

## 対話コスト最小化に基づく効率的対話制御

堂坂 浩二 安田宜仁 相川 清明

NTT コミュニケーション科学基礎研究所  
〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1  
dohsaka@atom.brl.ntt.co.jp

### あらまし

本稿では、音声対話システムが、対話時点でデータベース内に保有する知識の範囲内で効率的な対話を行うためのデュアルコスト法とよぶ対話制御方法を提案する。音声対話システムは、音声認識誤りのために、ユーザ要求の内容をユーザに確認するための「確認対話」を実施する必要がある。従来法では、ユーザがシステム知識の範囲を越えるような情報を要求した場合であっても、ユーザ発話の全文を確認するので、無駄なやり取りが増えてしまうという問題があった。この問題を解決するために、確認コストと情報伝達コストと呼ぶ2種類のコストを導入する。確認コストは確認対話の長さであり、音声認識率に依存する。情報伝達コストは、確認対話でユーザ要求を確定した後、ユーザに情報を伝達する際のシステム応答の長さであり、システム知識に依存する。デュアルコスト法は、この2つのコストの和を最小化することにより、対話を制御する方法であり、従来法が避けることができない無駄な対話を回避することができる。

キーワード: 音声対話システム, 対話制御, 対話管理

## Efficient Dialogue Control Based on Dialogue Cost Minimization

Kohji Dohsaka Norihito Yasuda Kiyooki Aikawa

NTT Communication Science Laboratories  
3-1 Morinosato-wakamiya, Atsugi, Kanagawa, 243-0198 Japan  
dohsaka@atom.brl.ntt.co.jp

### Abstract

We present a dialogue control method called the “dual-cost method”, by which a spoken dialogue system carries out an efficient dialogue within the confines of the data stored as the system’s knowledge in its database. Due to speech recognition errors, a spoken dialogue system has to carry out a “confirmation dialogue” to clarify a user request. Previous methods have a problem of invoking unnecessary confirmations, since they attempt to confirm the whole contents of a user request even though the request is beyond the system’s knowledge. To resolve this problem, we introduce the notions of confirmation cost and information transfer cost. The confirmation cost is the length of a confirmation dialogue and depends on the speech recognition rate. The information transfer cost is the length of a system response after the confirmation dialogue and depends on the system’s knowledge. The dual-cost method controls a dialogue based on the minimization of these two costs and can avoid unnecessary exchanges, which are inevitable in conventional methods.

**Key Words:** spoken dialogue system, dialogue control, dialogue management

# 1 はじめに

音声対話システムとは、ユーザとの音声対話を通して、あらかじめ決められたタスクをユーザと協同で実行するシステムである。タスクとしては、各種の予約、個人スケジュールの管理などがある。音声対話インタフェースは、人にとって親しみやすく、手や目を占有しないという利点をもつ。人とコンピュータが、円滑な音声対話を通して意思疎通できるようになれば、音声対話は理想的な人-コンピュータのインタフェースとなることが期待される。しかし、円滑な音声対話を実現するためには、音声認識誤りに対処することが必要となる。音声対話システムでは、この問題に対処するために、ユーザとの間で「確認対話」と呼ぶ対話を行い、確認対話を通してユーザ要求を確定するという方法をとることが普通である。確認対話は必須ではあるが、過度に長い確認対話は対話の円滑さを損ねるので、不必要な確認対話は避けることが望ましい。

不必要な確認対話の一つの典型は、ユーザがシステム知識の範囲を越えた情報を要求した場合に、システムがユーザ要求のすべてを逐一確認する場合に起きる。ここで、システム知識とは、システムが対話時点でデータベース内に保持しているデータの集合を意味する。また、ユーザ要求がシステム知識の範囲を越えている状況とは、システムがユーザ発話を理解できるのだけれども、ユーザが要求する情報をシステムが保有していなかったり、ユーザが要求する程度には詳細な情報を保有していないという状況である。

音声対話システムとユーザの対話は、ユーザの要求内容を確定するために確認対話を行い、その後で、確定した要求内容に応じて適切な情報をユーザに対し応答するという順序で進行する。確認対話でユーザ要求を逐一確認したところで、確認対話に続くシステム応答の長さを考慮しなければ、対話全体を効率的に実施することにはならない。システム応答の長さは、対話時点のシステム知識に依存するので、システム知識の範囲を考慮した上で、対話全体を制御する必要がある。

例として、気象情報を案内する音声対話システムを考える。今、ユーザが神奈川県に大雨警報が発表されているかどうか尋ねているとシステムが理解した状況を想定する。また、どこにも警報が発表されていない、あるいは、警報が発表されている場所は少数であるという知識をシステムがもっているとす。このとき、ユーザが関心のある場所が神奈川県であることや、警報の種別が大雨であることは、確認する必要がない。なぜなら、そういった確認なしでも、システムの応答の長さはほとんど同じであり、対話全体の長さが増大することもないからである。この場合、神奈川県、大雨といった項目は認識誤りかもしれず、それらの項目を確認すると、ユーザの訂正発話を招き、対話が不必要に長くなる危険性が高い。

