

コマンドの言語化による自然言語に基づくロボット操作への取り組み

久保山 瞳

小林 一郎

お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科 理学専攻

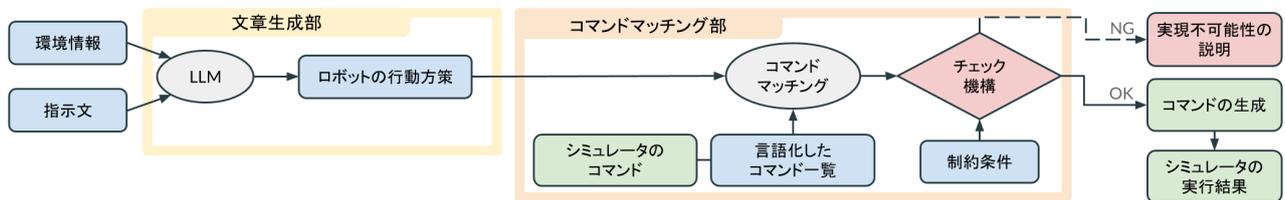


図 1: 提案手法概要

1 はじめに

大規模言語モデル (LLM) の発展により、ロボティクス分野ではロボットの環境認識やプログラムの自動生成への応用が進んでいる。ロボットの制御には固有のソフトウェアやハードウェアを考慮する必要があり、同じタスクでも生成すべき制御プログラムが異なる。本研究では、ロボットの動作単位を「コマンド」として抽象化し言葉で表現することによって、ロボットに依存しない汎用的な行動方針を LLM に生成させる手法を提案する。さらに、Chain-of-Thought (CoT) を用いて行動方針を段階的に生成するプロセスを導入することで、複雑な条件にも対応可能な制御を目指した。提案手法の有効性を検証するため、複数の異なるロボットアームを対象に実験を行い、生成された行動方針がロボット固有の制御コマンドとして変換・実行可能であることを示した。

2 提案手法

本研究では、ロボットの動作をコマンドとして言葉で表現することで、ユーザからのロボットに対する動作指示の自然言語文を、言葉の意味を通じてつなげ、曖昧な指示をもとにロボットの操作を行う。

本研究の概要を図 1 に示す。行動方針生成を行う文章生成部と、対応するコマンドを決定するコマンドマッチング部によって構成される。

2.1 文章生成部

大規模言語モデルに対して Chain-of-Thought (CoT) [1] のようにロボットアームの状況を踏まえながら順序立てて動作の説明を生成させることによって、ロボットの行動方針を生成する。大規模言語モデルに与えたプロンプトを以下の STEP1~4 に示す。

STEP1

あなたは人を手助けする優秀なロボットアームです。受け取った指示と環境情報に基づいて指示を解釈し、自分がどのように行動するかを順序立てて最後まで具体的に説明することができます。例えばものを持つという動作は持ち上げる動作と言い換えられるので、アームをコップに近づけハンドを閉じてアームを上上げます。移動先の座標については机の大きさや人の位置を鑑みて自分で考えて定めてください。

環境情報: この環境にはロボットアームが 1 台と机とコップがあります。座標系は右手系であり、ロボットアームの基準点と机の中心は XY 平面の原点 (0, 0) です。コップは机の上においてあり、コップの底面の位置は (0.5, 0, 0.7)、高さは 0.1m です。指示をする人は机の X,Y 正方向に立っています。(後略)

STEP2

元の意味を保持したまま、動作を明瞭にしてください。この時アームを移動させる場合には必ず X,Y 軸のどちらかに平行になるように移動するように分割してください。

STEP3

元の意味を保持したまま方向の説明を加えてください。アームを移動させる場合の説明は、今の位置から見て前後左右どの方向に動かすかについて教えてください。環境情報の通り右手系のため、X 軸正方向に動かす時は前に、Y 軸正方向に動かす時は左に動くことになるので向きを間違えないでください。また表示するのは移動先の座標のみしてください。

