

情報の授受に基づく対話モデルについて

高橋 和子

〒 619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2

ATR 音声翻訳通信研究所 第四研究室

(Phone) +81-774-95-1351

(Fax) +81-774-95-1308

(e-mail) ktaka@itl.atr.co.jp

情報収集を目的とする対話に対して、情報の授受に焦点をあてた対話モデルを提案する。従来の対話モデルはプランや行為を基本としたものが多かったが、ある情報を得ることを目的とする対話の場合、行為よりも情報の授受に基づいて考えた方が自然である。本論文では「知る必要がある」という新しい様相オペレータを導入することによって、目的を遂行する側と協調的応答をする側双方に対して発話の説明が統一的にできることを示す。また、確認や聞き間違いの発見の過程もこの枠組みによって説明ができることを示す。

On a Dialogue Model Based on Information Transfer

Kazuko TAKAHASHI

ATR Interpreting Telecommunications Research Laboratories

2-2, Hikaridai, Seika-cho, Souraku-gun, Kyoto, 619-0288, JAPAN

(Phone) +81-774-95-1351

(Fax) +81-774-95-1308

(e-mail) ktaka@itl.atr.co.jp

We propose a dialogue model based on information transfer. In most classical models, plan-based approach is used, in which a dialogue is regarded as a sequence of actions. However, it is more natural to regard it as a sequence of inner states representing agents' knowledge and belief, especially for the dialogue whose goal is a kind of information acquisition. In this paper, we introduce a new modal operator *need-to-know*, and propose the framework based on knowledge and belief. It can give an account for the utterances of requesting-information and giving-information in a uniform manner. We also show that we can explain the processes of confirmation and the detection of mishearing in this framework.

1 はじめに

対話理解については、これまで様々なモデルが提案されてきており、その多くは雑談ではなく目的のある対話を対象としている。これまでに提案されているモデルでは対話をプランとしてとらえ、各発話はゴールを達成するための行為と結び付けて考えているものが多い [All95] [GS90]。しかしながら、ホテルの予約、会議の登録、道案内といった情報収集を目的とする対話の場合、発話是对話者の知識や信念に影響を与える情報の授受と考えた方が自然である。この場合、対話は知識や信念といった心的状態の遷移としてとらえることができる。また、プランに基づくモデルでは、対話者が基本的なプランを持っておりそれに基づいて発話するとされているが、実際にはプランにはないが前発話の影響で初めて生起される発話も多い。このような場合に柔軟に対応するためには、対話者が内部状態を持って発話を動的に決めるようなモデルの方が望ましい。

知識、信念、意図といった心的状態を使ったモデルの研究も多くなされている。Cohen and Levesque は信念と意図 (intention) を使い、発話をその前後の事件 (event) の列として説明した [CL90a][CL90b]。Smith and Cohen は、この理論に基づいて、多エージェント記述言語に意味を与えた [SC94]。Rao and Georgiff は BDI モデルを提唱し、信念、要求、意図それぞれの世界間の推移によって発話の起こるしくみを説明した [RG91]。Haddadi は BDI モデルを多エージェントに拡張した [Had95]。Sadek は、心的状態を使ったモデルを提案し、音声対話による質疑応答システムへの応用を示した [SBP97]。これらのモデルでは各発話の生起した原因やその仕組みを説明できるが、発話に至る過程を非常に詳細なレベルでとらえているため、現実の対話システムに組み込むには問題がある。しかしながら、実際の対話でそれほど微妙な心的状況を考慮しているのかというと、はなはだ疑問であり、少なくとも情報収集を目的とする対話に限れば、それほど複雑な推論をしなくてももっと単純なモデルで多くの例に適用

可能と思われる。

一方、対話システムの研究ではユーザ主導の発話に対してシステムがいかに協調的応答をするかに重点がおかれ、ユーザがなぜそのような質問や要求を発したかに対する研究はあまりない。

