

ユビキタス環境における対話型 ロボットインタフェースのための対話戦略の構築

上田 博 唯[†] 小林 亮 博[†] 佐竹 純 二[†]
近間 正 樹[†] 佐藤 淳^{††} 木戸出 正 継^{††}

ユビキタス環境における対話型ロボットインタフェースの対話戦略を提案する。近い将来、ユビキタス環境は多種多様なホームサービスをユーザに提供すると期待されている。しかし、サービスの複雑化・多機能化にともない、用意されたすべてのサービスをユーザが把握することは困難となる。そこで、この課題を解決するために、ユーザの状況理解を補助し、サービス実行のきっかけとなるユーザ発話を誘導することができる、連想しりとり型対話戦略を提案する。この対話戦略は、ユーザが何気なく発話したキーワードをもとに関連する知識をしりとり的にユーザに提供することで、サービスのきっかけとなる発話をユーザから誘導する。ロボットは木構造で表現された知識を持ち、関連のあるキーワードを連想する。音声対話システムを試作し、対話のみを行う評価実験と実際にユビキタス型住宅での生活実験の中での評価実験を行った結果、連想しりとり型対話戦略の正当性を確認することができた。

Dialog Strategy for Interactive Robot Interface in Home Network

HIROTADA UEDA,[†] AKIHIRO KOBAYASHI,[†] JUNJI SATAKE,[†]
MASAKI CHIKAMA,[†] JUN SATO^{††}, and MASATSUGU KIDODE^{††}

This paper presents a new dialog-strategy for an interactive robot interface in home network (so-called ubiquitous environment). In this environment the users can receive more intelligent services provided by many networked appliances. However it becomes more difficult for users to understand the whole services. In this paper we propose the associative shiritori dialog strategy. An interactive robot continuously tries to obtain a keyword that triggers the service through the shiritori like word game the conversation with the user. In this dialog-strategy, the interactive robot has the tree-structured knowledge that consists of keywords that are associated with the real world and services. Using this tree-structured knowledge, the robot chooses a matched keyword in the user's previous talked sentence. Then the robot construct the next utterance by using the tree-structured knowledge. By this mechanism, the robot can obtain the user's needs while the user feels that he/she has a natural conversation with the robot. We developed an interactive robot dialog system to evaluate our proposed strategy. Through the experiment, the robot showed its ability to obtain proper key words that trigger the meaningful services.

1. 背景

近年、居住空間に埋め込まれたセンサからの情報によって人間の状態や行動を解析し、その状態や行動に応じたサービスを提供するというシステムの研究が注目されている^{1)~3)}。ゆかり (Universal Knowledge-

able Architecture for Real-Life appliance) プロジェクト⁴⁾においても、「ユビキタスホーム」(図1)と名づけた実際に生活が可能実験環境を試作し、ネットワークで結合された家電製品や各種センサが協調動作することによって、どのような新しいサービスを実現できるようになるかといった観点から研究を進めている^{5)~7)}。しかし、サービスの複雑化・多機能化にともない、用意されたすべてのサービスをユーザが把握することは困難となる。そこで、この課題を解決するために対話型のロボットを導入し、このロボットがユーザの状況理解を補助し、サービス実行のきっかけとなるユーザ発話を誘導することができる、部分キーワー

[†] 独立行政法人情報通信研究機構
National Institute of Information and Communication
Technology (NICT)

^{††} 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology (NAIST)
現在、富士通株式会社
Presently with FUJITSU

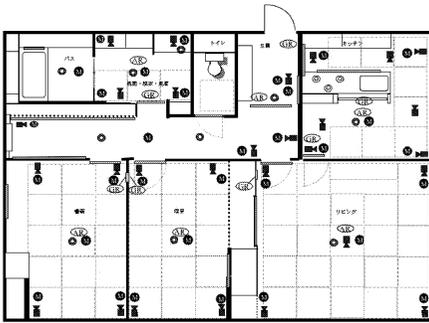


図 1 ユビキタスホーム
Fig. 1 Ubiquitous home.

ドマッチングを応用した連想しりとり型対話戦略を提案する。

部分キーワードマッチングを用いた対話システムとしてはダイアログナビが知られている⁸⁾。ダイアログナビは、よくある質問と具体的な状況を問いなおす応答のセットを対話カードとして持つ。しかし、システムの応答は対話カードに記述されたものに限定され、キーワードを連想しテンプレートにあてはめるといような柔軟に発話文を生成する仕組みがないため、それだけでは本論文で示すような連想しりとり型の臨機応変の対話を実現することはできない。

連想を用いた発想支援システムとしては IdeaFisher や Keyword Associator があげられる^{9),10)}。これらは PC 上の辞書のような支援ツールとして提供されている。これに対し本研究は身体性のあるロボットとの音声対話を通じて、そのときのユーザの状況に最も適したサービスを実行する対話戦略の実現を目指している。

ロボットを使った対話システムに関しては、Robovie や PaPeRo の研究がよく知られている。Robovie の対話戦略は、小さい子供のするようなコミュニケーションを行うように設計されており¹¹⁾、本論文もこれと同じ着想を持つといえる。しかし、Robovie の対話を管理する状況依存モジュールは、ビヘービアとしてあらかじめ記述されたルールに従って発話を生成する¹²⁾ため、発話文の数がこのビヘービアの数に限定される。これに対し本研究は、多様なパリエーションの発話生成を目指し、多様なユーザ発話に対しコンテキストアウェアな応答を行う対話システムを提案するものである。

PaPeRo は、人間から「何ができるの?」という質問があった場合、または未知語を検出した場合に、自分が実行できる機能を音声で提示するメカニズムを持つ¹³⁾。しかし、ユーザの状況と自分の実行可能な機能の組合せに応じてその提示内容を変更するようなメカ

