

一階論理の形式化による オブジェクト指向モデルの記述言語と推論系

1M-3

小島篤博, 指原利之, 和泉憲明, 高松忍, 福永邦雄

大阪府立大学工学部

1 まえがき

近年, ソフトウェアの大規模化・複雑化にともない, C++をはじめとするオブジェクト指向言語が多用されるようになってきた. オブジェクト指向では, 複数のオブジェクトが独立・並行して動作し, メッセージ通信により相互作用するものとして捉えるため, システムの分析・設計においても様々な視点からモデル化されてきた. 従来より, 形式的記述法として以下の言語が提案されている.

- (1) 時間論理, ダイナミック論理.
- (2) E-R図, データフロー図, 状態推移図.
- (3) 代数型仕様記述言語.

各言語は, 固有の数学的・形式的体系, 固有の記述範囲と表現能力をもつため, オブジェクト指向の分析・設計や検証・合成の過程では, いくつかの言語を組み合わせる融合手法がとられる [3, 5]. しかしながら, それぞれの言語で表現する内容は相互に依存しており, それらの間の関係は, 自然言語などの非形式的な記述により与えられる.

本論文では, 時間や動作, 状態の推移, 対象の性質や関係などの対象レベル, オブジェクト指向の抽象レベルと, 検証や合成における証明過程などのメタレベルを統合的に記述できる一階論理言語とその推論系を提案する.

本手法では, 構成的数学における論理式の証明可能性解釈の考え方 [1] と, 最近の自然言語の形式意味論であるプロパティ理論 [4] ならびに情報の論理 [2] の意味論に基づいている. そして, 一階論理による推論機構を実現するため, 動作に関するデフォルト推論, メタレベル推論とリフレクション, 信念修正機構など, 知識工学における研究成果を応用した人工知能的アプローチをとる [6]. ここでは, 論理式の意味を真理条件的・モデル論的でなく, 証明可能性解釈に基づいて様相論理の各種の意味論を一階論理により形式化している. これにより, 対象世界における種々の概念の記述を統合するとともに, 効率的な推論が行なえる論理型言語を与えている.

2 対象レベルの記述と推論

対象世界を統合的に記述するため, 一階論理式に, 時間・動作と因果・条件の様相演算子を加えて拡張した多

重様相述語論理式(以下, 様相論理式とよぶ)を記述言語とする.

本手法では, 命題(論理式)を抽象的な型である個体として扱えるプロパティ理論に基づいて, 状態 s で様相論理式 A が成り立つことを表す述語表現: $T('A', s)$ を導入する. 表 1 に, 基本表現, 時間表現, 動作表現と因果・条件表現について, $T('A', s)$ の定義を再帰的な変換規則の形で与える. そして, 論理式の充足性を, 一階論理式の集合により与える状況記述に対する証明可能性により定義する. 状況記述は, 前提条件となる状態や動作の生起などの具体的記述と, 個々の対象の基本動作や通信動作に関する規則, 因果・条件規則や, 時間・動作に関する規則などの一般的記述からなる.

状況記述 Ψ において様相論理式 A が状態 s で成り立つことを証明可能関係:

$$\Psi \vdash T('A', s)$$

で表す. 上式は, 表 1 の変換規則, 時間・動作, 因果・条件に関する一般的規則, レゾリューションとパラモジュレーションによる演繹推論規則, およびデフォルト推論規則を用いて, 状況記述 Ψ から $T('A', s)$ が証明可能であることを表す [6].