本稿では、情報収集を目的とする対話に対して、情報の授受に焦点をあてた対話モデルを提案し、対話によってどのような情報が伝わり、何に影響されどのようにして発話が生起するのかを議論する。

発話の生起を説明するために「知らねばならない」という様相オペレータを導入し、これを使って発話生成規則を記述する。発話は相手の要求に対する情報提供として生起されるか、または得られた情報をもとに発話生成規則によって生起されるかのいずれかである。この枠組みによって、情報要求側の発話も情報提供側の発話も統一的に説明することができる。

本稿は以下のように構成される。まず、2章で準備をした後、3章で対話モデルの枠組みを示す。次に、4章で実際の対話解析への応用を示し、5章で情報が正確に伝わらない場合の扱いについて論じる。最後に6章で結論を述べる。

また、以下では命題論理における基本的な知識を既知のものと仮定する。

2 準備

内部状態を表現するために、ここでは三つの様相演算子を導入する。

- $K(\alpha, \varphi)$ - α が φ を知っている
- $B(\alpha, \varphi)$ - α が φ を信じている
- $N(\alpha, \varphi)$ - α が φ を知る必要がある

K, B は心的状況を示すのに一般によく使われる演算子であり、公理系としてはそれぞれ様相論理の公理系 $S4, KD45$ を持つことが知られている [FH88]。これらに加えて本稿では N という演算子を導入する。 N は発話を引き起こす原因を記述するものであり、公理系としては、 KD に相当する (付録参照)。

様相演算子を含まない式を事実 (fact) と呼び、様相演算子を含む心的状態を表す式と区別する。

3 対話モデル

3.1 記述言語

発話は要求 (*request*) と告知 (*inform*) の2種類で記述する。

まず、発話はすべて相手に (少なくとも文字上は) 正しく伝わるものと仮定する。以下では対話はエージェント α と β の二者の間で行なわれているものとする。

(1) 情報要求 - $request(\alpha, \beta, P)$

- 前条件: $B(\alpha, N(\alpha, P)) \wedge \neg K(\alpha, P)$

- 後条件: $K(\beta, N(\alpha, P))$

もしエージェント α が事実 P を知る必要があるにもかかわらず現在知らないのならば、 α は相手のエージェント β に P に関する情報を要求し、その結果、 β は α が P を知る必要があることを知る。

(2) 情報提供 - $inform(\alpha, \beta, P)$

- 前条件 $B(\alpha, N(\beta, P)) \wedge K(\alpha, P)$

- 後条件 $K(\beta, K(\alpha, P))$

もしエージェント β が事実 P を知る必要があるとエージェント α が思っており、自分はその情報を知っていれば、 α は β に P に関する情報を告知する。その結果、 β は α が P を知っていることを知る。この時、公理により、 $K(\beta, P)$ も成り立つことに注意。

3.2 タスク依存の知識

各エージェントは一般の公理や推論規則に加えて、タスク依存の知識として背景知識および発話生成規則を持つ。

3.2.1 背景知識

$$P_1 \wedge \dots \wedge P_n \rightarrow Q_1 \wedge \dots \wedge Q_m$$

ただし、 $P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_m$ は事実である。

たとえば、ホテルの予約において、人数、日程、部屋のタイプが決まり、かつ条件を満たす部屋があいていれば予約は達成されるという背景知識は、以下のように表される。

例 1 背景知識

$$number \wedge dates \wedge roomtype \wedge available \rightarrow reserved$$

3.2.2 発話生成規則

一般に、対話者は相手に与える情報を最初から持っていたとしても、その情報をいつ与えてもよいわけではない。たとえば、ホテル予約の場面において、客はまず予約の意志を伝えてから部屋のタイプや日程に関する情報を与えるだろうし、ホテル側は希望の部屋がとれて初めて支払い方法や到着時間についての問いを発するのが普通だろう。このような発話の順序に対する制約を、発話生成規則として以下のように記述する。

$$K(\alpha, P_1) \wedge \dots \wedge K(\alpha, P_n) \rightarrow B(\alpha, N(\alpha_1, Q_1)) \wedge \dots \wedge B(\alpha, N(\alpha_m, Q_m))$$