ニズムまでは持たない。これに対し本研究は、ユーザ発話のドメインを判定してそのドメインに関する知識を用いて対話することが可能な対話戦略の開発を目的としている。

2 章は、子供のメタファに準じた対話を用いてユーザをサービスに誘導する機能が、ユビキタスホームにおいて必要であることを示す。3 章は、ユーザの隠れたニーズを発掘する対話戦略として、幼児の行動を模した連想しりとり型対話戦略を提案する。4 章は連想のルールと具体的な実現メカニズムについて説明する。5 章は本研究が行った定量的評価とシステムの改良について述べ、6 章は改良したシステムをユビキタスホームに実装し、生活実験で評価した結果について述べる。7 章は本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2. 対話インタフェースのメタファ

ユビキタスホームのような環境においては、各種センサ情報に基づいて自律的にネットワーク上のアプリケーションを制御する、いわゆるアンコンシャス型ロボットの枠組みを基本として採用することが一般的であり、筆者らのプロジェクトでもそうしている。

アンコンシャス型のサービス提供は、エアコンの温湿度自動調整機能と同様に特に意識的に操作する必要がない便利な機能であるといえる。しかしながら、アンコンシャス型のサービスは、今後ますます高機能化、多機能化が進み、動作原理も複雑化してくる。そうするとシステムの自律的な動作だけでは対応しきれなくなるケースが多く出てくると予想される。システム構成要素の故障や、設計者の予期しえなかった事象など、異常事態への対応がその例である。このような問題に柔軟に対応できる普遍的なユーザインタフェースとして、筆者らはロボット対話システムを提案してきた。

家庭環境は、雑音が発生しやすくユーザとマイク的位置を固定し難い。そのため、家庭環境は音声認識にとって過酷な環境であり、自然言語による音声対話は現在の技術では困難である。そこで筆者らは、対話インタフェースの対話能力を 3 歳児なみとし、子供のメタファに統一して設計した¹⁴⁾。

対話型ロボットインタフェース Phyno の外観を図 2 に示す。外観デザインを設計するにあたって、大まかな機能を決定した。その要点は、

- 子供らしいかわいい仕草を可能とする。
- 二足歩行をしない代わりに、複数台のロボットを設置し瞬間移動したかのように見せる。

の 2 点であり、ここから運動の自由度は



図 2 Phyno
Fig. 2 Phyno.

- 頭部（首） 3 自由度
- 腕 1 自由度（×2）
- 胴 1 自由度

の合計 6 自由度とすることが決まった。また、ユーザとの対話を行うためのデバイスとして

- CCD カメラ
- マイク
- スピーカ

を持たせることにした。そして、日常生活の邪魔にならないサイズということで、台所にあるサラダ油徳用瓶程度の大きさにした。そして最後に見た目であるが、これはかわいさを演出することにした。

このロボットの対話戦略として、幼児の対話を模したサービス誘導機能を開発・実装した。幼児は自分が知っているキーワードに反応して何かをしようとする。本システムでは、サービスを実行するためのトリガとなるキーワードと、そのときに実行するサービスのスクリプトを組として格納している。これらの条件付きスクリプトをサービスシナリオ（SS）と呼び、SS の条件にマッチするキーワードがユーザの発話の中にあれば、対応するサービスが発火する。

以上の子供のメタファに基づく対話サービスを実現するためには、ユーザ発話が SS の発火条件を満たす必要がある。しかし、高度に複雑で多種多様なサービスが存在するユビキタス環境においては、すべての SS の発火条件をユーザが把握することは困難である。そのため、ユーザはサービスの存在に気付かず、用意されたサービスの恩恵を十分に受けられない。そのため対話システムはサービスへ誘導を行う機能を持つことが好ましいと考えられる。次章では、このような誘導対話を具備する対話戦略を提案する。

3. 連想しりとり型対話戦略

日常的に観察される幼児の行動として、大人の会話の中から自分の知識に合致する言葉をとらえて、その

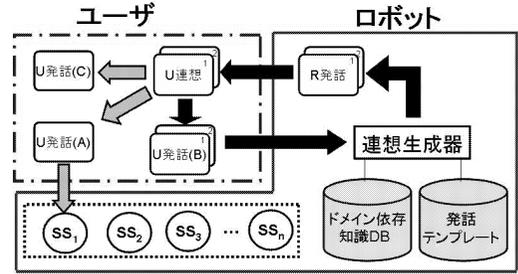


図 3 連想しりとり型対話戦略の動作メカニズム
Fig. 3 Mechanism of Associative Shiritori.

表 1 ユーザ発話に対するロボットの応答ルール

Table 1 A robot's response of an user's utterance.

種類	直前のユーザ発話の内容	ロボットの応答
A	SSの発火条件を満たす発話	SSの実行
B	Aに該当せず、ドメイン依存知識DBが持つキーワードを1つ以上含む発話	連想を実行
C	A, Bに該当しない発話	応答しない

会話に割り込もうとするものがある。このとき、幼児は精一杯の連想と推論を働かせつつ、自分の知識の中から話題を提供して、大人を自分の話題に引き込もうとする。そして幼児は、大人の反応が自分の提供した話題を受けた内容になっている（連想的な意味でのしりとりになっている）とき、話題の引き込みに成功したと判断して、自分の知識を提供することでその話題を継続する。