音声対話システムとユーザの間で効率的な対話を実現するための対話制御法について盛んに研究が進められている [2, 4, 6, 5, 8]。これらの従来法は、音声認識結果の信頼度、音声認識率、システム理解状態といった情報を利用して、確認対話の長さを削減することに注目して

いる。しかし、確認対話に続くシステム応答の長さを含めて対話全体を効率的に実施することは行っておらず、ユーザがシステム知識の制限を越えた問い合わせをしてきた場合に、著しく無駄な対話を行ってしまうという問題点がある。

従来法の中には、強化学習を利用して最適な対話戦略を学習する手法がある [4, 5, 8]。これらの従来方法では、対話戦略の効率性を評価するための報酬関数あるいはコスト関数を定義し、システムとユーザの間の多くの対話例を使って、報酬関数を最大化あるいはコスト関数を最小化するような対話戦略が学習される。しかし、これらの従来法はシステムが対話時点で保有する知識の範囲が対話の効率性に対して及ぼす影響を報酬関数やコスト関数に組み入れてはいない。したがって、強化学習に基づく従来法によって学習される対話戦略を使っても、本稿で問題としているような無駄な対話を避けることはできない。

ユーザ発話内容が曖昧なときに、ユーザ発話内容の曖昧さを解消してもシステム応答が同一で変化しないなら、ユーザ発話内容の曖昧さを解消せずに応答を生成するという方法が提案されている [1, 7, 9]。これらの従来法は、システム応答の同一性が保証されていない場合には適用できないという問題がある。また、音声認識誤りについては考慮されていない。

そこで、ユーザ要求がシステム知識の範囲を越えている場合であっても、無駄な確認を避けて、効率的な対話を実施することを目的とした対話制御法をこれまでに提案してきた [3]。この方法では、確認対話の長さを表す確認コストと、確認対話後のシステム応答の長さを表す情報伝達コストという2つのコストを導入し、確認コストと情報伝達コストの和を最小化するように対話を制御する。確認コストは、音声認識率とユーザに対し確認する項目に依存し、情報伝達コストは、システムが対話時点で保有する知識に依存する。2種類のコストを利用する動機は、対話全体を効率的に実施するためには、確認対話の長さだけでなく、システム応答の長さを考慮する必要があるということにある。すなわち、確認対話に手間をかければかけるほど対話全体を効率的に実施できるというわけではなく、ユーザ要求確定のための手間は、システム応答の長さとのバランスによって決める必要があるということである。この2つのコストの和を最小化することにより、システム知識の制限に応じて、無駄な確認を避け、対話全体を効率的に実施することが可能となる。この提案方法は、システム応答の同一性が保証されない場合であっても、情報伝達コストの増大が確認コスト減少に見合う範囲内であれば、ユーザ発話理解結果の一部を確認しないという方法であり、従来手法 [1, 7, 9] を一般化したものとなっている。

しかし、これまでの提案方法 [3] は、システムの理解状態からユーザ要求が一意に決まることを前提としているという問題があった。本稿では、これまでの方法を発展させ、ユーザ要求が一意に決まらない状況において、確認コストと情報伝達コストの和を最小化するように対話を制御し、効率的な対話を実施する方法として、「デュ

アルコスト対話制御法」を提案する。さらに、デュアルコスト法とユーザ要求を逐一確認する従来方法における対話の効率性を比較したシミュレーション対話実験の結果を示し、デュアルコスト法が従来法よりも効率的に対話を実施できることを論じる。

## 2 音声対話システムの対話制御

音声対話システムとユーザの対話は、ユーザ要求確定フェーズとシステム情報伝達フェーズという2つの対話フェーズの間を移行しながら進行する。ユーザ要求確定フェーズにおいて、ユーザはシステムに対する要求を音声によって伝える。システムとユーザは確認対話を通して、ユーザ要求内容を確定する。ユーザ要求内容を確定した後、対話はシステム情報伝達フェーズに移行し、確定したユーザ要求にしたがって情報を伝達するためのシステム応答が生成される。

システム理解状態は、3つ組 < 属性, 値, 確定フラグ > の集合として保持される。ユーザ要求タイプの種類と属性の全体集合はタスクごとに決まっている。各ユーザ要求タイプについて、ユーザ要求の内容として含むことができる属性と、各属性がとりうる値の範囲が決まっている。属性がユーザ要求の内容として含むことができないうとき、属性はユーザ要求タイプと矛盾するといいい、属性値がユーザ要求タイプとしてとりえない値であるとき、属性値はユーザ要求タイプと矛盾するという。

