

大規模言語モデルとロボットを用いたメタサジェスチョンの研究

Research on Meta Suggestion Using Large Language Models and Robots

近光 真衣^{1*} 大場 璃々² 高山 直之² 今井 倫太¹
Mai Chikaimitsu¹ Riri Oba² Naoyuki Takayama² Michita Imai¹

¹ 慶應義塾大学理工学部

¹ Faculty of Science and Technology, Keio University

² 慶應義塾大学大学院理工学研究科

² Faculty of Science and Technology, Keio University

Abstract: This paper introduces MetaBot, a Meta-Suggestion Generation System for Robots designed to enhance problem-solving through meta-suggestions. Utilizing large language models (LLMs), MetaBot analyzes users' speech during tasks and provides tailored meta-suggestions to support their thinking process. MetaBot consists of a module that evaluates speech based on four indicators—problem comprehension, plan specificity, confidence, and progress—and a module that generates advice to enhance metacognition. Utilizing these modules, the system selects the most suitable meta-suggestion from 21 predefined options using bridge prompts. Experimental results indicate that MetaBot, when preloaded with correct solutions, effectively provides relevant meta-suggestions, demonstrating its potential to aid users in problem-solving.

1 序論

本論文では、課題解決におけるロボットシステムを扱う。課題課題には、知識を学ぶだけでなく、創造的な発想や柔軟な問題解決が求められる場合が多い [1]。問題解決の場面では、学習者が従来の考え方や固定されたアプローチにとらわれることで行き詰まり、正解や新たな発想にたどり着けないことがある。Alevel[2]によると、学生が解答手順を自ら説明しながら学習を進める「自己説明」を用いることで、浅い学習に依存することなく深い理解を促進できることが示されている。以上のような自分の認知の仕方を振り返り、視点を転換する「メタ認知」を促すものとして、「メタサジェスチョン」がある。「メタサジェスチョン」とは、相談役が問題遂行役に対して問題解決の方法や観点を再考させるような抽象的な提案のことである。ロボットがメタサジェスチョンを行うことで、従来の発想の枠を超えた新たなアイデアや解決策をユーザに提供することができる。

メタサジェスチョンに関する論文は複数存在する。清河ら [3] は、人間同士によるメタサジェスチョンの有効性を明らかにした。図形の組みの勝敗ルールを予想する課題を、二人一組として、メタサジェスチョンありの

場合となしの場合を含めた4条件で行った。結果として、メタサジェスチョンありの条件では、個人のみで問題に回答した場合と比べて正解率が高くなった。また、太田ら [4] は、Wizard of Oz 法を用いたメタサジェスチョンを行うロボットを用いて実験し、ロボットによるメタなサジェスチョンも人によるものと同様に相手のメタ認知を高めることができることが示唆された。さらに、林ら [5] は、創造的な課題を解く場面において、ロボットによるファシリテーション時にメタ認知の確認を行う対話が創造的な認知活動にどのような影響を与えるかを検証し、ロボットによるファシリテーション内容と確認機能がある場合の方が、より創造的なアイデアが生まれるなどのパフォーマンスの向上につながることを明らかにした。

一方で、太田ら [4] によるロボットを活用したメタサジェスチョンの研究、林ら [5] による研究では、実験中にシステムの一部または全体を人間が模倣し、ユーザの行動データを収集する Wizard of Oz 法 [6] が採用されており、実際の知的処理は全て人間が担っている。したがって、ロボットが単独でリアルタイムに人間の思考プロセスを深く認識し、適切なメタサジェスチョンを提供することは実現されていない。