一方で、幼児は大人の思惑とは無関係にその場の発話に反応しているだけにもかかわらず、子供と話している大人の方が思いもなかったことに気付かされるような場面が日常生活に多々ある。そのため、本研究ではこの連想のしりとりがサービスへの誘導に効果があると考え、対話戦略としてモデル化した（図 3）。本モデルは、直前のユーザ発話の種類 A ~ C に応じ、表 1 に沿って次ターンのロボットの応答を決定する。

B の連想しりとりが繰り返された場合、以下 3 つの効果期待できる。

- (1) ロボット発話による発想支援・記憶想起
- (2) ユーザ発話 B が繰り返されることによるサービスに必要な情報の蓄積
- (3) ユーザのサービス認知を補助

ロボットが SS と関連する話題で連想を行った場合、(1) の効果により、ユーザは SS に対する隠れた欲求や必要性に気づく。ここでいう「SS に対する隠れた欲求や必要性」とはロボット発話を聞くまでユーザ自身が気づかなかつた、「 を調べる必要があつた」、「 を欲しいと思っていた」というユーザの潜在的なニーズを指す。また日常対話では、ユーザはシステムが必

```

U1:「卵がいっぱいあるなー。」
R1:「卵は、親子丼に使われているよ」
U2:「レシピが見たいな」
R2:「分かった。親子丼のレシピを出すよ」

```

図 4 連想しりとり型対話戦略を用いた対話例

Fig.4 Dialog example of Associative Shiritori.

```

IF スロット1, スロット2が埋まる
スロット1: <料理名>
スロット2: <レシピ表示>
THEN (料理名)のレシピをTVに表示
「分かった。(料理名)のレシピを出すよ」と発話

```

図 5 サービスシナリオ (SS) の例

Fig.5 A service scenario (SS).

要とする情報を 1 発話にまとめて発話することは稀である。しかし、(2)の効果により SS の発火条件を複雑化することが可能となり、ユーザや環境のコンテキストを十分に汲み取ったサービスを実現することができ、適切なタイミングでサービスが起動することから (3)の効果が現れる。

図 4 に連想しりとり型対話の例を示す。下線が引いてある語はロボットが反応したキーワードである。ユーザは冷蔵庫を開けたところ卵が多数残っていたために U1 を発話した。それに対し、ロボットは U1 中の「卵」から「親子丼」を連想し、R1 を発話した。(1)の効果により、ユーザは R1 から自分の内部の欲求に気づき、U2 の発話を行った。また、システム側は (2)の効果によりユーザの省略に柔軟に対応した。図 5 に示すスロットフィル型の発火条件を持つサービスが、R1 の「親子丼」と U2 の「見たいな」によりスロットが満たされサービスを実行した。この場合、もしユーザがレシピ表示というサービスの存在を未知であったとしても、この実行結果からユーザはサービスの存在を知ることができる。

4. 連想メカニズムの詳細設計

図 3 に示すとおり、連想は、ドメイン依存知識 DB、連想生成器、発話テンプレートの 3 つのモジュールから実現される。ドメイン依存知識 DB は、連想に必要な知識を提供するものであり、特定のドメインに属するキーワードを構造化して保持する。連想生成器は、ユーザ発話に含まれるキーワードからドメイン依存知識 DB の構造を用いて新たなキーワードを連想し、発話テンプレートを用いて発話文を生成する。

4.1 ドメイン依存知識 DB

本システムは、連想に使用する概念を木構造で構造化し、そのリンクを用いて連想を行う。本研究では、

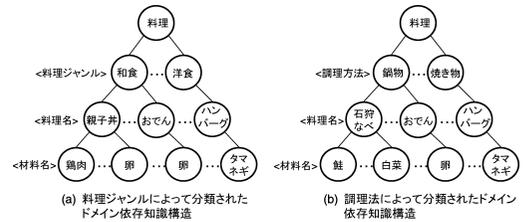


図 6 料理ドメインにおけるドメイン依存知識 DB 例

Fig.6 A knowledge DB depending on a cooking domain.

DB の分散開発、メンテナンス性、学習によるデータの蓄積を考慮し、カテゴリという概念を階層で容易に扱える木構造を DB に採用した。ドメイン依存知識 DB は以下の仕様で作成する。

- 1 つのドメインに複数のツリーが存在する。
- 各ノードはキーワードを 1 つ持つ。
- ツリー内の同一階層内のノードは同じ属性を持つ。

例として、本研究は、料理ドメインにおけるドメイン依存知識 DB を構築した。以下、料理ドメインを対象とした連想しりとり型対話戦略について述べる。構築した DB の例を図 6 に示す。図 6(a) は <料理ジャンル> <料理名> <材料名> の属性を持ったノードから階層が構成されており、図 6(b) は <調理方法> <料理名> <材料名> の属性を持ったノードから階層が構成されている。

4.2 連想生成器

連想生成器は、ユーザ発話中のキーワードからドメイン依存知識 DB を用い、新たなキーワードを連想する。連想生成器は、直前のユーザ発話に含まれるキーワードからドメイン依存知識 DB 上のノードを 1 つ選択する。これを連想元ノードと呼ぶ。連想元ノードからリンクをたどって探索を行い、新たな話題を示す連想先ノードを 1 つ選択する。連想元、連想先、それぞれのノードが持つキーワードを、連想元単語、連想先単語と呼ぶ。ユーザ発話内に連想用単語が複数含まれている場合は、連想に利用されていない方を優先的に選択するため、次の S1) ~ S3) の手順で連想元単語を 1 つになるまで絞り込む。

- S1) 直前のロボット発話で用いた連想元単語を削除。
- S2) 直前のロボット発話で用いた連想先単語を削除。
- S3) 複数残っている場合はランダムに 1 つ選択。

連想生成器は連想元単語から連想先単語を、次の D1) ~ D4) の手順で決定する。

- D1) 連想元単語を含むノードが複数ある場合は、ランダムに 1 つ選択する。
- D2) 連想元ノードからツリーをたどり、距離が 2 以

表 2 発話テンプレート例
Table 2 Templates of utterances.