本稿では気象情報案内を行う音声対話システムを想定する。ユーザ要求タイプとして、警報問い合わせ、天気問い合わせ、気温問い合わせ、降水確率問い合わせの4種類のユーザ要求タイプを考える。属性の全体集合は、場所、日、警報種別、情報種別の3つの属性から成る集合である。場所属性は、ユーザ要求にかかわらず、都道府県名を値としてとる。日属性は、ユーザ要求が天気、気温、降水確率の問い合わせであるなら、今日か明日という値をとる。日属性は、警報の問い合わせというユーザ要求と矛盾する。警報種別属性は、大雨、洪水といった値をとる。天気問い合わせ、気温問い合わせ、降水確率問い合わせの各ユーザ要求タイプとは矛盾する。情報種別属性は、ユーザ要求タイプに応じて、警報、天気、気温、降水確率という値をとる。警報という属性値は、ユーザ要求タイプが警報問い合わせであるときのみ可能であり、他のユーザ要求タイプとは矛盾する。天気、気温、降水確率という属性値についても、同様である。

確定フラグは、属性の値が確認対話により確定するまで、「未」という値をとる。確認対話により確定されると、「済」という値をとる。たとえば、ユーザが神奈川県という場所を指定したとシステムが理解したという状況を想定すると、システム理解状態は次のようになる。

$$S = \{ \langle \text{場所}, \text{神奈川県}, \text{未} \rangle \}$$

ユーザ要求確定フェーズでは、システム理解状態にしたがって、確認行動、情報要求行動のいずれかの行動を行う。確認行動とは、システム理解状態において値が与えられている属性について、ユーザに対して属性値を確

認する発話（確認発話）を行い、ユーザの肯定的な応答（「はい」）によって属性値が承認されるまで、その属性値の確認を繰り返すという行動である。ユーザは、承認発話以外に、システムの確認を訂正する発話を行うことができる。情報要求行動とは、システム理解状態において値が与えられていない属性について、ユーザに対して属性の値を要求する発話（情報要求発話）を行い、その後、その属性値の確認行動を実施するという行動である。すなわち、情報要求行動とは、一つの情報要求発話に続く確認発話の繰り返しである。

たとえば、システム理解状態  $S$  で、場所属性を確認するという確認行動をとるとすると、システムは「神奈川県ですか?」といった確認発話を行い、ユーザが肯定的な応答で承認したとシステムが認識するまで、場所属性の値の確認を続ける。

ユーザ要求確定フェーズにおいて、ユーザ要求タイプが一意に決定されており、その時点で確定しているユーザ要求内容にしたがってシステム応答を生成することが適切であると判断されると、システム情報伝達フェーズに移行する。システム情報伝達フェーズにおいて、確定済みのユーザ要求内容に応じて情報をユーザに伝達するためにシステム応答を生成するという行動を情報伝達行動と呼ぶ。

対話制御とは、対話の各時点において、対話を効率的に実施するという観点から最適なシステム行動を決定することである。システム行動としては、確認行動、情報要求行動、情報伝達行動がある。情報伝達行動を選択することは、ユーザ要求確定フェーズからシステム情報伝達フェーズへの移行を決定することと同等である。

## 3 デュアルコスト法

### 3.1 処理の流れ

デュアルコスト法は、対話の効率を確認コストと情報伝達コストの和として計量し、2つのコストの和を最小化することにより、対話を制御する方法である。確認コストと情報伝達コストの和を対話コストと呼ぶ。確認コストとは、ユーザ要求確定フェーズにおける確認対話の長さの期待値として定義され、情報伝達コストは、システム情報伝達フェーズにおけるシステム応答の長さの期待値として定義される。デュアルコスト法の対話制御手順を説明する。

(Step1) ユーザ要求確定フェーズにおいて、現時点のシステム理解状態で確定済となっている属性値と矛盾するユーザ要求タイプを排除することにより、現時点で可能なユーザ要求タイプを導き出す。可能なユーザ要求タイプごとに、可能な対話プランをすべて生成する。対話プランとは、ユーザ要求内容を確定するために確認行動と情報要求行動を繰り返し、その後、確定済のユーザ要求内容にしたがって情報伝達行動を実行するという一連の手順を記述したものである。

(Step2) ユーザ要求タイプごとに、各対話プランの確認コストと情報伝達コストを計算し、対話コスト(確認コストと情報伝達コストの和)が最小となるような対話プランを選択する。そのプランを各ユーザ要求タイプの最適プランと呼び、最適プランの対話コストを各ユーザ要求タイプの最適コストと呼ぶ。

ここで、ユーザ要求タイプが一意に決まっている場合には、その最適プランにしたがって、システム行動を選択すればよい。問題となるのは、現在のシステム理解状態からは、ユーザ要求タイプが曖昧で、一意に決めることができない場合である。この場合に対処するために、システム行動の損失という概念を導入する。一つのユーザ要求タイプを仮定するとき、システム行動の損失とは、その行動をとったがゆえに、ユーザ要求タイプの最適コストと比較して余計に費すことになるコストと定義する。その行動が最適プランに沿ったものであるならば、損失は0であるが、さもなければ、損失は正値をとる。損失という概念を用いて、次の手順に進む。

(Step3) 現時点で実行可能なシステム行動をすべて生成し、ユーザ要求タイプごとに各システム行動の損失を計算する。

(Step4) ユーザ要求タイプの確率分布に基づいて、各システム行動の損失の期待値を計算する。損失の期待値を期待損失とよぶ。最小の期待損失をもつシステム行動を選択する。