ただし、 $P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_m$ は事実、 $\alpha_i (i = 1, \dots, m)$ は α または β である。

この式は、エージェント α が P_1, \dots, P_n を知れば、今度はエージェント $\alpha_i (i = 1, \dots, m)$ が Q_i を知る必要があることを示す。各発話生成規則は一つの対話に対し高々1回適用される。

たとえば、ホテルフロント (c で表す) は、宿泊の要求 ($DesRes$) を知れば、希望の人数、日程、部屋のタイプを知る必要がある、という知識は以下のように表される。

例 2 発話生成規則

$$K(c, DesRes) \rightarrow B(c, N(c, number)) \wedge B(c, N(c, dates)) \wedge B(c, N(c, roomType))$$

3.3 状態遷移

3.3.1 内部状態

各エージェントは対話の進行とともに変化する内部状態を持つ。内部状態はその時点における知識と信念の集合になっており、各要素は $K(\alpha, \varphi), B(\alpha, \varphi)$ のいずれかの形で表現

される。ただし、 α はエージェント、 φ は事実または様相演算子を含む式である。

発話 $u_i (i = 1, \dots, n)$ によって内部状態は S_{i-1} から S_i へ遷移する。すると、対話は以下のような内部状態の有限列に相当する。

$$S_0 \xrightarrow{u_1} S_1 \xrightarrow{u_2} \dots \xrightarrow{u_n} S_n$$

初期状態

$$S_0 = \{K(a, P_1), \dots, K(a, P_n), \\ K(b, Q_1), \dots, K(b, Q_m), \\ K(a, N(\alpha, P))\}$$

a は情報収集意図を持つエージェント、 b はその相手であり、 $P_1, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_m, P$ は事実である。 α は a または b である。すなわち、 a, b の知識をすべて記述し、さらに α が P を知る必要があることを a が知っているということを記述した内部状態から対話が始まる。

最初の発話は $inform(a, b, P)$ または $request(a, b, P)$ になる。

ゴール

ゴールは $K(a, P)$ と表される。ただし、 a は情報収集意図を持つエージェント、 P は獲得したい情報である。

対話の成功

ある $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in S_n$ に対して、

1. $\neg(\alpha_1, \dots, \alpha_n \rightarrow false)$
2. $\alpha_1 \wedge \dots \wedge \alpha_n \rightarrow K(a, P)$

ならば、対話は成功したと定義する。

3.3.2 状態遷移の仕組み

発話は $inform(\alpha, \beta, P)$ または $request(\alpha, \beta, P)$ の形をしている。状態 S_{i-1} で各エージェントがある発話を入力として受け取ると、以下の操作に従って S_i への状態遷移が起こる。

- $request(\alpha, \beta, P)$ による遷移
if $B(\alpha, N(\alpha, P)) \in S_{i-1}$ and $K(\alpha, P) \notin S_{i-1}$
then $S_i = S_{i-1} - \{B(\alpha, N(\alpha, P))\} \cup \{K(\beta, N(\alpha, P))\}$

- $inform(\alpha, \beta, P)$ による遷移
if $B(\alpha, N(\beta, P)), K(\alpha, P) \in S_{i-1}$
then $S_i = S_{i-1} - \{B(\alpha, N(\beta, P))\} \cup \{K(\beta, K(\alpha, P))\} \cup \{K(\beta, P)\}$

S_i では、背景知識に基づく推論、発話生成規則による推論が続いて行われ、次発話として出力される。

4 対話の解析

前章で述べた枠組みを使って実際の対話を解析してみる。

4.1 応答生成

まず、典型的な質疑応答を解析する。

$request(\alpha, \beta, P)$ によって $K(\beta, N(\alpha, P))$ が生じる。推論により $B(\beta, N(\alpha, P))$ が導かれる。その時点で内部状態に $K(\beta, P)$ があれば情報提供の前条件が成立し、 $inform(\beta, \alpha, P)$ が引き起こされる。