連想元	連想先	料理ジャンル	料理名	材料名
料理ジャンル			<料理ジャンル>には <料理名>があるよ	<料理ジャンル>の <料理名>には<材 料名>が使われてるよ
料理名	<料理名>は <料理ジャンル>だよ		<料理ジャンル>には <料理名A>の他に <料理名B>もあるよ	<料理名>には<材 料名>が使われてるよ
材料名	<材料名>が使われ ている<料理名>は <料理ジャンル>だよ		<材料名>は<料理 名>に使われてるよ	<材料名A>と<材料 名B>は <料理名> に使われてるよ

内のノードを連想先ノードの候補とする。

- D3) 過去の連想 N 回に使用した連想元単語が連想先単語を含むノードを削除する。
- D4) 残ったノード数
[0 個]発話は行わない。
[1 個]そのノードを連想先単語として選択する。
[2 個]各ノードのドメイン依存知識 DB 内での出現回数と連想に使用した回数を重みとし、重みに応じてランダムに選択する。
- D2) では、直感的な幼児の連想を模して距離を定めた。D3) はこれまでの対話で連想に使用していないキーワードの優先を目指している。D4) ではユーザにとってなじみのあるキーワードの連想を行うため重みをつける。

4.3 発話テンプレート

発話テンプレートは、連想元単語と連想先単語から発話文を生成するのに使用される。発話の際に使用する発話テンプレートは、決定した連想元単語と連想先単語の階層によって異なる。料理ジャンルによって分類したツリーを使用したときの発話テンプレートを表 2 に示す。

5. 評価実験

評価実験では、最初に被験者を用いた模擬対話実験を 3 回行い、これを通じて連想しりとり型対話戦略における各種要素が性能にどのように関係するかを把握し、対話システムを順次改善するようにした。このとき、被験者とシステムの対話ログを解析し、できるだけ定量的にシステムの正当性やドメイン依存知識 DB の充足性を評価するようにした。ここでいう正当性とは、ユーザとロボットが対話を続けることで SS の発火条件を満たす発話が誘導されることである。以上の定量的な評価に加え、被験者がサービスに満足したかどうかをアンケートにより調査した。またシステムをユビキタスホームに実装し、そこで被験者に 10 日間生活をしてもらい、実働環境における評価と問題点の

分析を行った。

5.1 実験方法

実験では、連想しりとり型対話戦略を実装した音声対話システムを使用し、条件を変えて 3 回の実験を行った。ドメイン依存知識 DB は、株式会社エルネット¹⁵⁾ のレシピを使用して、図 6 (a) に示す 3 つの階層から構成されるツリーを作成した。被験者に対して、実験開始前に対話システムについて以下の内容を説明し、作る料理を決定するつもりでシステムと対話するよう指示した。

● 説明した内容

- － 状況設定は、買い物に行く前に作る料理が決まっておらず、ロボットと話し合って料理を決めようとしている状況。
- － ロボットは料理に関する知識を持ち、対話することができる。
- － ロボットは料理のレシピを表示することができる。

● 被験者への要求

- － 被験者はロボット発話を聞いて次に知りたいことを考えて自由にロボットに質問する。
- － 被験者は対話中にレシピが見たくなったら「レシピ見せて」と言う。
- － 被験者は、ロボットの発話を聞いて対話の継続に困難を感じたら、「もういいです」と言う。
- － 対話の開始は実験者が誘導する。実験者が被験者に質問をするのでその質問に答える。答えに対してロボットが発話を行ったら、後は自由に対話を継続する。

この実験では、音声の誤認識の影響を除外するために、被験者の発話は実験者がキーボードから入力した。以下、各実験の条件の違いを述べる。

第 1 回実験

- 被験者数：5 名
- DB の規模：料理ジャンル（和・洋・中）、料理名（200 種）、材料名（約 2,500）
- ロボットは使用しない

第 2 回実験 第 1 回との変更点

- 被験者数：7 名
- DB の規模：料理ジャンル（和・洋・中・お菓子）、料理名（1,000 種）、材料名（約 12,000）
- Phyno の使用：被験者は目の前に置いた Phyno に対して発話する（図 7）。
- 「他」を含む発話への対応：第 1 回の実験において、被験者が「 のほかには？」の「 」を省略して発話する場合が多かったので、

例外的に根ノードは経由しない。



図 7 実験風景

Fig. 7 A scene of an experiment.

第 2, 第 3 回実験では, 省略された部分を直前の連想元単語で補って, 連想しりとりを行うよう改良した.

第 3 回実験 第 2 回との変更点

- SS の追加: 実用環境に近づけるため 8 種類の SS を追加した.
- 表現のゆらぎへの対処: この問題に対処するため, 部分一致で検索を行い連想元単語を選択できるよう改良した. なお, ここでいう「表現のゆらぎ」とは, ユーザが「フレンチドレッシング」を「ドレッシング」のように省略することなどによって発生するユーザとドメイン依存知識 DB 間での語彙の不一致を指す.