(Step5) 選択されたシステム行動を実行し、ユーザからの応答を待って、システム理解状態を更新する。

(Step6) ユーザ要求タイプが一意に決まっており、これ以上システム行動を実施しても対話コストが下がらないなら、システム情報伝達フェーズに移行する。さもなければ、(Step1)に戻る。

以下においては、例として、ユーザが場所属性を神奈川県と指定したとシステムが認識したという状況を考える。この状況は、ユーザが「神奈川県」とだけ発話したとシステムが認識した場合に相当する。システム理解状態は、2節で示したSによって表される。Sから導き出されるユーザ要求タイプは曖昧であり、警報の問い合わせ、天気問い合わせ、気温問い合わせ、降水確率問い合わせの4つの要求タイプが導き出される。また、どの場所にも警報は発表されていないとシステムは知っているとする。

### 3.2 対話プランの生成

対話プランとは、確認行動と情報要求行動の任意回の繰り返しと、それに続く一つの情報伝達行動から成る。可能なユーザ要求タイプの各々について、可能な対話プランを網羅的に生成する。ユーザ要求タイプを一つ仮定すると、ユーザ要求タイプと矛盾しない属性が決まる。その属性の中で既に値が確定したものを除いた残りの属性について、次の確認行動と情報要求行動から成るプランのみを生成する。

- (a) システム理解状態で値が与えられている属性の部分集合  $A$  を選び、 $A$  に含まれるすべての属性についての確認行動を実施する。
- (b) システム理解状態で値が与えられていない属性を1つ選び、その属性についての情報要求行動を実施する。

本稿では、属性を確認する順序によって、確認コストは変わらないと仮定する。したがって、プランの中の確認行動と情報伝達行動の順序を入れ替えても確認コストは変わらない。

情報伝達行動は、プランに含まれる確認行動と情報要求行動によってユーザ要求内容が確定したと仮定したときに、確定した要求内容に応じてユーザに対し情報を伝達するという行動である。情報伝達行動は、対話の時点でシステムが保有する知識に基づいて構成される。

システム理解状態  $S$  の下での対話プランについて考える。まず、ユーザ要求タイプが警報問い合わせの場合を想定する。可能な対話プランが多数あるが、簡単のため、情報種別を確認してから応答を行うプラン  $Plan_1$  と、場所と情報種別を確認してから応答を行うプラン  $Plan_2$  に注目する。2つのプランは次のように表記される。 $A_1 \Rightarrow A_2$  は、行動  $A_1$  に続いて、行動  $A_2$  を実行することを意味する。

$$Plan_1 := (Act_1 \Rightarrow Res_1)$$

$$Plan_2 := (Act_2 \Rightarrow Act_1 \Rightarrow Res_2)$$

ただし、

$Act_1$  := 情報種別属性についての情報要求行動

$Act_2$  := 場所属性についての確認行動

$Res_1$  := どこにも警報が発表されていないことを伝達するための情報伝達行動。

$Res_2$  := 確定された場所には警報が発表されていないことを伝達するための情報伝達行動。

ユーザ要求タイプが天気問い合わせ、気温問い合わせ、降水確率問い合わせの場合に、次の対話プランを考える。

$$Plan_3 := (Act_2 \Rightarrow Act_1 \Rightarrow Act_3 \Rightarrow Res_3),$$

ただし、

$Act_3$  := 日属性についての情報要求行動。

$Res_3$  := 確定された場所、日における天気(あるいは、気温、降水確率)を伝達するために情報伝達行動。

### 3.3 コストの計算

確認コストを計算するために、一つの確認行動あるいは情報要求行動が完了するまでに必要とされるターン数の期待値について考える。一つのターンは、システムの確認発話(例:「神奈川県ですか?」)あるいは情報要求

発話(例:「いつですか?」)と、ユーザの訂正発話(例:「香川県です」)あるいは承認発話(例:「はい」)から成る。以下において、各属性の認識率は前もって与えられていることを前提とする。属性集合に含まれるすべての属性の値を一度に正しく認識する確率を属性集合の認識率とび、各属性の認識率の積として計算できるものとする。また、システムはユーザの承認発話を常に正しく認識できるものと仮定する。

属性の集合が与えられるとき、その集合に含まれるすべての属性の値を確定するための確認行動について考える。システムとユーザの対話は、システムがすべての属性値を一度に提示することにより確認発話を行い、システムが提示した属性の値が一つでも誤っているなら、ユーザはすべての属性値を提示することにより訂正発話を行うというターンを繰り返していき、システムの提示する属性値が正しければ、ユーザは承認発話を行うという動作系列であると仮定する。属性集合の認識率を  $p$  とするとき、確認行動が完了するまでのターン数の期待値は、次の式で与えられる [10]。

$$TURN_c = \sum_{i=1}^{\infty} ip(1-p)^{(i-1)} = \frac{1}{p}$$

情報要求行動は、属性の値が与えられていないときに、最初に情報要求発話を 1 回行い、その後は確認行動と同じ動作系列をとる。したがって、情報要求行動が完了するまでのターン数の期待値は、次の式で与えられる。

$$TURN_d = 1 + TURN_c = 1 + \frac{1}{p}$$

次に、確認行動、情報要求行動の長さを考える。各行動の長さは、行動を遂行するために要する各ターンに含まれるシステム発話とユーザ発話の長さの和である。システムの一つの確認発話、情報要求発話、ユーザの一つの訂正発話の長さは、発話に含まれる属性の数であると定義する。ユーザ承認発話の長さは 1 であるとする。

