

# 対話コスト最小化原理に基づく対話制御

堂坂浩二 相川清明

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

## 1 はじめに

音声対話システムとは、ユーザとの音声による対話を通して、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。人とコンピュータが、人にとって親しみやすい自然な音声対話を通して意思疎通できるようにすれば、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。

音声対話システムは、ユーザの音声を必ずしも正しく認識できるとは限らない。このため、ユーザの音声を認識した結果をユーザに対して確認するための対話（確認対話）を実施することが必要となる。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、無駄な確認対話は避けることが望ましい。

典型的な無駄な確認対話は、ユーザがシステムの知識の制限を超えた要求を行うときに起きる [3]。気象情報を案内する音声対話システムを例にとる。システムは、警報がどこにも発表されていないと知っており、ユーザ発話内容が「神奈川県の警報は？」であると理解されたという状況を想定する。このとき「神奈川県」を確認することは無駄である。なぜなら、場所を確認してもしなくても、システムの応答の長さはほとんど同じであり、確認後にユーザに情報を伝達する際の手間は変わらないからである。

こういった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、確認を行うときの手間（確認コスト）と確認後に情報を伝達するときの手間（情報伝達コスト）の和を対話コストととらえ、対話コストを最小化するように対話を制御する。どれほどの確認コストをかけてよいかは、情報伝達コストとの兼ね合いで決まり、情報伝達コストは、システム知識の状態に大きく依存するのである。対話制御の従来法としては、機械学習によって最適なシステム行動を選択する方法 [4] や、対話の各時点の状態に対して確認戦略を適応させる方法 [1] が提案されているが、いずれもシステム知識の制限を考慮しておらず、本稿で考察しているような無駄な確認を避けることはできない。

しかし、従来方法 [3] は、システムの理解状態からユーザ要求を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。たとえば、ユーザが「神奈川県」と発話したとシステムが理解したとする。ユーザ要求は、警報、天気、気温、降水確率のいずれを問い合わせしているものなのか一意に決めることはできない。このとき、システムは、場所を確認すべきだろうか、それとも、ユーザが問い合わせている情報の種別を確認すべきだろうか。ユーザが警報について問い合わせしていると仮定すると、場所の確認は無駄となる。一方、ユーザが天気、気温、降水確率について問い合わせ

ているなら、場所の確認は無駄にはならない。場所を確認しないと膨大な情報（すべての場所の気象情報）を伝えることになるからである。

本稿では、これまで方法 [3] 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、対話コスト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。

## 2 音声対話システム

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は、システムはユーザの音声からユーザ要求内容を理解し、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。ユーザ要求の種類と属性の全体集合はタスクごとに決まっている。さらに、各ユーザ要求について、属性がとりうる値の範囲が決まっている。属性値がユーザ要求の内容としてとりえない値であるとき、属性値はユーザ要求と矛盾するという。また、各ユーザ要求について、ユーザ要求の内容として含むことができる属性とそうでない属性が決まっている。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、属性はユーザ要求と矛盾するという。

ここで想定している気象情報案内を行う音声対話システムでは、ユーザ要求として、警報の問い合わせ、天気の問い合わせ、気温の問い合わせ、降水確率の問い合わせの4種類のユーザ要求を考える。属性の全体集合は、場所、日、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。情報種別属性は、ユーザ要求が警報の問い合わせであるなら、警報という値をとり、警報という属性値は、他のユーザ要求とは矛盾する。天気、気温、降水確率についても同様である。

確定フラグは、属性の値がユーザの承認により確定するまで、「未」という値をとり、ユーザ承認によって確定されると、「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。

$$S_1 = \{ \langle \text{場所}, \text{神奈川県}, \text{未} \rangle \}$$

システム理解状態にしたがって、システムは、ユーザに対して確認行動か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。すなわち確認行動とは、確認発話の繰り返しである。

ユーザは、肯定発話（例：「はい」）によってシステムの確認発話を承認するか、あるいは、システムが提示している属性値を訂正するかのいずれかであるとする。ユーザが肯定発話で承認するとき、ユーザ肯定発話は常に正しく認識されると仮定する。

