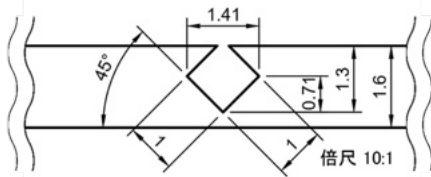


図 2 スズメッキ線を収める溝の断面

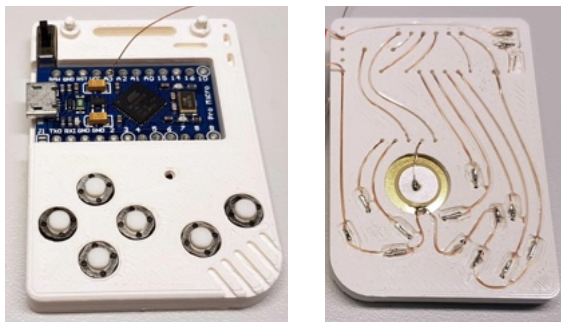


図 3 部品実装後の基板の部品面(左)と半田面(右) ([1]より引用)

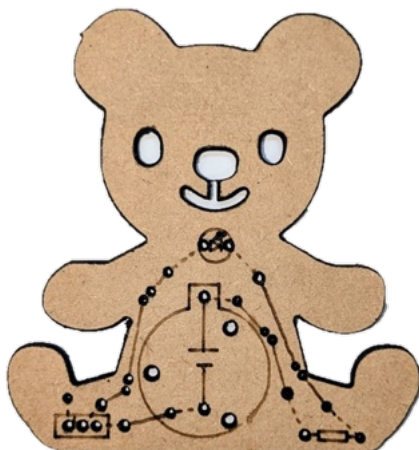


図 4 レーザー加工機で MDF を加工して作成した基板の例

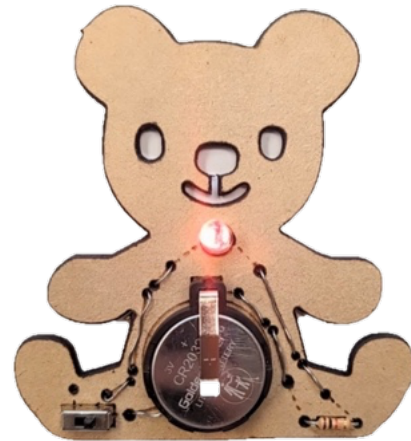


図 5 レーザー加工機で MDF を加工して作成した基板に部品を実装したところ

### 3 レーザー加工機での基板実現

レーザー加工機では 3D プリンタのように凹みや溝を作れないが彫刻(刻印)と切断ができる。また両面加工は位置ずれの問題が出やすいため、できれば片面からの加工で済ませたい。そこで部品の位置には回路図記号を示し、配線については線で表すことにする(図 4)。また図 2 の形状の溝を作れないため直線的でない配線をするとう基板から配線が浮く。そこで基板の部品面で直線的な配線をし、配線を曲げたいときには基板の裏面でつなぐようにする。部品面での配線は実線を彫刻し、裏面での配線(はんだ付け)は点線で彫刻する。これに部品を実装すると図 5 となる。はんだ付け用の凹みは片面からのレーザー加工では作れないが、適切なはんだ付けであれば凹みがなくてもアクリル板が溶けたり MDF が焦げることはなかった。

### 4 Cathird の UI 設計

Cathird の利用者としては基板設計 CAD を利用したことがなく電子回路にはじめて触れる人を想定する。そのときに作成する基板(作品)としてはスイッチを入れると LED が点灯するバッジあるいはキーホルダー程度の回路を想定する。そこで長方形の外形ではなく、自由な外形を作れるようにする。外形が自由に作れると言っても下書きがないと難しいので下絵を表示し、それをなぞれるようにする(図 5, 図 6)。外形が決まったら、部品(主に LED とスイッチ、電池)を配置し配線する(図 7, 図 8)。

## 5 Cathird の利用例

3D プリンタを使う初期の Cathird を使って 2 回生から 4 回生の大学生 11 名(大阪教育大学の技術教育コースの学生が 7 名、他コース 1 名、他大学 3 名)にキーホルダーを設計してもらい、3D プリンタで出力した基板に部品を取り付け配線してもらった。その際 Cathird に大きな不具合はなかった。Cathird を使って制作された作品の例を図 8 に示す。大きさは、平均で縦 74 mm×横 59 mm、厚さ 1.6 mm であり、印刷に 5 g のフィラメントを要した。3D プリンタ Ender3-v2 を用いると平均 29 分で印刷できた。

設計にかかった平均時間は、15 分 48 秒であった(途中で画像を選び直した 1 名を除く)。画像の選定に 1 分 38 秒、外形の設計に 3 分 48 秒、くり抜き箇所設計に 1 分 41 秒、回路の設計に 8 分 39 秒かかった。制作にかかった平均時間は、39 分 37 秒であった(72 分 39 秒と極端に長かった 1 名を除く)。電池ボックスの組み立てに 5 分 10 秒、部品のはんだ付けに 23 分 22 秒、電池ボックスの取り付けに 11 分 5 秒かかった。