確認行動の長さについて考える。確認すべき属性の数を  $m$  個とすると、システム確認発話、ユーザの訂正発話においては、常にすべての属性値が言及されると仮定しているため、最後の 1 回を除くターンには、長さ  $m$  のシステム確認発話、長さ  $m$  のユーザ訂正発話が含まれ、最後 1 回のターンには、長さ  $m$  のシステム確認発話、長さ 1 のユーザ承認発話が含まれることになる。したがって、一つの確認行動の長さは、次の式で定義される。

$$LEN_c = 2m(TURN_c - 1) + m + 1 = \frac{2m}{p} - m + 1$$

情報要求行動の長さは、次の式で定義される。

$$LEN_d = 2m(TURN_d - 1) + m + 1 = \frac{2m}{p} + m + 1$$

対話プランの確認コストは、対話プランに含まれる確認行動と情報伝達行動の長さとして定義する。

次に、情報伝達コストの算出について説明する。情報伝達コストは、情報伝達行動を実施するために生成されるシステム応答の長さの期待値であるとする。システム応答の長さは、応答に含まれる内容語の数の期待値であると定義する。たとえば、情報伝達行動が「警報はどこにも発表されていない」というシステム応答として実行されるなら、内容語として、「警報」、「どこにも」、「発表されていない」の 3 つの語を含むので、情報伝達コストは 3 となる。

対話プランによっては、確認行動や情報要求行動によって確定する属性の値が複数通りあり、対話を実際に行ってみないと値が決まらず、情報伝達行動として生成されるシステム応答も一意に決まらないという場合がある。こういった場合には、属性がとりうる値の生起確率は等確率であると仮定した上で、すべての値の組合せを考慮したときのシステム応答の長さの期待値が情報伝達コストであると定義する。たとえば、プラン  $Plan_3$  では、場所属性、日属性の値は、実際に対話を行ってみないと決まらない。 $Plan_3$  の情報伝達コストは、場所属性、日属性のとりうる値のすべて組合せを考慮したときのシステム応答の長さの期待値となる。

### 3.4 最適な対話プランの決定

(Step2) では、3.3 節で説明したコスト計算方法にしたがって、各対話プランの対話コストが計算される。

今取り上げている例において、ユーザ要求タイプが警報問い合わせである場合を考える。各属性の認識率は 0.8 であるとする。 $Plan_1$  の確認コストは、 $Act_1$  の長さと同じ。 $LEN_d$  によって、確認コストは、 $2/0.8 + 1 + 1 = 4.5$  となる。 $Res_1$  は、「どこにも警報は発表されていない」という応答文で実行されると仮定する。情報伝達コストは 3 となる。したがって、 $Plan_1$  の対話コストは 7.5 となる。 $Plan_2$  の確認コストは、 $Act_2$  と  $Act_1$  の長さの和である。 $Act_1$  の長さは  $2/0.8 + 1 + 1 = 4.5$ 、 $Act_2$  の長さは  $(2/0.8 - 1 + 1) = 2.5$ 、したがって、確認コストは 7 となる。確認行動によって確定する場所属性の値を  $v$  とするとき、 $Res_2$  は「 $v$  には警報は発表されていません」という応答文で実行されると仮定する。情報伝達コストは 3 となる。したがって、 $Plan_2$  の対話コストは 10 となる。最適プランは  $Plan_1$  であり、最適コストは 7.5 である。

次に、ユーザ要求タイプが天気問い合わせである場合を考える。ここでは、簡単のため、 $Plan_3$  が最適プランであると仮定する。これは、天気問い合わせの場合は、場所や日が未定であると、すべての場所や日についての天気情報を伝達しなければならず、情報伝達コストが極端に増大すると考えるのが自然であるからである。また、ここでは、属性の認識率は、属性の確認順序には依らないと仮定する。したがって、 $Plan_3$  に含まれる確認行動、情報伝達行動の順序を入れ替えたプランも最適プランとなる。最適プラン  $Plan_3$  の確認コストは、 $2.5 + 4.5 + 4.5 = 11.5$  となる。応答文は「晴れです」といった文であると仮定して、情報伝達コストは 1 とする。最適対話コストは 12 となる。同様に、気温問い合わせ、

降水確率問い合わせの場合も、最適プランは  $Plan_3$  と  $Plan_3$  に含まれる確認行動と情報伝達行動の順序を入れ換えた対話プランであると考えられる。