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。

ユーザは、システムが確認あるいは情報要求を行っている属性のすべてが、ユーザ要求と矛盾するときには、システムの確認発話や情報要求発話を拒否する発話（例：「いいえ」）を行い、システムはユーザの拒否発話を常に正しく認識できるとする。

たとえば、システム理解状態  $S_1$  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？」と確認発話を行い、ユーザが「はい」と承認したと理解されるまで、場所属性の値の確認を行う。もし、 $S_1$  におけるシステム確認発話「神奈川県ですか？」に対して、ユーザが肯定発話で応じたこととすると、システム理解状態は次のようになる。

$S_2 = \{< \text{場所}, \text{神奈川県}, \text{済} >\}$

システム情報伝達フェーズでは、ユーザ要求確定フェーズで確定した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。

### 3 デュアルコスト対話制御法

#### 3.1 概観

デュアルコスト対話制御法は、対話のコストを確認コストと情報伝達コストの和と捉え、ユーザ要求確定フェーズの各時点において、対話コストを最小化するという制約の下でシステムの適切な行動（確認あるいは情報要求）を決定する方法である。対話制御は次のステップに従って行う。

(ステップ1) システム理解状態から可能なユーザ要求を導き出す。

(ステップ2) 可能なユーザ要求ごとに、対話コストを最小化するという制約の下で、ユーザ要求内容を決定するためのシステム行動列を決定する。この行動列をユーザ要求のコスト最小確認プランと呼び、そのときの対話コストをユーザ要求の最小対話コストと呼ぶ。

(ステップ3) ユーザ要求ごとに決まった最小対話コストとユーザ要求の確率分布に基づいて、適切なシステム

行動を選択する。

(ステップ4) 選択したシステム行動を実行し、ユーザ応答を理解することによりシステム理解状態を更新する。

(ステップ5) 可能なユーザ要求が唯一に決まっており、これ以上行動を繰り返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。

(ステップ1)で、可能なユーザ要求とは、タスクにおける全ユーザ要求の集合から、システム理解状態において確定している属性値と矛盾するユーザ要求を除いたものである。たとえば、システム理解状態  $S_1$  を想定すると、可能なユーザ要求は、現タスクのすべてのユーザ要求（警報、天気、気温、降水確率、それぞれの問い合わせ）である。

(ステップ2)以降で確認コストを計算するとき、ある属性集合に含まれる属性の値を認識する際の認識率が与えられているとする。また、現在のシステム理解状態に基づいて、可能なユーザ要求の各々の出現確率が与えられているとする。本稿では、文献[5]にしたがって、出現確率を計算するとし、詳細については省略する。

以下において、属性集合の認識率を{情報種別属性}が0.9、{場所属性}が0.5、{日属性}が0.9であるとする。また、システム理解状態  $S_1$  においては、可能な4つのユーザ要求は等確率0.25で生起すると仮定する。

#### 3.2 確認プランの生成

(ステップ2)では、可能なユーザ要求REQごとに、確認プランを生成する。本稿では、以下の行動の組み合わせから成る確認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  $Y$  を選び、 $Y$  に含まれる属性の値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個だけ含む属性集合  $Y$  を選び、 $Y$  に含まれる属性の値の情報要求行動を実施する。

たとえば、システム理解状態が  $S_1$  であり、ユーザ要求が警報の問い合わせである場合を想定する。このとき可能な確認プランは次の3つである。

- ( $PL_1$ ) 情報種別属性の情報要求
- ( $PL_2$ ) 情報種別属性の情報要求  $\Rightarrow$  場所属性の確認
- ( $PL_3$ ) 場所属性の確認  $\Rightarrow$  情報種別属性の情報要求

$PL_1$  は、情報種別属性の値のみを確定するプランであり、 $PL_2$ 、 $PL_3$  は場所属性と情報種別属性の双方の値を確定するプランである。

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、 $PL_1$ 、 $PL_2$ 、 $PL_3$  以外に、次のようなプラン  $PL_4$  も生成される。