5.2 評価方法

連想しりとり型対話がサービスの実行に結び付いた割合を連想しりとり成功率 ($P_{Success}$) と呼び, 評価の基準とする. 表 1 のユーザ発話の分類から, 連想しりとり型対話の終了状態を表 3 のように定義し, 各対話数を数えあげた. また, 失敗終了の原因によってユーザ発話を C1 と C2 に分類した. C1 は, 被験者が対話の継続を困難に感じている状況である. C2 は, 被験者がドメイン依存知識 DB の分類に沿った発話をしたにもかかわらず, DB 上に該当するキーワードが登録されていない場合である. 以上により, $P_{Success}$ は式 (1) のように定義する.

$$P_{Success} = \frac{U_A}{U_A + U_{C1} + U_{C2}} \quad (1)$$

U_i は i に分類されるユーザ発話の数である. 次に, ドメイン依存知識 DB の充足性を評価するため, キーワードヒット率 (P_{Hit}) を, 連想の対象となる発話 (B, C2) のうち, 実際に連想が行われた割合で定義した

表 3 連想しりとり型対話の終了状態

Table 3 Ending patterns of Associative Shiritori.

発話の種類	ユーザ発話の内容	判定	失敗終了の原因
A	SSを要求する発話	成功終了	-
B	連想が実行される発話	継続	-
C1	「もういいです」と発話	失敗終了	対話の継続が困難
C2	ドメイン依存知識DBにない単語を発話	失敗終了	ドメイン依存知識DBの不備

表 4 各実験におけるユーザ発話の割合

Table 4 User's utterances of 3 examples.

	第1回	第2回	第3回
U_A	24 (19%)	68 (31%)	153 (45%)
U_B	60 (48%)	118 (54%)	175 (51%)
U_{C1}	2 (2%)	8 (4%)	11 (3%)
U_{C2}	38 (31%)	24 (11%)	4 (1%)
U_{all}	124 (100%)	218 (100%)	343 (100%)
$P_{Success}$	0.38	0.68	0.91
P_{Hit}	0.61	0.83	0.98

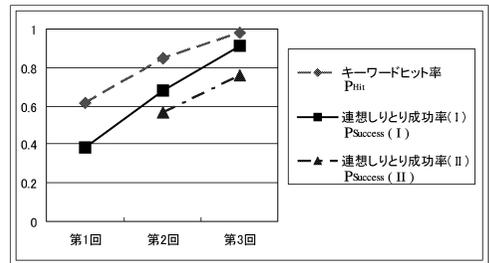


図 8 連想しりとり成功率とキーワードヒット率の推移

Fig. 8 $P_{Success}$ of 3 examples.

(式 (2)).

$$P_{Hit} = \frac{U_B}{U_B + U_{C2}} \quad (2)$$

5.3 実験結果

第 1~3 回の実験における各対話終了状態の割合の推移を表 4 に, 第 1~3 回の実験のキーワードヒット率と連想しりとり成功率の推移を図 8 に示す. ここで, $P_{Success}(I)$, $P_{Success}(II)$ は, それぞれユーザの満足度を加味しない場合と, した場合の連想しりとり成功率である. 実用性の面から考えると, 本システムは提供したサービスに被験者が満足している必要がある. そのため第 2, 3 回の実験では, 対話終了後のアンケートの際に対話ログを被験者に提示し被験者が不満を持ったサービスを指摘した. その対話を失敗と数えた場合が $P_{Success}(II)$ で, 成功と数えた場合が $P_{Success}(I)$ である.

表 4 において, 最も重要なパラメータは DB にない単語が発話された回数 U_{C2} である. 第 1 回実験の 31%から, 第 2 回の 11%への改善は, DB の規模拡大 (レシピ数の増加) によるものである. そして第 3 回の 11%から 1%への改善は表現のゆらぎに対応したこ

今回は材料名・料理名・料理ジャンル名を含む発話

表 5 1 対話における連想の長さ (ロボットの連想発話数)

Table 5 Length of Associative Shiritori.

終了状態	1対話中の連想発話数(第1回)								平均連想長 (0回を除く)	
	0	1	2	3	4	5	6	7		合計
A	7	12	4	1					24	1.35
C1		1				1			2	3.00
C2	34	3	1						38	1.25
合計	41	16	5	1	0	1	0	0	64	1.48

終了状態	1対話中の連想発話数(第2回)								平均連想長 (0回を除く)	
	0	1	2	3	4	5	6	7		合計
A	11	25	10	13	4	2	2	1	68	2.26
C1		5	3						8	1.38
C2	21	2					1		24	2.67
合計	32	32	13	13	4	2	3	1	100	2.18

終了状態	1対話中の連想発話数(第3回)								平均連想長 (0回を除く)	
	0	1	2	3	4	5	6	7		合計
A	69	56	24	2	2				153	1.40
C1		4	2	2	2	1			11	2.45
C2	4								4	-
合計	73	60	26	4	4	1	0	0	168	1.53

とによる. U_A は SS を要求する発話の数であり, 第 2 回の 31% と第 3 回の 45% は後述する連想の長さとの関係で見てもほぼ妥当といえる. U_B は連想が実行された発話であり, 3 回の実験を通じてほぼ 50% に保たれており, 変化させた要素である DB 規模の拡大と表現のゆらぎへの対応が副作用を生じていないことが確認できたといえる. U_{C1} については数% 以下と小さく保たれているが, ユーザにとっては不満を感じやすいものである. 5.4 節で改めて考察する. 連想しりとり成功率 $P_{Success}$ とキーワードヒット率 P_{Hit} については, 図 8 のグラフから分かるように, 第 1 回実験から第 2 回, 第 3 回と順調に改善されており, DB の規模拡大や表現のゆらぎへの対応が連想しりとり型対話戦略の性能を大きく改善させることが確認できた.

連想しりとり型対話戦略がどの程度対話を継続できたか確認するため, 第 1~3 回の実験における 1 対話中のロボットの連想発話数を調査した (表 5). 連想の長さが 1, 2 回に集中しているのは, 今回用いたドメイン依存知識 DB のツリーの階層が 3 階層と少なく, 利用できる知識の種類も少なかったためである. 実際に連想発話数が 4 以上のケースを見ると, たとえば「他の卵料理は」と何回も発話するといった, 被験者の気に入る料理が出てくるまでユーザが 1 つのキーワードに固執する傾向などがみられた. このような無意味なループの検出は今後の課題である.