なお、ここでは、簡単のため  $Plan_3$  が最適プランであると仮定しているが、システムのデータベースに登録されている場所の数が少ない場合には、場所属性を確認することなく、すべての場所の天気情報を伝達するという対話プランが最適プランになることもありえる。

### 3.5 システム行動の選択

(Step3)では、各ユーザ要求タイプごとに、システム行動の損失が計算される。システム行動  $Act$  の損失を計算するためには、まず、システム行動  $Act$  を含むような対話プランで、最小の対話コストをもつプランが探索される。そのプランをシステム行動  $Act$  のための準最適プランとよび、その対話コストを準最適コストとよぶ。システム行動  $Act$  の損失とは、最適コストと準最適コストの差であると定義する。

例として、 $Act_1$  と  $Act_2$  の2つの行動に注目する。警報問い合わせに関して、 $Act_1$  の準最適プランは、最適プラン  $Plan_1$  に等しく、 $Act_1$  の損失は0である。 $Act_2$  の準最適プランが  $Plan_2$  であるとする、 $Act_2$  の損失は  $10 - 7.5 = 2.5$  となる。

天気問い合わせ、気温問い合わせ、降水確率問い合わせに関しては、 $Act_1$ 、 $Act_2$  の損失はいずれも0である。

次に、(Step)において期待損失が計算される。今取り上げている例では、ユーザ要求タイプの確率分布によらず、 $Act_1$  の期待損失は0であり、 $Act_2$  の期待損失は正値をとるので、 $Act_1$  が最適の行動として選択される。すなわち、ユーザが「神奈川県」といった発話を行ったとシステムが認識した場合には、対話全体を効率的に進めるという観点からは、「神奈川県ですか?」と場所の確認をするのではなく、「どういった情報をお尋ねですか?」とか「天気についてお尋ねですか?」といった情報種別を要求する発話を行うことが望ましい。

さらに複雑な例においては、期待損失を計算するためにユーザ要求タイプの確率分布が必要となる。ここでは、ユーザ要求タイプのシステム理解状態に対する適切度 [10] という概念に基づいて、ユーザ要求タイプの確率分布を近似的に求める。

現在のシステム理解状態において、各属性  $attr_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) が値  $v_i$  をとっており、各属性の認識率は  $r_i$  であるとする。このシステム理解状態から導かれる可能なユーザ要求タイプが  $REQ_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ) であるとする。このとき、ユーザ要求タイプ  $REQ_j$  と矛盾しない属性の数が  $N_{REQ_j}$ 、属性値  $v_i$  と矛盾しないユーザ要求タイプの個数が  $M_{v_i}$  とするとき、ユーザ要求タイプ  $REQ_j$  の適切度  $Relevance(REQ_j)$  を次のように定義する。

$$Relevance(REQ_j) = \frac{1}{N_{REQ_j}} \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{M_{v_i}}$$

デュアルコスト法は、各ユーザ要求タイプの適切度を正規化したものユーザ要求タイプの確率分布として用い

ている。例として取り上げているシステム理解状態  $S$  では、各ユーザ要求タイプの確率は等確率で0.25となる。したがって、 $Act_1$  の期待損失は0、 $Act_2$  の期待損失は  $2.5 \times 0.25 = 0.63$  となる。

## 4 評価

システムと模擬ユーザとの間のシミュレーション対話実験によって、デュアルコスト法の評価を行った。模擬ユーザとは、実ユーザの振舞をシミュレートしながらシステムと対話するエージェントである。各対話の初期時点において、模擬ユーザはシステムに対する要求内容を保持している。ユーザはシステムに要求内容を伝え、ユーザとシステムは確認対話を通して要求内容を確定する。要求内容が確定すると、システムは確定したユーザ要求内容に応じたデータをユーザに伝達する。システムと模擬ユーザは、音声で対話するのではなく、互いの発話内容を属性値の対のリストとして表現し、属性値の対のリストをやり取りすることによって対話を行う。ユーザの発話内容をシステムに送るときには、属性認識率に応じて属性値に誤りが含まれるように、システムの音声認識誤りをシミュレートした。

タスクとしては、2節で述べた気象情報案内タスクである。場所は50個の都市、日は今日か明日の2通りである。警報種別としては、洪水、大雨など10個の種別がある。システムは、各都市の今日、明日の天気、最高気温と最低気温、6時間ごとの降水確率のデータを保持している。また、現在どこにも警報は発表されていないことを知っている。実験で用いたシステムのデータベースの場合、天気、気温、降水確率の問い合わせに関しては、場所、日、情報種別の属性を確認することが、最適な対話プランとなり、警報の問い合わせに関しては、情報種別だけを確認することが、最適の対話プランとなる。

デュアルコスト法と比較するために、システム知識の範囲にかかわらずユーザ要求の内容を逐一確認する2つの従来方法として、従来法1、従来法2と呼ぶ対話制御方法を用いた。従来法1は、できるだけ多くの属性を一度に確定しようとする方法であり、従来法2は、属性を一つずつ確定する方法である。従来法1は次のように動作する。