- ( $PL_4$ ) 場所属性の確認  $\Rightarrow$  日属性の情報要求  $\Rightarrow$  情報種別属性の情報要求

この他に、 $PL_4$  に含まれる各行動を任意の順に並べ替えたプランも生成される。

### 3.3 対話コストの計算

確認コストとは、ユーザが要求  $REQ$  をもつと想定したとき、確認プラン  $PL$  を実施する際に、システムが遂行すべき発話（確認発話あるいは情報要求発話）の総数の期待値であるとする。ユーザが要求  $REQ$  をもつという想定の下での確認プラン  $PL$  の確認コストを  $ConfCost(PL, REQ)$  と書く。

確認プランに含まれる行動は、(a), (b) のいずれかである。そこで、行動 (a), (b) に含まれるシステム発話の総数の期待値について考える。(a), (b) で確認あるいは情報要求する属性の集合を  $X$  とおくと、次の場合分けを行う。

- (1) 属性集合  $X$  に含まれる属性のうち、ユーザ要求  $REQ$  と矛盾しない属性の集合を  $Y$  とするとき、属性集合  $Y$  が空でない。
- (2) 属性集合  $X$  に含まれる属性のすべてがユーザ要求  $REQ$  と矛盾する。

(1) が成立するとき、(a) の確認行動に含まれるシステム発話数の期待値は、属性集合  $Y$  の認識率を  $p$  とするとき、次の式で与えられる [5]。

$$\sum_{i=0}^{\infty} p(1-p)^i = \frac{1}{p}$$

(1) が成立するとき、(b) の情報要求行動に含まれるシステム発話数の期待値は、次の式で与えられる [5]。

$$1 + \frac{1}{p}$$

(2) が成立するとき、(a), (b) いずれの行動に含まれるシステム発話数は1である。

次に、情報伝達コストの計算について説明する。ユーザ要求が  $REQ$  であり、確認プラン  $PL$  の実施が終了したという想定の下で、システムがユーザ要求  $REQ$  に応じて適切な情報を伝達するために応答するときの情報伝達コストを考える。この情報伝達コストを  $InfCost(PL, REQ)$  と書く。

まず、システム応答内容の情報伝達コストを定義する。システム応答内容は、属性と値の対の集合で表現される [3]。システム応答内容に含まれる値のうち、システム理解状態に含まれていない値を新情報と呼ぶ。このとき、システム応答内容の情報伝達コストは、システム応答内容に含まれる新情報の延べ数であると定義する。

次に、情報伝達コスト  $InfCost(PL, REQ)$  を定義する。第一に、現在のシステム理解状態において、確認プラン  $PL$  によって値を確定しようとするすべての属性に値が与えられている場合を考える。このとき、システム応答内容は一つに決まり、 $InfCost(PL, REQ)$  は、システム応答内容の情報伝達コストと等しいと定義する。

第二に、確認プラン  $PL$  によって値を確定しようとする属性の中に、システム理解状態において値が与えられていない属性が存在する場合を考える。このとき、値が与えられていない属性に関しては、属性がとりうるすべての値

に関して、システム応答内容の情報伝達コストを計算する。属性がとりうる値の生起確率は等確率であるとした上で、 $InfCost(PL, REQ)$  は、可能なすべてのシステム応答内容の情報伝達コストの期待値であると定義する。

たとえば、ユーザ要求が天気の間い合わせであり、現在のシステム理解状態において、日属性は「明日」であると分かっているとす。また、確認プランは、場所、日、情報種別の3つの属性を確定することを目指すプランであるとする。このとき、情報伝達コストを計算するためには、すべての場所に関して、明日の天気を伝達するための応答内容を生成する。たとえば、可能な場所として「神奈川県」があるなら、システム理解状態において場所属性が「神奈川県」であると仮定して、「神奈川県の明日の天気は晴れである」という内容を生成する。この内容に含まれる新情報は、「晴れ」という値のみであるので、情報伝達コストは1となる。このように、可能な場所に関して、応答内容を生成し、その情報伝達コストの期待値を計算する。