STEP4

元の意味を保持したまま、各説明は「アームを持ち上げる (x,y,z).」「アームを後ろに動かす (x,y,z).」「ハンドを開く。」のように、説明文と移動先の座標のみで構成してください。この時動かす方向に注意してください。

大規模言語モデルには、テキストのみのプロンプトを与え、出力した文章に対してさらにプロンプトを追加して生成させることを 4 段階 (STEP1 ~ 4) で実行することで、段階的に最終的な行動方針文を生成する。STEP1 で具体的に生成した行動について、STEP2, 3 で移動方向や座標を明確にし、STEP4 で明瞭な説明と座標の組み合わせとなるように文の変形を行う。最終的に生成された行動方針文は、大規模言語モデルの考えるロボットアームの動作説明であり、これはロボットの動作を表す言葉の抽象度と同程度の文のみで構成されるものと仮定する。

行動方針の文生成には OpenAI の AssistantsAPI を用いた*。なお生成される文章の正確性を上げるため、環境情報やロボットの仕様を記述したドキュメントを用意し、そこから情報検索を行う RAG[2] の手法を用い

*使用したモデルは GPT-4o(gpt-4o-2024-08-06) である。

An Approach to Robot Control based on Natural Language through the Verbalization of Operation Commands

†Hitomi KUBOYAMA Ichiro KOBAYASHI

†Department of Information Sciences, Graduate School of Sciences, Ochanomizu University

表 1: コマンドマッチングによる生成の流れ

STEP1 で生成した行動方策文	STEP4 で生成した最終的な行動方策文	類似度	ロボットのコマンド
1. アームの下降: 指示された内容通りに, アームをコップの上に移動させるため, Z 軸方向に下げます. 安全にコップを掴むため, コップの底面上方 0.15m, 座標 (0.5, 0, 0.85) に移動します.	アームを持ち下げる (0.5, 0.0, 0.85).	0.965	アームを下ろす
2. グリッパーの開放: グリッパーを開きます. これによりコップを掴む準備が整います.	ハンドを開く.	1.000	ハンドを開く
3. アームの下降とコップの把持: グリッパーでコップを掴むため, アーム先端をさらに下降し, コップの上端付近 (0.5, 0, 0.75) まで移動します.	アームを持ち下げる (0.5, 0.0, 0.75).	0.965	アームを下ろす
4. グリッパーの閉鎖: グリッパーを閉じてコップをしっかりと把持します.	ハンドを閉じる.	1.000	ハンドを閉じる
5. アームの上昇: コップを持ち上げるために, アームを Z 軸方向に上昇させ, 元の Z=0.85 まで戻します.	アームを持ち上げる (0.5, 0.0, 0.85).	0.980	アームを上げる
6. コップを目的地に移動: 人の指示は机の正面方向への移動だったので, コップを寄せるために少し X 方向と Y 方向のプラス方向に移動することとします. 安全に置くために, 座標 (0.6, 0.2, 0.85) までアームを移動します.	アームを前に動かす (0.6, 0.0, 0.85).	1.000	アームを前に動かす
	アームを左に動かす (0.6, 0.2, 0.85).	1.000	アームを左に動かす
7. アームの下降: コップを机の上に置くため, アームを下降し, コップが机に触れる位置 Z=0.75 まで移動します.	アームを持ち下げる (0.6, 0.2, 0.75).	0.965	アームを下ろす
8. グリッパーの開放: コップをリリースするためにグリッパーを開きます.	ハンドを開く.	1.000	ハンドを開く
9. アームの上昇: 掴み動作を完了してアームが邪魔にならないよう, アームを Z 軸方向に元の高さ Z=1.0 まで戻します.	アームを持ち上げる (0.6, 0.2, 1.0).	0.980	アームを上げる

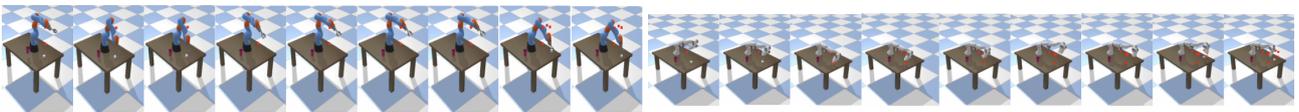


図 2: 2つのロボットアームのシミュレータの実行結果の例

た. 参照するドキュメントはSTEP1 で与えた環境情報の説明文, 物理的な制約条件, 各アームの仕様, 座標情報を箇条書きで列挙したテキストファイル計5つおよび, 各アームの可動範囲・軸数などの仕様が載ったテキストと画像で構成される公式のデータシートである.