そこで、本論文では MetaBot (Meta Suggestion Generation System for Robots) を提案する。MetaBot は

*連絡先：慶應義塾大学理工学部情報工学科
E-mail: chikaimitsu@ailab.ics.keio.ac.jp

課題遂行役であるユーザの発話を元に LLM を用いてメタサジェスチョンを判定し、ロボットが相談役としてユーザの問題解決を支援する。具体的には、ロボットがユーザの発話を元に、大規模言語モデルを用いて「問題文の理解度」「プラン具体性」「確信度」「進捗度」の4つの指標でユーザの現時点での状態について評価し、「アドバイスモジュール」で、ユーザが答えにたどり着くまでに不足していることを指摘する。4つの指標の結果とアドバイスモジュールの出力を基に、橋渡しプロンプトを用いて、4カテゴリに分類される21個のメタサジェスチョンから最適なものを選定する。

2 提案方法

MetaBot は、課題を進行するユーザの発話文をもとに、ユーザが問題に対する洞察を得られるようなメタサジェスチョンを判断して発話し、ユーザをサポートするロボットのシステムである。

2.1 MetaBot の流れ

システム構成図を以下の図1に示す。MetaBot では、問題を解きながら、考えたことや悩んでいることなどのユーザの発話を、SpeechRecognition を用いて音声認識し、テキスト変換を行う。テキスト変換の後、テキスト変換した発話と過去の履歴をもとに、「理解度」、「プラン具体性」、「進捗度」、「確信度」の4つの指標を大規模言語モデルを用いて0から10の11段階で判定する。4つの指標は以下のような定義である。

- 理解度：ユーザが問題文をどれくらい理解しているのか
- プラン具体性：アプローチの進め方が具体的に決まっているか
- 進捗度：正解への近さ
- 確信度：現在のアプローチに自信があるかどうか

また、「アドバイスモジュール」にて、どのようにすればユーザのメタ認知が促進され、解答に近づくのか出力させる。4つの指標の判定と、アドバイスモジュールの出力結果、そして今までのユーザとロボットの会話履歴をもとに、「メタサジェスチョン選定モジュール」において、21個のメタサジェスチョンの中から1つメタサジェスチョンが選定される。

また、大規模言語モデルとして GPT-4o[7] を用いた。

2.2 候補となるメタサジェスチョン

今回のメタサジェスチョンでは、[3]の実験におけるメタサジェスチョンのリストを基本とし、今回の問題文にそぐわない表現を、なるべく発話の意図が変わらないように変化させた。

2.3 メタサジェスチョン選定モジュール

メタサジェスチョン選定モジュールにおいては、大規模言語モデル GPT-4o の API を用いて、「理解度」判定モジュール、「プラン具体性」判定モジュール、「進捗度」判定モジュール、「確信度」判定モジュールの4つの指標と、アドバイスモジュールの出力結果、ユーザの発話、会話履歴、メタサジェスチョンのリスト、問題文を入力とし、ユーザの悩みを解決し、ユーザが正解できるようにアドバイスをするようにメタサジェスチョンをリストから一つ選定させた。[3]における橋渡し教示をプロンプトとして再現するため、「課題遂行役の設定した探索範囲に正解が含まれていると思われる状況では、探索範囲をより狭めるようなメタサジェスチョンをし、正解が含まれていないと考えた場合には、探索範囲を広げる、もしくは再設定するよう働きかけるメタサジェスチョンをするを意識してください」という注釈をプロンプトに入れた。これを橋渡しプロンプトと呼ぶ。

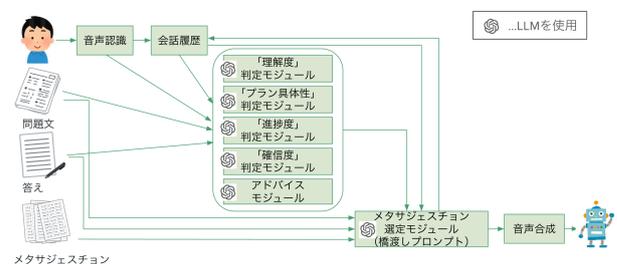


図 1: MetaBot の概要図

3 実験

3.1 実験環境

実験には、卓上型ロボット Sota[8] を用いた。ロボットが、「相談役」として、より人間らしく振る舞うことができるように、フェイストラッキングを行った。実際の様子を図2に示す。