次の例はホテルの予約場面でのホテルフロントと客の対話であり¹、客 (guest) を g 、ホテルフロント (clerk) を c で表す。ホテル予約対話では通常客は宿泊日程や希望する部屋のタイプ、料金などを知識として持っており、フロントとの対話でそれらを順に伝え、最終的に「希望条件で予約された」ということを知る。

例 3 質疑応答

c : はい、何名様でございますでしょうか。
 g : 大人二名でございます。

最初の発話は $request(c, g, nbr)$ 、次の発話は $inform(g, c, nbr)$ と記述される。この対話の直前の内部状態を S_1 、各発話によって遷移した状態を順に S_2, S_3 とすると、この対話による内部状態の遷移は以下ようになる。

¹本稿で使った例はすべて ATR 旅行対話コーパスからとったものである。

$$\begin{aligned}
S_1 &: B(c, N(c, nbr)) \wedge \neg K(c, nbr) \\
&\downarrow request(c, g, nbr) \\
S_2 &: K(g, N(c, nbr)) \\
&\rightarrow B(g, N(c, nbr)) \wedge K(g, nbr) \\
&\downarrow inform(g, c, nbr) \\
S_3 &: K(c, K(g, nbr)) \rightarrow K(c, nbr)
\end{aligned}$$

客は最初から人数がわかっているので、初期状態は $K(g, nbr)$ を含む。さらに、これまでの対話から S_1 は $B(g, N(c, nbr))$ を含み $K(c, nbr)$ を含まないと仮定する。すると、情報要求の前条件が満たされて $request(c, g, nbr)$ が発せられる。これにより S_2 への状態遷移が起こり $K(g, N(c, nbr))$ が生起する。次に推論規則によって $K(g, N(c, nbr))$ から $B(g, N(c, nbr))$ が導かれる。一方 $K(g, nbr)$ は S_2 にも保存されるので、情報提供の前条件が成り立ち $inform(g, c, nbr)$ が発せられる。その結果、 S_3 への状態遷移が起こり $K(c, K(g, nbr))$ が生起する。 K の公理から $K(c, nbr)$ が成り立つ。

従って、最終的にホテルフロントは人数に関する情報を得る。

4.2 発話の順序

ある情報を得た後、新たな情報に関する要求や告知が起こる過程を解析する。

$inform(\alpha, \beta, P)$ によって $K(\beta, K(\alpha, P))$ が生じる。推論により $K(\beta, P)$ が導かれる。ここで適応可能な発話生成規則がありその結果 $B(\beta, N(\alpha, Q))$ が生起されるとする。その時点で内部状態に $K(\beta, Q)$ がなければ情報要求の前条件が成立し $request(\beta, \alpha, Q)$ が引き起こされる。適用する発話生成規則によって $inform(\beta, \alpha, Q)$ になる場合もある。

例 4 発話の順序

g: はい, それで結構です。
c: かしこまりました。では, お名前をちょうだいできますか。

最初の発話は客のホテルの予約意志を伝えるものであり $inform(c, g, fix)$ と, 次の発話は $inform(g, c, name)$ と記述される。この対話の直前の内部状態を S_1 , 各発話によって遷

移した状態を順に S_2, S_3 とすると, この対話による内部状態の遷移は以下ようになる。

$$\begin{aligned}
S_1 &: B(g, N(c, fix)) \wedge K(g, fix) \\
&\downarrow inform(g, c, fix) \\
S_2 &: K(c, K(g, fix)) \\
&\rightarrow K(c, fix) \\
&\rightarrow B(c, N(c, name)) \wedge B(c, N(c, pay)) \\
&\neg K(c, name) \wedge \neg K(c, pay) \\
&\downarrow request(c, g, name) \\
S_3 &: K(c, N(g, name))
\end{aligned}$$