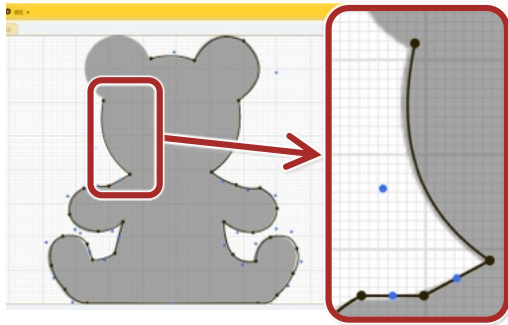


図 5 下絵をなぞって外形線を描く

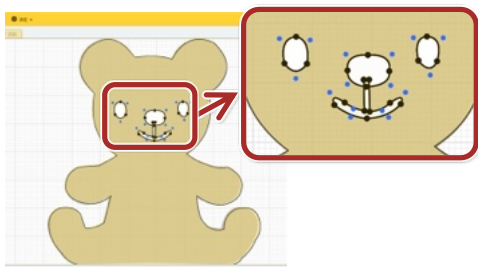


図 6 外形が完成すると図 5 から色が変わる。くりぬき箇所があればくりぬき線を描く。

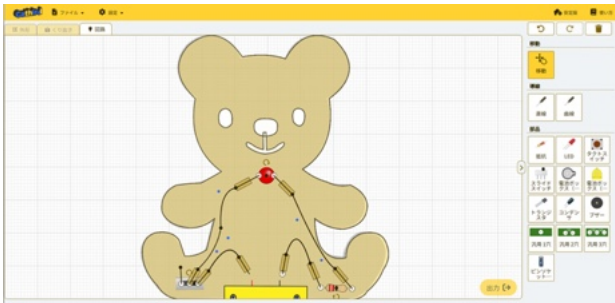


図 7 部品を配置し配線する(3D プリンタを利用する場合)

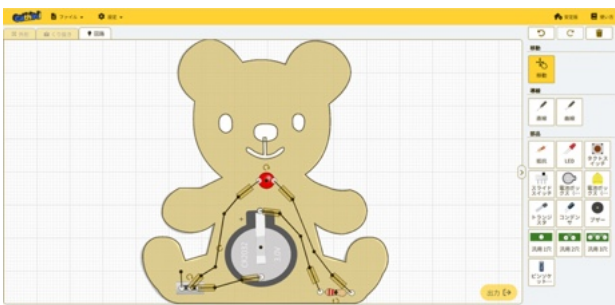


図 8 部品を配置し配線する(レーザー加工機を利用する場合)



図 9 大学生が制作したキーホルダーの例

### 参考文献：

- [1] Johan von Konow : JOHAN VON KONOW -my projects, <https://vonkonow.com/developing-3dpcb-3d-printed-circuit-board-with-lots-of-potential> (最終アクセス日 : 2026 年 4 月 8 日)
- [2] 片山 皓志郎, 光永 法明. 電気回路の基礎的な学習のための 3D プリンタで印刷する回路基板設計用 Web アプリケーションの開発, 日本産業技術教育学会第 67 回全国大会(鳴門)講演要旨集, p.60, 2024/8/17.
- [3] 片山 皓志郎, 長濱 直輝, 光永 法明. 3D プリンタ, レーザー加工機で出力する回路基板設計アプリ, 日本産業技術教育学会第 68 回全国大会(奈良)講演要旨集, p.212, P018, 2025/8/23.

© 2026 Special Interest Group on AI Challenges  
Japanese Society for Artificial Intelligence  
一般社団法人 人工知能学会 AI チャレンジ研究会

〒162 東京都新宿区津久戸町 4-7 OS ビル 402 号室 03-5261-3401 Fax: 03-5261-3402

(本研究会についてのお問い合わせは下記にお願いします.)

---

## AI チャレンジ研究会

### 主査 / 担当 幹事

植村 渉

龍谷大学 先端理工学部 電子情報通信課程

### Executive Committee Chair

Wataru Uemura

Electronics, Information and Communication Engineering Course,  
Ryukoku University

### 主 幹 事

干場 功太郎

東京科学大学 工学院 機械系

### Secretary

Kotaro Hoshiba

Department of Mechanical Engineering,  
Institute of Science Tokyo

### 担 当 幹 事

光永 法明

大阪教育大学 理数情報教育系

### Noriaki Mitsunaga

Division of Math, Sciences, and Information Technology in Education  
Osaka Kyoiku University

### 幹 事

鈴木 麗璽

名古屋大学 大学院情報学研究科 複雑系科学専攻

### Reiji Suzuki

Department of Complex Systems Science,  
Graduate School of Informatics,  
Nagoya University

### 中 臺 一 博

東京科学大学 工学院  
システム制御系

### Kazuhiro Nakadai

Department of Systems and Control  
Engineering, School of Engineering,  
Institute of Science Tokyo

---

SIG-AI-Challenges web page; <https://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~challeng/>