### 3.4 コスト最小確認プランの決定

(ステップ2)では、ユーザ要求  $REQ$  を想定するとき、対話コストを最小とするコスト最小確認プランを選ぶ。その対話コストをユーザ要求  $REQ$  の最小対話コスト  $Cost(REQ)$  と呼ぶ。

たとえば、システム理解状態が  $S_1$  であり、ユーザ要求が警報の間い合わせであると想定する。 $PL_1, PL_2, PL_3$  の確認コストは、次のようになる。

$$ConfCost(PL_1, \text{警報問合せ}) = 1 + 1/0.9 = 2.1$$

$$ConfCost(PL_2, \text{警報問合せ}) = 1 + 1/0.9 + 1/0.5 = 4.1$$

$$ConfCost(PL_3, \text{警報問合せ}) = 1/0.5 + 1 + 1/0.9 = 4.1$$

次に情報伝達コストを計算する。システムがどこにも警報が出ていないと知っているという状況を想定する。確認プラン  $PL_1$  で情報種別が警報であると確定したとき、システム応答内容は「警報は発表されていない」という内容となる。このとき、新情報は「発表されていない」の1つであり、情報伝達コストは1となる。次に、確認プラン  $PL_2, PL_3$  で場所属性の値と情報種別属性の双方の値が確定したときを考える。確定した場所属性の値を  $LOC$  とすると、システム応答内容は、「 $LOC$  に警報は発表されていない」という内容となる。その時点のシステム理解状態には、警報という値も場所  $LOC$  という値も含まれているから、新情報は「発表されていない」の1個となり、情報伝達コストは1となる。したがって、コスト最小化—確認プランは  $PL_1$  であり、最小対話コストは3.1となる。

ユーザ要求が天気であると想定したときを考える。直感的に考えて、場所や日の属性が決まらなると、対話コストの和が極端に増大するので、コスト最小化—確認プランは、 $PL_4$ 、あるいは、 $PL_4$  に含まれる行動を並べ替えたものである。 $PL_4$  の確認コストは、 $6.2 (= 1/0.5 + 1 + 1/0.9 + 1 + 1/0.9)$  である。簡単のため情報伝達コストを1であるとする、最小対話コストは7.2となる。

## 4 システムの次行動の決定

(ステップ3)では、システムが現時点の理解状態において実行できる可能なシステム行動の中から、次に実行すべき行動の一つを選択する。

システム行動の選択基準を説明するために、行動  $ACT_j$  が選択された状況を仮定する。このとき、システムは、まず最初に行動  $ACT_j$  を実行することになる。ところが、(ステップ2)で各ユーザ要求ごとにコスト最小確認プランと最小対話コストが既に決定されている。そのコスト最小確認プランでは、最初に行為  $ACT_j$  を実行するとは限らないので、行動  $ACT_j$  を最初に実行してしまうと、最小対話コストよりも大きなコストをかけてユーザ要求を確定しなければならぬ場合が生じる。このとき、ユーザ要求  $REQ_i$  において、行動  $ACT_j$  を最初に実行することにより被る対話コストの増分をユーザ要求  $REQ_i$  における行動  $ACT_j$  の損失  $Loss(ACT_j, REQ_i)$  と呼ぶ。さらに、ユーザ要求の確率分布を考慮した  $Loss(ACT_j, REQ)$  の期待値を行動  $ACT_j$  の損失  $Loss(ACT_j)$  と呼ぶ。(ステップ3)では損失  $Loss(ACT_j)$  が最小となる行動を選択する。