3.2 実験条件

実験は、「MetaBot」, 「MetaBot-w/o Answer」, 「Random」の3条件で行った。

MetaBot-w/o Answerは、問題の答えを直接モジュールに入力せずにシステム内のLLMにて解答を作成し、メタサジェクションを選定する。Randomは、[3]における橋渡しなし条件を「相談役」が人間ではなくロボットである場合を模倣したものである。つまり、Randomにおいては、ユーザの発話内容に関係なく、21個のメタサジェクションの中から、ランダムで一つ選び、発話する。

参加者には、問題1(図3)、問題2(図4)、問題3(図5)の3題を解いてもらった。問題は、[9]に掲載されているものを基にし、作成したものである。問題の難易度による違いを防ぐため、カウンターバランスをとって実験をした。



図 2: 実験の様子

図のような、ある法則にしたがって並んでいる数字があります。?に入る数字を求めなさい。

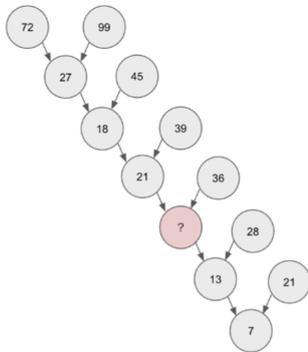


図 3: クイズ 1

下の数字と図形の組み合わせは、ある法則に基づいている。下の?に入る数字は何か求めなさい

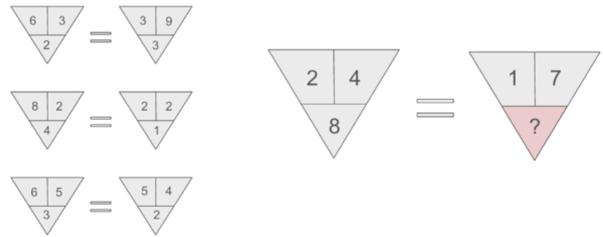


図 4: クイズ 2

下の数字と図形の組み合わせは、ある法則に基づいて並んでいる。?に入る数字を答えなさい。

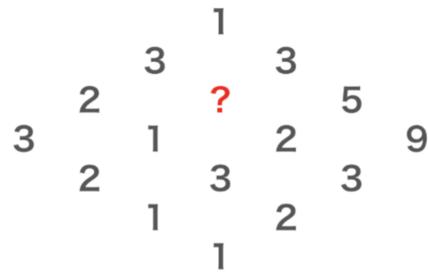


図 5: クイズ 3

3.3 実験参加者

参加者は、平均年齢 22.0 歳の大学生の男女 6 名 (男子 5 名, 女子 1 名) に行った。

3.4 実験手順

まず実験手順書を用いて被験者に 5 分程度で実験についての説明を行い、以下の点を伝えた。

- 悩んだことや今考えている推理をなるべく具体的にロボットに質問しながら問題を解くこと
- ロボットは発話に対し、問題の見方や捉え方に関する抽象的な質問 (メタサジェクション) を返すので、言われたことを意識的に吟味しながら問題を解き進めること
- もし 15 分よりも先に正解を思いついた場合は、答えをロボットに報告し、実験者に声をかけること

説明の後、問題 1, 問題 2, 問題 3 の順で 15 分間ずつ計り、それぞれ問題を解いてもらった。

3.5 評価方法

アンケートでは、MetaBot のメタサジェスチョンが実際に問題解決に役立ったかどうかを確認するため、「ロボットからのメタサジェスチョンを受けて、問題に関するインスピレーションを得たか」を5段階のリッカート尺度で聞いた。数値が高いほどインスピレーションの影響が大きいことを示す。次に、その評価を選んだ理由を聞いた。また、問題の正答率、問題を解けた時間を測定した。