2.2 コマンドマッチング

与えられた指示とロボットの制御コマンドとを言葉の意味をもとに結びつけるため, まずは以下の通りロボットの動作を表すコマンド群を用意した.

ハンドを閉じる	ハンドを開く	周囲を確認する
アームを上げる	アームを下ろす	ハンドを回転させる
アームを右に動かす	アームを左に動かす	アームを前に動かす
アームを後ろに動かす	行動を終了する	

これらのコマンド群は, シミュレータ上では言葉通りに実行する関数(ロボットの制御コマンド)として実装されており, 対応するコマンドが呼び出されることで, 各動作が実行される.

提案手法において自然言語文は埋込ベクトルで表現され, CoT によってロボットの行動計画として生成された文ベクトルと用意したロボットの制御コマンド文との cos 類似度をとることによってコマンドのマッチングを行う. 文ベクトルの作成には Multilingual-E5 [3] をベースとして, Sentence-Transformer [4] を用いる.

3 実験

実験設定 「コップをこっちに寄せて」という指示に対して提案手法を用いてコマンドを生成し, シミュレータを用いて動作を確認した. ロボットアームとしては KUKA 社の 7 軸協働ロボットである LBR iiwa 7 R800 および, Franka Emika 社の 7 軸協働ロボット Panda アームを使用する. シミュレータには PyBullet を用い, 自作環境下で生成したコマンドを実行した.

結果 ここでは KUKA 社の iiwa アームについての実行結果を示す. 提案手法を用いて, 表 1 のように行動方策を生成しコマンドに変換, 実行した. 4 段階に分けて文を整形することによって, 座標情報を保持したまま文の抽象度を上げ, ロボットの制御コマンドを結びつけることができた. 特に方向について常に注意させることで汎用的なロボットアームの操作手順をなぞり, 想定通りの動作につながった. テキスト情報のみで生成するためには, 座標情報をもとに方向を介して, 環境の認識を持たせ続けることが重要である.

iiwa アーム及び Panda アームにおいて成功した場合のシミュレータの動作を図 2 に示す. 2つの異なるロボットアームに対しても同様に操作ができた.

4 おわりに

ロボットの動作を言葉で表現することにより汎用的な行動方策を生成する手法をもとに, 2つのロボットアームに対して提案手法での操作を行った. 環境情報を踏まえたロボットの動作を確認し, 大規模言語モデルを利用し行動方策を段階的に生成することによってロボットの制御コマンドへの変換・および実行可能であることを示した. 今後はより複雑な環境やタスクに対する動作に対して, 同様の手法での実現を目指す.

参考文献

- [1] Jason Wei, Xuezhi Wang, Dale Schuurmans, Maarten Bosma, Brian Ichter, Fei Xia, Ed Chi, Quoc Le, and Denny Zhou. Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models, 2023.
- [2] Yunfan Gao, Yun Xiong, Xinyu Gao, Kangxiang Jia, Jinliu Pan, Yuxi Bi, Yi Dai, Jiawei Sun, Meng Wang, and Haofen Wang. Retrieval-augmented generation for large language models: A survey, 2024.
- [3] Liang Wang, Nan Yang, Xiaolong Huang, Linjun Yang, Rangan Majumder, and Furu Wei. Multilingual e5 text embeddings: A technical report, 2024.
- [4] Nils Reimers and Iryna Gurevych. Sentence-bert: Sentence embeddings using siamese bert-networks, 2019.