損失の計算方法を説明する。  $m$  個の可能なシステム行動  $ACT_j (j = 1, \dots, m)$ ,  $n$  個のユーザ要求  $REQ_i (i = 1, \dots, n)$  があるとす。各ユーザ要求  $REQ_i$  の下で  $ACT_j$  を最初に実施するという制約の下で、対話コストを最小化する確認プランを求め。この確認プランを行動  $ACT_j$  に制約されたコスト最小確認プランと呼び、その対話コストを行動  $ACT_j$  に制約された最小対話コスト  $Cost(REQ_i, ACT_j)$  と呼ぶ。(ステップ2)で決定された最小対話コスト  $Cost(REQ_i)$  が与えられるとき、損失  $Loss(ACT_j, REQ_i)$  は次の式で与えられる。

$$Cost(REQ_i, ACT_j) - Cost(REQ_i)$$

ユーザ要求  $REQ_i$  の確率  $Prob_i$  が与えられるとき、行動  $ACT_j$  の損失  $Loss(ACT_j)$  は次のように定義される。

$$Loss(ACT_j) = \sum_{i=1}^n Prob_i Loss(ACT_j, REQ_i)$$

例として、システム理解状態  $S_1$  において、情報種別属性の値を要求するという行動  $ACT_1$  と、神奈川県を確認するという行動  $ACT_2$  をとりあげる。

まず、行動  $ACT_1$  の損失について考える。ユーザ要求が警報の問合せであるときの  $ACT_1$  の損失

$$L_1 = Loss(ACT_1, \text{警報問合せ})$$

は0である。なぜなら、警報問合せの下でのコスト最小確認プラン  $PL_1$  は、情報種別属性の要求を最初に実行するプランであるからである。  $L_1$  と同様に、ユーザ要求が天気、気温、降水確率の問合せであるときも、  $ACT_1$  の損失は0になる。したがって、行動  $ACT_1$  の損失は0となる。

次に、行動  $ACT_2$  の損失について考える。ユーザ要求が警報の問合せであるときの  $ACT_2$  の損失

$$L_2 = Loss(ACT_2, \text{警報問合せ})$$

は正の値をもつ。なぜなら、  $ACT_2$  を最初に実行すること

によって、確認プラン  $PL_1$  を選ぶことができなくなるからである。3.4節で示した結果により、  $ACT_2$  に制約されたコスト最小確認プランは  $PL_3$  であり、  $ACT_2$  に制約された最小対話コストは4.1となる。確認プラン  $PL_1$  が与える最小対話コストは2.1であるから、損失  $L_2$  は2となる。ユーザ要求が天気、気温、降水確率の問合せであるときは、  $ACT_2$  の損失は0である。4つのユーザ要求は等確率(0.25)であると仮定しているので、行動  $ACT_2$  の損失は0.5となる。

結局、損失が0である  $ACT_1$  が次の行動として選択される。すなわち、ユーザが神奈川県とだけ発話したと認識されている状況においては、「神奈川県ですか?」と場所を確認するのではなく、「どんな情報をお尋ねですか?」と情報要求発話を行うか、あるいは、情報種別の値を任意に選び、「警報ですか?」といった確認発話の形をとることにより、情報種別の値を要求することが、対話コストの観点からは適切な行動選択であることになる。

## 5 おわりに

本稿では、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にするという原理に基づいて、効率的な対話を実施するための対話制御法「デュアルコスト対話制御法」を提案した。この方法によって、システムは、音声認識率とシステム知識の限界の双方を考慮した上で、無駄な確認を避けることができる。

謝辞: 日頃よりご指導いただくメディア情報研究部 萩田紀博部長、熱心に討論してくださる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] Jennifer Chu-Carroll. Mimic: an adaptive mixed initiative spoken dialogue system for information queries. In *Proc. of ANLP-2000*, pp. 97-104, 2000.
- [2] 堂坂浩二, 島津明. タスク指向型対話における漸次的発話生成モデル. 情処論文誌, vol.37, no.12, pp.2190-2220, 1996.
- [3] Kohji Dohsaka, Norhito Yasuda, Noboru Miyazaki, Mikio Nakano, and Kiyooki Aikawa. An efficient dialogue control method under system's limited knowledge. In *Proc. of ICSLP-2000*, vol.2, pp.739-742, 2000.
- [4] Satinder Singh, Michael S. Kearns, Diane J. Litman, and Marilyn A. Walker. Empirical evaluation of a reinforcement learning spoken dialogue system. In *Proc. of AAAI-2000*, pp. 645-651, 2000.
- [5] 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, SLP-35-13, 2001.