5.4 考 察

(1) 状態 C1 の解析

表 6 に第 1 回 ~ 第 3 回の実験における, 深刻な失敗が起きた C1 時の対話状況の解析結果を示す. 最も多かったケースは, 複数のキーワードから条件を絞るような発話を行った場合である. その場合, 得られた

表 6 C1 で終了したときの対話状況

Table 6 Analysis of C1.

終了時の対話状況	第1回	第2回	第3回
ユーザが従来型検索システムを意図	1	4	7
ロボットが何度も同じ料理名を発話		3	2
ロボットがコンテキストを無視した発話	1		1
構文解析エラー		1	1

- U1: 糸コンニャク
- R1: 糸コンニャクはすきやきに使われているよ
- U2: 豆腐は?
- R2: 豆腐は豆腐ハンバーグに使われているよ
- U3: 他に豆腐の料理は?
- R3: 豆腐が使われている鯛りりは和食だよ
- U4: 糸コンニャクと豆腐は?
- R4: 糸コンニャクと卵はイワシの柳川風に使われているよ
- U5: 卵と豆腐の料理は?
- R5: 豆腐は鮭と豆腐の蒸しものに使われているよ
- U6: 卵は?
- R6: 卵は中華クッキーに使われているよ
- U7: 中華クッキーって何ですか?
- R7: わかった, 中華クッキーのレシピをだすよ

図 9 興味深い対話事例

Fig. 9 An interesting result.

- U1: リンゴを使った料理は?
- R1: リンゴはタコのマリネに使われているよ
- U2: タコはありますか?
- R2: タコとナスはタコの辛子酢みそ和えに使われているよ
- U3: 冷蔵庫にナスはありますか?

図 10 興味深い対話事例 2

Fig. 10 An interesting result 2.

キーワードの 1 つしか連想に用いなかったため, ユーザがロボットとの対話を困難と感じたと考えられる. 次に多かったのが, ロボットが何度も同じ料理名を発話したケースであった. このケースは, 連想先と連想元のノード間の距離が 2 の場合に, 中間ノードに対する連想の制約を設けていないことが原因であった. 3 番目は, 検索条件が複数のユーザ発話にまたがっていたが, ロボットが文脈を無視して発話したケースであった.

(2) 興味深い対話事例

実験において得られたロボットと被験者との対話結果から, 特に興味深い対話事例について解析を行った. 図 9 と図 10 は, 被験者とロボットとの間で連想しりとりがうまく動作している例である.

図 9 では U1~U4 まで, 「すきやき」に関して「糸コンニャク」「豆腐」を中心に話題が進んでいる. しかし R4 で, ロボットは新たなキーワード「卵」を出したことから, 以降は話題の中心が「卵」に変遷している. この「卵」という話題に対し, U5 で一度は「卵と豆腐の料理は?」と問いかけたユーザではあるが, R5 で満足できる答えを得られないと分かると, U6 で「卵は?」と (単一の食材での) 質問に切り替えてい

る．この結果，R6では「中華クッキー」が提案された．ユーザはこの「中華クッキー」という未知のレシピに興味を示し，それは何かと聞き，結果としてそのレシピを見せてもらうことになった．ここで，ユーザにとっては未知のレシピを知ることが1つの未知のサービスであるととらえるなら，この結果は，連想しりとり型対話戦略が，その一連のユーザとの対話の中で，ユーザに対して未知のサービスの存在を知らせ，その新しいサービスへと誘導する能力を持っていることを間接的に示していると考えることができる．

R4はユーザの意図に沿わない発話をしていることにも注目すべきである．U4のユーザ発話は複数キーワードによるAND検索を期待したものであるが，R4が検索条件を片方しか満たしていないにもかかわらず，ユーザはロボットとの対話を継続している．これは，ユーザがロボットの発話に幼児としてみた場合の妥当性もしくは新たな知的興味を感じ，対話を継続したためと想像される．一方で，(1)で述べたように，AND検索の不実行が対話に悪影響を与えた場面もある．今後はこのような事例から対話継続のポイントを解析してゆく必要がある．

図10には発想支援の効果が現れている．料理の内容について興味を持っていたユーザが，ロボットとの対話の中で冷蔵庫の中身に注意すべきであることに気づいている．このログからU1の時点ではユーザ自身が気づかないニーズを発掘することができたといえる．今後，たとえば冷蔵庫の中を表示するようなサービスを用意することで，ユーザに有効なサービスを提供できるようになる．

5.5 ユビキタスホームでの生活実験

ユビキタスホームで実際に家族が連想しりとり型対話戦略を含む試作システム全体の検証を行った．第3回実験の対話システムに家電の操作を行うSSを加え，Phyno(図2)に実装しユビキタスホームに設置した．音声認識にはJulius/Julian¹⁶⁾を用い，得られたログのうち，約6日間のデータについて解析を行った．

生活実験では，連想しりとりとは無関係な発話や雑音，音声認識の誤認識が発生する．また，実生活の中での検証であるため「もういいです」というような言葉での明確な打ち切りはなく，第1~3回の実験に対し単純な比較はできない．そこで，複数のロボットの連想しりとり発話を解析し，間にどのようなユーザ発話があったかを推定することで，連想しりとり成功率を概算した．

表7はロボットの連想しりとり発話を，次ターンのロボット発話までの間隔と，次ターンのロボット発話

表7 生活実験におけるロボットの連想発話
Table 7 Robot's utterances of experiments.