予約が確定するとホテル側は相手の名前や支払い方法を尋ねる。この順序を発話生成規則として以下のように記述する。

$$K(c, fix) \rightarrow B(\alpha, N(c, name)) \wedge B(\alpha, N(c, pay))$$

これまでの対話から S_1 は $B(g, N(c, fix))$ および $K(g, fix)$ を含むと仮定する。すると, 情報提供の前条件が満たされて $inform(g, c, fix)$ が発せられる。これにより S_2 への状態遷移が起こり $K(c, K(g, fix))$ が生起する。次に推論規則によって $K(c, fix)$ が導かれる。すると上の発話生成規則によって $B(\alpha, N(c, name)) \wedge B(\alpha, N(c, pay))$ が生起する。一方 S_2 は $K(c, name)$ も $K(c, pay)$ も含まないことから情報要求の前条件が成り立ち, $request(c, g, name)$ または $request(c, g, pay)$ が発せられる。どちらが先に生じるかは非決定的である。この発話の結果, S_3 への状態遷移が起こり $K(c, N(g, name))$ が生起する。

この後, 推論を続けると $inform(c, g, name)$ が引き起こされ情報提供が行われる。

以上から, 情報要求, 情報提供いずれもこの枠組みで説明できることがわかる。

5 確認と相互信念

5.1 確認の過程

$inform(\alpha, \beta, P)$ のあとに $inform(\beta, \alpha, P)$ が起こる場合, 後者は単なる情報の提供ではなく確認(confirm)に相当する。以下ではこの過程を説明する。

CG-rule は確認の発話を生じさせる規則であり発話生成規則の一つとして以下のように

記述する。

CG-rule on Q (confirm-generation rule)
 $K(\alpha, P_1) \wedge \dots \wedge K(\alpha, P_n) \rightarrow B(\alpha, N(\beta, P))$

この規則は α が特定の事実 (P_1, \dots, P_n) を知った場合、事実 P を β に確認する必要があることを表す。

$B(\alpha, N(\beta, P)) \wedge K(\alpha, P) \wedge B(\alpha, K(\beta, P))$ の状態で $inform(\alpha, \beta, P)$ が起これば、それは確認になる。この条件は、 β が P を知る必要があると α が思っており、自分がその情報を知っているかつ β が P を知っていることと α が思っていることを表している。確認の結果遷移した内部状態では、 $K(\alpha, K(\beta, P)) \wedge K(\beta, K(\alpha, P))$ が成り立ち P は α, β 間における相互知識になる。

例 5 確認

g: 八月の十三日の土曜日から、十五日までの三日間をお願いします。

c: はい、八月十三日にチェックインされて、二泊お泊まりになられるということですね。

最初の発話は $inform(c, g, dates)$ 、次の発話は $inform(g, c, dates)$ と記述される。

$K(g, dates)$ は初期状態で与えられ、 $B(g, N(c, dates))$ はこの直前の発話によって生じたとする。単純化のため、CG-rule は

$$K(g, dates) \rightarrow B(c, N(g, dates))$$

とする。

$$\begin{aligned} & B(g, N(c, dates)) \wedge K(g, dates) \\ & \downarrow inform(g, c, dates) \\ & \underline{K(c, K(g, dates))} \\ & \quad \rightarrow K(g, dates) \wedge K(c, dates) \\ & \quad \rightarrow B(c, N(g, dates)) \wedge K(c, dates) \\ & \downarrow inform(c, g, dates) \\ & \underline{K(g, K(c, dates))} \end{aligned}$$

下線をひいた 2 式からホテルと客の間で日程 ($dates$) に関する相互知識ができたことがわかる。

5.2 聞き間違い

これまでは情報が正しく伝わるものと仮定していたため、確認による失敗はなかった。しかし、実際の対話では聞き間違いにより情報が正しく伝わらない場合もあり、確認や訂正行為がしばしば行なわれる。この過程を記述するために、 $request, inform$ の条件を弱める。