(C1-1) システム理解状態から可能なユーザ要求タイプを導き出す。

(C1-2) システム理解状態において、既に値が与えられている属性があるなら、そういった属性の値をすべて一度に確定するための確認行動を実行し、(C1-4)へ移行する。さもなければ、(C1-3)へ移行する。

(C1-3) できるだけ多くのユーザ要求タイプと矛盾することがない属性を優先することにより、値が与えられていない属性の一つを選択し、その属性のための情報要求行動を実行する。

(C1-4) 選択されたシステム行動を実行し、ユーザからの応答を待って、システム理解状態を更新する。

(C1-5) ユーザ要求タイプが一意に決まっており、その要求タイプの属性値がすべて確定しているなら、システム情報伝達フェーズに移行する。さもなければ、(C1-1)に戻る。

従来法2は、従来法1の(C1-2)を次の(C2-2)に置き換えた方法である。

(C2-2) システム理解状態において、値が既に与えられている属性があるなら、それらの属性の一つを確定するための確認行動を実行し、(C1-4)へ移行する。さもなければ、(C1-3)へ移行する。

模擬ユーザの振舞は以下の通りである。

(U1) 対話の開始時点で、模擬ユーザは、システムに要求内容の一部を伝える。

(U2) システムの確認発話に対して、訂正発話か承認発話を行う。

(U3) システムの情報要求発話に対して、属性の値を伝達するための発話を行う。

(U4) システムがユーザ要求と矛盾する属性の値を要求してきたならば、ユーザはシステム発話を拒否する。

(U4)は、ユーザ要求が天気問い合わせであるにもかかわらず、システムが警報種別属性の値を要求してくるような場合に相当する。このとき、システムは現在の情報要求行動をあきらめ、別のシステム行動を選択し、実行する。別のシステム行動を選択する際には、デュアルコスト法では、損失ができるだけ小さい行動を優先して選択し、従来法1、従来法2では、(C1-3)に記述されているように、言及されている属性ができだけ多くのユーザ要求タイプと矛盾しない行動を優先して選択する。

シミュレーション対話実験では、4つのユーザ要求タイプごとに、ユーザの要求内容をランダムに生成し、属性認識率を0.5から1.0まで0.005刻みで変化させていった。各認識率において5000回のシミュレーション対話が実施された。3つの対話制御法の性能を対話の効率性の観点から比較した。対話の効率性は、タスクが完了するまでの対話の長さの平均によって評価される。対話の長さは、3.3節で述べた基準に加えて、模擬ユーザの振舞い(U4)におけるユーザ拒否発話の長さは1であるという基準にしたがって計算した。

シミュレーション対話実験の結果を示す。図1は、ユーザ要求タイプが警報問い合わせの場合における属性の認識率に応じた対話の長さの平均の推移を示しており、図2は、ユーザ要求タイプが気温問い合わせの場合における属性の認識率に応じた対話の長さの平均の推移を示している。警報問い合わせと気温問い合わせの2例を取り上げたのは、警報問い合わせの場合は、場所属性の確認を回避できるという点で、デュアルコスト法の効果が最も発揮されやすい場合であり、気温問い合わせの場合は、デュアルコストであってもすべての属性を確認せざるをえず、デュアルコスト法の効果を発揮することが困

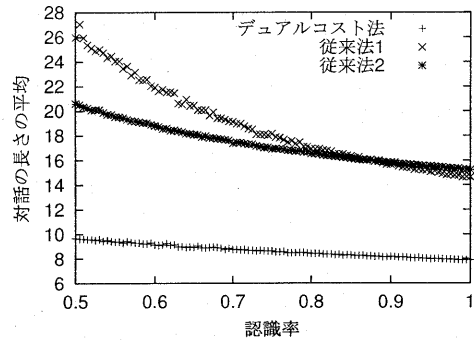


図1: ユーザ要求タイプが警報問い合わせの場合における属性の認識率に応じた対話の長さの平均

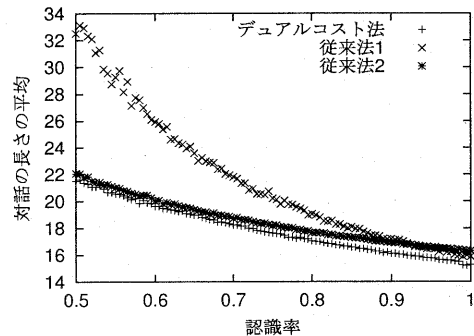


図2: ユーザ要求タイプが気温問い合わせの場合における属性の認識率に応じた対話の長さの平均

難な場合であるからである。両極端な場合を取り上げることで、デュアルコスト法にとって有利な状況では、デュアルコスト法が実際に効果を上げることができ、そうでない状況であっても、従来法に比べて対話の効率を低下させないことを実証することを目的とする。