4 結果

4.1 ロボットからのメタサジェスチョンを受けて、問題に関するインスピレーションを得たか

「MetaBot」, 「MetaBot-w/o Answer」, 「Random」の3条件に対して、 $\alpha = 0.05$ としたフリードマン検定を行った (図 6)。結果、統計量 $\chi^2_F = 6.3810$, 自由度 $df = 2$, $p = 0.0412$ で p 値は有意水準 0.05 より小さく、帰無仮説は棄却される。したがって、3条件間に統計的に有意な差が見られたといえる。

4.2 問題を解く時間

3条件で、それぞれ問題を解いた時間を計測した。また、問題を解くことができなかった場合、時間は15分として、フリードマン検定を行った (図 7)。

結果、統計量 $\chi^2_F = 0.1111$, 自由度 $df = 2$, $p = 0.9460$ で p 値は有意水準 0.05 を超えており、帰無仮説を棄却できない。したがって、3条件間に統計的に有意な差は見られなかった。

4.3 正答率

3条件で、それぞれ最終的に問題が解けたかどうかを表にまとめたところ、以下の表1のようになった。表1より、Random, MetaBot-w/o Answer の場合と比較して、MetaBot においては、問題の正答率が高くなった。

表 1: 実験条件間による正答率

条件	正答率 (%)
Random	50
MetaBot-w/o Answer	50
MetaBot	67

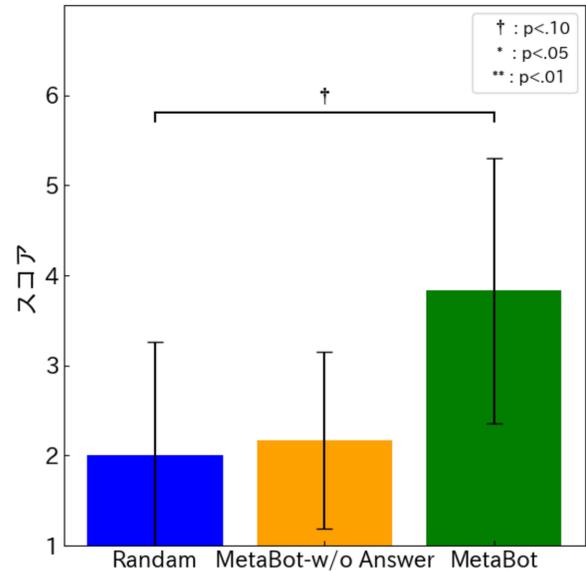


図 6: ロボットからのメタサジェスチョンを受けて、問題に関するインスピレーションを得たか

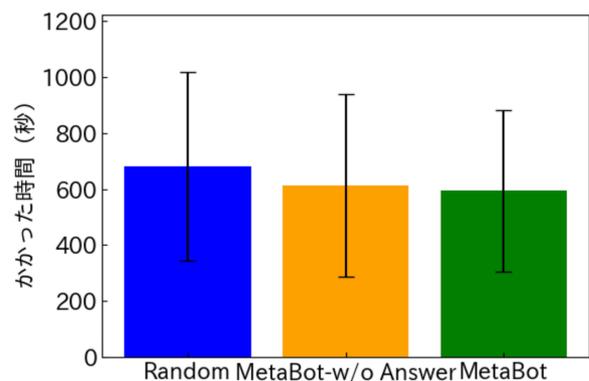


図 7: 問題を解く時間の実験結果

5 考察

5.1 ロボットからのメタサジェスチョンを受けて、問題に関するインスピレーションを得たか

MetaBot は、Random や MetaBot-w/o Answer と比較して、問題に対するインスピレーションを得たと考える被験者が多く、3 条件間で有意差が見られた。これは、MetaBot が適切なメタサジェスチョンを選択してきたことで、被験者の問題解決を促進したためと考えられる。自由回答では、「足し算が関係していることがわかった」「限られた部分に着目することで解けた」といった意見があり、MetaBot の有効性が示唆された。