(1) 情報要求 - $request(\alpha, \beta, P)$

● 前条件: $B(\alpha, N(\alpha, P)) \wedge \neg B(\alpha, P)$

● 後条件: $B(\beta, N(\alpha, P'))$

P' は事実だが P と一致するとは限らない。

(2) 情報提供 - $inform(\alpha, \beta, P)$

● 前条件: $B(\alpha, N(\beta, P)) \wedge B(\alpha, P)$

● 後条件: $B(\beta, B(\alpha, P')) \wedge B(\beta, P')$

このモデルでは、発話の結果相手は正確な情報を得るとは限らず、発話者の内部状態についての信念を得るに過ぎない。

$B(\alpha, N(\beta, P)) \wedge B(\alpha, P) \wedge B(\alpha, B(\beta, P))$ の状態で $inform(\alpha, \beta, P)$ が起これば、それは確認になる。

また、発話生成規則は以下のようにすべて K が B に置き換えられた形になる。

$$B(\alpha, P_1) \wedge \dots \wedge B(\alpha, P_n) \rightarrow B(\alpha, N(\alpha_1, Q_1)) \wedge \dots \wedge B(\alpha, N(\alpha_m, Q_m))$$

確認の結果遷移した内部状態では、 $B(\alpha, P) \wedge B(\beta, P') \wedge B(\alpha, B(\beta, P'')) \wedge B(\beta, B(\alpha, P'))$ が成り立つ。ここで、 $P = P''$ ならば、 P は α, β 間における相互信念に相当する。ただし、ここでは $(P = P'') \text{ iff } (P = P' \wedge P' = P'')$ と仮定している。 $P \neq P''$ ならば聞き間違いになる。

例 6 聞き間違いの発見

g: 滞在先はホテルニューオータニロサンゼルス 602 号室。電話番号は、213,443,1700。

c: はい、鈴木様、ニューオータニホテルの 602 号室に御滞在中ですね。そして、そちらのお電話番号が、714,443,1700 でございますね。

この対話は $inform(c, g, ad), inform(c, g, tel)$,
 次の発話は $inform(g, c, ad), inform(c, g, tel')$
 と記述される。

$B(g, ad), B(g, tel)$ は初期状態で与えられ,
 $B(g, N(c, ad)), B(g, N(c, tel))$ は直前の発話
 によって生じたものとする。単純化のため、
 CG-rule は

$$B(c, ad) \rightarrow B(c, N(c, ad))$$

$$B(c, tel) \rightarrow B(c, N(c, tel))$$

とする。すると、内部状態の遷移は以下のよ
 うになる。

$$B(g, N(c, ad)) \wedge B(g, ad) \wedge$$

$$B(g, N(c, tel)) \wedge \boxed{B(g, tel)}$$

$$\Downarrow inform(g, c, ad), inform(g, c, tel)$$

$$\frac{B(c, B(g, ad)) \wedge B(c, ad) \wedge$$

$$B(c, B(g, tel')) \wedge B(c, tel')$$

$$\rightarrow B(c, N(g, ad)) \wedge B(c, ad) \wedge$$

$$B(c, N(g, tel')) \wedge B(c, tel') \wedge$$

$$\Downarrow inform(c, g, ad'), inform(c, g, tel')$$

$$\frac{B(g, B(c, ad)) \wedge B(g, ad) \wedge$$

$$B(g, B(c, tel'')) \wedge \boxed{B(g, tel''')}$$

この例では、下線部で示したように、 c は
 ad を信じるとともに g が ad を信じてい
 ると信じており、 g の信念に関しても同様の
 ことがいえる。従って、住所に関しては相互
 信念が成り立つ。一方、枠囲みで示したよう
 に、 g は tel を信じかつ tel'' も信じている。
 $\neg(tel \wedge tel'')$ なので電話番号については相互信
 念にならず聞き間違いが発見された。