図1から分かるように、警報問い合わせの場合、デュアルコスト法は、従来法1、従来法2と比較して、より効率的に対話を実施できた。警報がどこにも発表されていないという状況において、ユーザ要求タイプが警報問い合わせの場合には、場所属性の確認をすると対話が著しく無駄になる場合があるが、デュアルコスト法は、従来法1、従来法2が避けることができない無駄な対話を回避することによって、対話を効率的に実施できたことが分かる。

この実験においては、システムは模擬ユーザ発話を正しく認識できるとは限らず、模擬ユーザが警報の問い合わせを行ったとしても、システムは天気、気温、降水確率の問い合わせであると誤認識する場合がある。また、ユーザは対話開始時点において要求内容のすべてを伝え

るとは限らない。そのような場合には、システム理解状態からはユーザ要求タイプは警報問い合わせであるとして一意に決定することはできないが、デュアルコスト法は、期待損失という概念を活用することによって、対話全体の効率性を向上させるように対話を制御できたことが分かる。

図2から分かるように、気温問い合わせの場合には、デュアルコスト法による対話の効率性は、従来法2とほぼ同じである。これは、気温問い合わせの場合には、デュアルコスト法であろうと、場所属性、日属性、情報種別属性をすべて確認しなければならないからである。システム知識の範囲によらずユーザ要求を逐一確認しなければならないような状況であっても、デュアルコスト法が対話の効率を低下させることはないという意味で、これは前向きな結果である。

なお、図1、図2の双方において、属性認識率が低い状況では、従来法1の効率が極端に低い。これは、認識率が低い状況では、できるだけ多くの属性の値を一度に確定するという従来法1の戦略が、模擬ユーザからの多くの訂正発話を引き起こしてしまうため、不利に働くからである。認識率が低い状況では、属性の値を1個ずつ確定するという従来法2の戦略の方が有利に働く。また、図2において、従来法2が、属性認識率が1.0に近づくと、デュアルコスト法より効率が低下していくのは、認識率が高い状況では、複数の属性の値をまとめて確定した方が有利であるにもかかわらず、従来法2が属性の値を1個ずつ確定する戦略をとるからである。デュアルコスト法は、認識率に応じて、一度に値を確定する属性の組合せを変えることができる。

## 5 おわりに

本稿では、音声対話システムが保有する知識の範囲内でユーザとの間で効率的な対話を実施するための対話制御法として、デュアルコスト法を提案した。デュアルコスト法は、対話の各時点において、確認コストと情報伝達コストという2つのコストの和を最小化するという原理に基づいて、システム行動を選択する。このことにより、デュアルコスト法は、対話全体の長さを最小化するように対話を制御し、従来の方法では避けることができなかった無駄な対話を回避することができる。また、システムと模擬ユーザの間のシミュレーション対話実験によって、デュアルコスト法が、ユーザ要求を逐一確認する従来法と比較して、より効率的に対話を実施できることを実証した。

謝辞 日頃よりご指導いただきNTT先端技術総合研究所 東倉洋一所長、コミュニケーション科学基礎研究所 石井健一郎所長、メディア情報研究部 萩田紀博部長、熱心に討論して下さったマルチモーダル対話研究グループの諸氏に感謝致します。

## 参考文献

- [1] Liliana Ardissono. *Dynamic User Modeling and Plan Recognition in Dialogue*. PhD thesis, Università di Torino, 1996.
- [2] Jennifer Chu-Carroll. Mimic: an adaptive mixed initiative spoken dialogue system for information queries. In *Proc. the 6th Applied Natural Language Processing (ANLP-2000)*, pp. 97-104, 2000.
- [3] Kohji Dohsaka, Norhito Yasuda, Noboru Miyazaki, Mikio Nakano, and Kiyooki Aikawa. An efficient dialogue control method under system's limited knowledge. In *Proc. ICSLP-2000*, Vol. 2, pp. 739-742, 2000.
- [4] Esther Levin, Roberto Pieraccini, and Wieland Eckert. Using markov decision process for learning dialogue strategies. In *Proc. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 1998.
- [5] Diane J. Litman, Michael S. Kearns, Satinder Singh, and Marilyn A. Walker. Automatic optimization of dialogue management. In *Proc. the 18th International Conference on Computational Linguistics (COLING-2000)*, 2000.
- [6] Yasuhisa Niimi and Yutaka Kobayashi. Dialog control strategy based on the reliability of speech recognition. In *Proc. International Conference on Spoken Language Processing (ICSLP)*, 1996.
- [7] Bhavani Raskutti and Ingrid Zukerman. Query and response generation during information-seeking interactions. In *Proc. of the 4th International User Modelling Conference*, pp. 25-30, 1994.
- [8] Nicholas Roy, Joelle Pineau, and Sebastian Thrun. Spoken dialogue management using probabilistic reasoning. In *Proc. the 38th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)*, 2000.
- [9] Peter van Beek and Robin Cohen. Resolving plan ambiguity for cooperative response generation. In *Proc. the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-91)*, pp. 938-944, 1991.
- [10] 安田宜仁, 堂坂浩二, 相川清明. タスク適応型高効率対話制御法. 情処研究会報告, 第 SLP-35-13 巻, 2001.