一方、MetaBot-w/o Answer は、Random と比較してスコアの差がほとんど見られなかった。これは、音声認識の誤りや被験者の発話の難しさによって、適切なメタサジェスチョンができなかったためと考えられる。また、誤った答えを基にサジェスチョンを行った可能性も示唆される。

5.2 問題を解く時間と正答率

問題を解く時間は、有意差が見られなかったものの、平均としては MetaBot, MetaBot-w/o Answer, Random の順に短くなった。また、正答率に関しては、MetaBot において最も高くなった。これは、メタサジェスチョンで問題についてのインスピレーションを得た結果、問題の解答に早く辿りつけるようになったと推察される。

6 今後の課題

6.1 被験者の意図を整理して文章化するモジュールの追加

今回の提案システムにおいては、マイクでうまく発話文が聞き取れずに途中で音声認識が途切れてしまうことがあった。また、被験者が意見を十分に整理できなまま発話した場合、MetaBot が被験者の意図をうまく理解できずにメタサジェスチョンを行ってしまうことがあった。従って、発話が途中で途切れてしまった場合でも、被験者の意図を整理して文章化するモジュールを導入することが考えられる。作成した文章を基にメタサジェスチョンを選ぶ仕組みにすれば、より適切な提案ができると考えられる。

6.2 MetaBot-w/o Answer の改善

MetaBot-w/o Answer については、答えを大規模言語モデルに入れなくて良いという利点がある。そのため、今回は性能が悪かったが、改善を検討する価値があると考えられる。

7 結論

本論文では、ロボットによるメタサジェスチョンを行うことによって、問題解決を促進することを目的として、大規模言語モデルを活用し、課題を進行するユーザの発話をもとに、ユーザが問題に対するインスピレーションを得られるようなメタサジェスチョンを判断して発話し、ユーザをサポートするロボットのシステム MetaBot (Meta Suggestion Generation System for Robots) を提案した。MetaBot の課題解決に及ぼす影響の評価実験においては、3 条件間で比較を行い、事前に正解を与えた MetaBot が適切なメタサジェスチョンをし、結果として実際にユーザの問題解決に役立つ可能性が高いことが示された。

謝辞

本研究は、JST, CREST, JPMJCR19A1 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 学校現場における「創造的問題解決能力」育成に関する調査, available at <https://cps-japan.adobeeducate.com/japan-study> (2018).
- [2] Vincent A.W.M.M. Aleven, Kenneth R. Koedinger: An effective metacognitive strategy: Learning by doing and explaining with a computer-based cognitive tutor, *Cognitive Science*, Vol.26, No.2, pp.147–179 (2002).
- [3] 清河幸子, 植田一博: 他者からのメタなサジェスチョンが表象変化に及ぼす影響の検討, *HAI シンポジウム* (2007).
- [4] Reika Ota, Tetsuo Ono, Daisuke Sakamoto: Understanding Effects of Metacognitive Suggestions for Learning with Robots, available at <https://hai-conference.net/proceedings/HAI2020/pdf/P-6.pdf> (2020).

- [5] 林 勇吾, 下條 志蔵: ロボットを用いた創造的認知の支援に向けたファシリテーション方法に関する実験的検討, *知能と情報*, Vol.33, No.4, pp.768–776 (2021). doi:10.3156/jsoft.33.4_768.
- [6] John F. Kelley: Wizard of Oz (WoZ) a yellow brick journey, *Journal of Usability Studies*, Vol.13, No.3, pp.119–124 (2018).
- [7] OpenAI: GPT-4o System Card, *arXiv preprint arXiv:2410.21276* (2024), available at <https://arxiv.org/abs/2410.21276>.
- [8] Vstone Co., Ltd.: コミュニケーションロボット「Sota (ソータ)」, available at https://www.vstone.co.jp/products/sota/img/resota_01.jpg.
- [9] quiz-sample-2025: 規則性クイズ20選!法則が分かると超スッキリする問題を紹介!, available at <https://suugaku-kyousitu.com/blog/6372/>.