6 おわりに

本稿では、情報収集を目的とする対話に対
 する情報の授受に基づく対話のモデルを提案
 した。このモデルでは「知る必要がある」と
 という様相オペレータの導入により、情報収
 集側の要求と情報提供側の告知の双方が統
 一的な説明を与えることができる。

また、実際の対話に現れる確認や聞き間違
 いの発見など動的に生じる現象も同一の枠組
 みによって説明できる。

今後は、相互知識や相互信念に対する扱
 い、発話候補が複数個ある場合の選択などの
 非決定性の扱い等を検討する。

参考文献

- [All95] James Allen. *Natural Language Understanding (second edition)*. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc, 1995.
- [Che80] B. Chellas. *Modal Logic: An Introduction*. Cambridge University Press, 1980.
- [CL90a] Philip R. Cohen and Hector J. Levesque. Rational Interaction as the Basis for Communications. In P. R. Cohen, J. Morgan and M. E. Pollack(eds.), *Intentions in Communication*, pp.221-256, The MIT Press, 1990.
- [CL90b] Philip R. Cohen and Hector J. Levesque. Intention is Choice with Commitment. *Artificial Intelligence*, vol.42, no.2/3, pp.213-262, 1990.
- [FH88] Ronald Fagin and Joseph Y. Halpern. Belief, Awareness, and Limited Reasoning. *Artificial Intelligence*, vol.34, no.1, pp.39-76, 1988.
- [GS90] Barbara J. Grosz and Candace L. Sidner. Plans for Discourse. In P. R. Cohen, J. Morgan and M. E. Pollack(eds.) *Intentions in Communication*, pp.417-444, The MIT Press, 1990.
- [Had95] Afsaneh Haddadi. Towards a pragmatic theory of interactions. In *Proceedings of the International Conference on Multiagents Systems*, pages 133-139, 1995.
- [RG91] Anand S. Rao and Michael P. Georgeff. Modeling rational agents within bdi-architecture. In *Proceedings of International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, pages 473-484, 1991.
- [SBP97] M. D. Sadek and P. Bretier and F. Panaget. ARTIMIS: Natural Dialogue Meets

Rational Agency. In *Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp.1030–1035, 1997.

- [SC94] Ira A. Smith and Philip R. Cohen. Toward a Semantics for an Agent Communications Language Based on Speech-Acts. In *National Conference on Artificial Intelligence*, pp.24–31, 1994.

付録

命題様相論理の公理系

標準命題様相論理の性質には以下のものがあり [Che80], どの性質を公理として持つかによって体系が異なる。ただし, \mathcal{O} は様相演算子を表す。

$$\text{K: } \mathcal{O}(\alpha, \varphi \rightarrow \psi) \rightarrow (\mathcal{O}(\alpha, \varphi) \rightarrow \mathcal{O}(\alpha, \psi))$$

$$\text{T: } \mathcal{O}(\alpha, \varphi) \rightarrow \varphi$$

$$\text{D: } \mathcal{O}(\alpha, \varphi) \rightarrow \neg \mathcal{O}(\alpha, \neg \varphi)$$

$$4: \mathcal{O}(\alpha, \varphi) \rightarrow \mathcal{O}(\alpha, \mathcal{O}(\alpha, \varphi))$$

$$5: \neg \mathcal{O}(\alpha, \neg \varphi) \rightarrow \mathcal{O}(\alpha, \neg \mathcal{O}(\alpha, \neg \varphi))$$

推論規則

$$\text{NEC: } \text{If } \models \varphi \text{ then } \mathcal{O}(\alpha, \varphi)$$

性質 K,D,4 を公理として持つ体系を S_4 , 性質 K,D,4,5 の場合は $KD45$ または $weak-S_5$, 性質 K,D の場合は KD と呼ぶ。推論規則 (NEC) はどの体系にも共通である。