分類	次ターンのロボット発話との間隔	次ターンのロボット発話	発話数
A'	60s未満	SS	104
B'	60s未満	連想発話	239
C'	60s以上	-	175
合計			518

	発話内容	認識結果
U1	スパゲッティ	パセリ。
R1	パセリはカツオの香味揚げに使われているよ	
U2	生ザケ	生ザケ。
R2	生ザケが使われているサケとハクサイの炒めものは中華だよ	
U3	レシピを見せて	レシピを見せて。
R3	わかったよ，サケとハクサイの炒めもののレシピをだすよ	

図11 対話ログ(生活実験)

Fig. 11 Dialogue (living experiment).

の内容で分類した．ロボット連想しりとり発話を行った後，一定時間内にSSを実行した場合(A')は表3のAに相当する．連想発話を行った場合(B')は表3のBに相当する．ロボット連想しりとり発話を行った後，一定時間が経過してもロボット発話がない場合(C')は，ユーザは対話を困難と感じたか，システムが認識できない語彙を発したと見なし，表3のC1，C2に相当する失敗終了とした．

このとき連想しりとり率の概算値($P'_{Success}$)を式(1)と同様に算出した結果，生活実験では $P'_{Success} = 0.37$ となった．第3回実験の $P_{Success}$ から値が減少した理由としては，C'がユーザ発話A，Bを音声認識の誤認識により認識できなかった場合を含むことと，第1~3回の実験では未実装のSSを要求された場合はユーザ発話をAに分類したが今回はC'に分類したことの2点が考えられる．

生活実験では，図11の対話ログに見られるように，誤認識をした単語から連想を行った場合でも，そのまま対話が継続したケースが見受けられた．ロボットは，U1の「スパゲッティ」を「パセリ」と誤認識しR1を発話した．それに対するU2は，ユーザはロボットの誤認識にもかかわらず，R1中の「カツオ」から「生ザケ」を想起して対話を続行している．さらに，被験者のアンケートによると，この日の夜に「サケとハクサイの炒めもの」が調理されていることが確認された．これは，連想しりとり型対話戦略が，音声認識における単語の誤認識といった，通常ならシステム全体の動作を阻害するような障害に対してもロバスト性を与えることができた例であると考えられる．

生活実験では，被験者には生活中に気がついたことを用紙に記入してもらった．それらの記述から，特に音声インタフェースに関する内容を抜粋した．

- (1) ユーザが名前を正確に思い出せない素材(魚の名前など)からは連想を開始できない。
- (2) 台所仕事で手が汚れていることが多いので、音声のみでより多くのサービスを利用したい。
- (3) 他の家族もレシピを見ることができると面白い。
- (4) 数日接していると(各ロボットに)個性が出てきた。台所の Phyno はわりと私の声に応じてくれて、仲の良い友人のような感じ。

(1)は連想しりとりが取り組むべき課題を示している。本論文では、サービスに直接関連する語彙を豊富にすることで、キーワードヒット率、連想しりとり成功率を上昇させることができたが、日常生活中に適切なタイミングで連想しりとりが起動するためには、上記の語彙に加えて関連する語彙を増やしていく必要があり、その収集・構造化は大きな課題である。

(2)と(3)は、音声インタフェースの利点が現れている。(2)は家庭におけるハンズフリーインタフェースの有効性を示している。と同時に、何が出来るかをはっきりと明示しないために、ユーザにより多く機能を期待させるという特徴も示している。(3)は、被験者の子供(幼児)が「これ食べたい」などと対話に参加することがあり、複数のユーザが会話しながらシステムにアクセスするという利用形態が家庭において好感触を得たものと思われる。

(4)は、音声認識における話者適応が原因である。各部屋に設置したロボットに特に違いは設けなかったが、利用回数の多い個体に対し音声認識に適切な相対位置をユーザが学習したものと考えられる。この話者適応をロボットの個性と感じたことは、音声インタフェースに身体と子供メタファを与えた結果であると考えられ、本実験では、ロボットがユビキタス環境下における家族の一員のような存在となりうる可能性を示すことができた。

6. 結 論

本研究では、ユビキタス環境における対話型ロボットインタフェースに必要なメンタルモデルとして子供のメタファを定義し、子供のメタファに基づく対話戦略を設計・試作した。本研究は、特に子供のメタファに沿ってサービスに誘導する連想しりとり型対話戦略を提案した。連想しりとり型対話戦略は、ツリー構造で記述されたドメイン依存知識 DB を用い、幼児の連想行動を模した対話をロボットが継続することでサービスのきっかけとなる発話をユーザから誘導する。

試作した音声対話システムを用いて評価実験を行い、

連想しりとり型対話戦略の正当性を確認した。連想しりとり成功率により、システムがユーザと十分に対話を継続し、満足するサービスへユーザを誘導できることを確認した。ドメイン依存知識 DB に記述されているデータ量に対する充足性の目安となるキーワードヒット率についてもデータの増加や表現のゆらぎに対応したことにより、実用的な値を達成することができた。また、対話事例から、連想しりとり型対話戦略を用いた発話にはユーザに対する意外性の効果があり、また、意外な発話を行った場合でもユーザはある程度対話を継続してくれることが分かった。

今後は、生活実験で得られたデータを解析することで、対話中に含まれるコンテキストを抽出する方法や、誘導に必要な周辺知識について検討してゆく予定である。また、サービスのドメインを増やすとともに、より多くの被験者を用いた統計的解析手法による評価を実施してゆく予定である。

参 考 文 献

- 1) Kidd, C.D., Orr, R.J., Abowd, G.D., Atkeson, C.G., Essa, I.A., MacIntyre, B., Mynatt, E., Starner, T.E. and Newstetter, W.: The Aware Home: A Living Laboratory for Ubiquitous Computing Research, *Proc. 2nd International Workshop on Cooperative Buildings (CoBuild '99)*, Position paper (1999).
- 2) 佐藤知正, 森 武俊, 西田佳史: 平成 13 年度未踏ソフトウェア創造事業佐藤・森・西田プロジェクト研究計画。
<http://www.ics.t.u-tokyo.ac.jp/ipa/ipa2001/jpublication/satomori/rr2.html>
- 3) 独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター。
<http://www.dh.aist.go.jp/>
- 4) 美濃導彦: ゆかりプロジェクトの目的と概要 UKARI プロジェクト報告 No.1, 情報処理学会第 66 回全国大会, pp.5-5-5-8 (2004).
- 5) 山崎達也, 沢田篤史, 多鹿陽介, 大倉計美, 中尾敏康, マハダヌリシラジ, 佐野睦夫, 金田重郎: ゆかりプロジェクトにおける分散協調基盤モデルウェア UKARI プロジェクト報告 No.2, 情報処理学会第 66 回全国大会, pp.5-9-5-12 (2004).
- 6) 土井美和子: 分散環境行動 DB と場モデルに基づくユビキタスインタフェース設計 UKARI プロジェクト報告 No.3, 情報処理学会第 66 回全国大会, pp.5-13-5-16 (2004).
- 7) 上田博唯: ユビキタス生活支援のためのロボットインタフェース—UKARI プロジェクト報告 No.4, 情報処理学会第 66 回全国大会, pp.5-17-5-20 (2004).
- 8) 清水陽司, 黒橋禎夫, 木戸冬子: 大規模テキス

ト知識ベースに基づく自動質問応答 ダイアログナビ, 自然言語処理, Vol.10, No.4, pp.145-175 (2003).

- 9) 柴田博仁: 創造的デザインプロセスとしての文章作成を支援する研究, 博士論文, 東京大学大学院工学系研究科 (2002).
- 10) 折原良平: 発想支援システムの動向, 情報処理学会誌, Vol.34, No.1, pp.81-87 (1993).
- 11) 神田崇行, 佐藤留美, 才脇直樹, 石黒 浩: 対話型ロボットによる小学校での長期相互作用の試み, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.7, No.1, pp.27-37 (2005).
- 12) 神田崇行, 平野貴幸, ダニエル イートン, 石黒浩: 日常生活の場で長期相互作用する人間型対話ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.5, pp.636-647 (2004).
- 13) 大中慎一, 安藤友人, 岩沢 透: 人とのインタラクション機能を持つパーソナルロボット PaPeRo の紹介, 情報処理学会研究報告 SIG-SLP-37, Vol.2001, No.68, pp.37-42 (2001).
- 14) 上田博唯, 近間正樹, 佐竹純二, 佐藤 淳, 木戸出正繼: ユビキタスホームにおける対話インタフェースロボットの試作, 情報処理学会第 32 回モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会 (SIG-MBL), pp.239-246 (2005).
- 15) 株式会社エルネット.
<http://www.lnet.co.jp/>
- 16) 河原達也, 李 晃伸: 連続音声認識ソフトウェア Julius, 人工知能学会誌, Vol.20, No.1, pp.41-49 (2005).

(平成 17 年 5 月 31 日受付)

(平成 17 年 11 月 1 日採録)



上田 博唯

1973 年大阪大学通信工学専攻修士課程修了。同年日立製作所中央研究所入社。1988～1993 年 FRIEND21 研究センター次長兼務。1994 年日立電子(現, 日立国際電気) 開発研究

所部長。2003 年情報通信研究機構専攻研究員。画像処理, ヒューマンインタフェース, 知的映像ハンドリング, ユビキタスシステムに関する研究に従事。非破壊検査協会優秀論文賞, テレビジョン学会藤尾記念賞, 映像情報メディア学会藤尾フロンティア賞等を受賞。博士(工学)(東京大学)。電子情報通信学会フェロー。



小林 亮博(正会員)

1998 年京都大学工学部物理工学科卒業。2003 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士課程単位取得退学。現在,(独)情報通信研究機構専攻研究員。ヒューマンロボットコミュニケーションの研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, 人工知能学会, ロボット学会各会員。



佐竹 純二

1998 年岡山大学工学部情報工学科卒業。2000 年同大学院修士課程修了。2003 年同大学院博士課程修了。在学中, コンピュータビジョンの研究に従事。現在,(独)情報通信研究機構専攻研究員。ロボット対話, ヒューマンインタフェースに関する研究に取り組んでいる。電子情報通信学会会員。



近間 正樹

2004 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程中退。同年情報通信研究機構分散協調メディアグループで技術補助員を行っている。



佐藤 淳

2003 年岡山大学工学部卒業。2005 年奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程修了。同年富士通入社, 現在に至る。



木戸出正継 (フェロー)

1970年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年東京芝浦電気(現、東芝)総合研究所入社。同社総合企画部、関西研究所、東芝アメリカ社を経て、2000年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授。京都大学工学博士。パターン認識、ロボットビジョン、ヒューマンインタフェース、ウェアラブルコンピュータに関する研究に従事。電子情報通信学会フェロー、情報処理学会フェロー、IAPR(国際パターン認識協会)フェロー、電子情報通信学会業績賞、高柳記念奨励賞、等を受賞。情報処理学会関西支部長、電子情報通信学会理事、MVA国際ワークショップ組織委員長、IEEE ウェアラブルコンピュータ国際シンポジウム実行委員長等を歴任。