表 1 $T('A', s)$ に関する変換規則

- (a) 基本表現

$$T('p(t_1, t_2, \dots, t_n)', s) \equiv p(t'_1, t'_2, \dots, t'_n, s)$$
 但し, $t'_i = t_i$: t_i が個体定項(変項)のとき
 $t'_i = f(\dots, s)$: t_i が関数表現 $f(\dots)$ のとき
 $T('A \& B', s) \equiv T('A', s) \& T('B', s)$
- (b) 時間表現

$$T('FUT_{some}(A)', s_0) \equiv \exists s_1 \{ \leq(s_0, s_1) \& T('A', s_1) \}$$

$$FUT_{some}: \text{未来のいつか}$$
- (c) 動作表現

$$T('OCCUR(act)', s_0) \equiv \exists s_1 T('OCCUR(act)', s_0, s_1)$$

$$T('OCCUR(act)', s_0, s_1) \equiv E(act, s_0, s_1) \quad \text{但し, } act: \text{基本動作}$$

$$T('OCCUR(IF p THEN act_1 ELSE act_2)', s_0, s_1) \equiv \{ T('p', s_0) \& T('OCCUR(act_1)', s_0, s_1) \} \vee \{ \neg T('p', s_0) \& T('OCCUR(act_2)', s_0, s_1) \}$$
- (d) 因果・条件表現

$$T('COND(A, act, B)', s_0) \equiv \forall s_1 \{ T('A', s_0) \& T('OCCUR(act)', s_0, s_1) \rightarrow T('B', s_1) \}$$

A Description Language and its Reasoning System for Object-Oriented Models by First-Order Logic Formalization.

Atsuhiko Kojima, Toshiyuki Sashihara, Noriaki Izumi, Shinobu Takamatsu, Kunio Fukunaga
University of Osaka Prefecture

3 オブジェクト指向モデルの記述

オブジェクト指向分析 / 設計では、動作による状態推移と入出力データ間の関係を表す振舞いモデル、オブジェクトの性質やオブジェクト間の関係を表すオブジェクトモデル、メッセージ通信による相互作用モデルが用いられる。以下に、プロバティ理論に基づく各モデルの記述法について述べる。

振舞いモデル

因果・条件表現を用いて、動作による状態推移の関係と、動作の事前 / 事後条件に関する規則を次式のように表す。

$$\begin{aligned} T('COND(A, act, B)', s_1) \\ \equiv \forall s_2 \{ T('A', s_1) \& T('OCCUR(act)', s_1, s_2) \\ \rightarrow T('B', s_2) \} \end{aligned}$$

さらに、論理式 A が成り立つような状態の型を表す表現: $\lambda s [T('A', s)]$ を用いて、上式を事前 / 事後状態で抽象化すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} Ap(\lambda s_1 \lambda s_2 [T('OCCUR(act)', s_1, s_2)], \lambda s_1 [T('A', s_1)]) \\ \subseteq \lambda s_2 [T('B', s_2)] \end{aligned}$$

ここで、 $\lambda s_1 \lambda s_2 [T('OCCUR(act)', s_1, s_2)]$ は、動作を事前 / 事後状態で抽象化したものであり、事前の状態型に対して、事後の状態型を与える関数である。上式は、この抽象的動作を事前状態型に適用した結果が事後状態型に含まれることを表す。

上式をさらに act で抽象化すれば、事前 / 事後条件による動作の型を得ることができる。

$$\begin{aligned} act \in \Pi_{act}(A, B) \\ (\Pi_{act}(A, B) \stackrel{def}{=} \lambda \alpha [Ap(\lambda s_1 \lambda s_2 [T('OCCUR(\alpha)', s_1, s_2)], \\ \lambda s_1 [T('A', s_1)]) \subseteq \lambda s_2 [T('B', s_2)])]) \end{aligned}$$

上述のような状態型と動作型を考えることにより、構成的型理論における型推論のように、動作の合成規則を与えることができる。以下に、動作 $act_1 \in \Pi_{act}(A, B)$ と $act_2 \in \Pi_{act}(B, C)$ の合成過程を示す。

$$\frac{\frac{[x \in A] \quad act_1 \in \Pi_{act}(A, B)}{Ap(act_1, x) \in B(x)} \quad act_2 \in \Pi_{act}(B, C)}{Ap(act_2, Ap(act_1, x)) \in C(Ap(act_1, x))} \\ \lambda x. Ap(act_2, Ap(act_1, x)) \in \Pi_{act}(A, C)$$

オブジェクトモデル

従来より、オブジェクトの性質や関係は、E-R 図により表現される。本手法では、オブジェクトを、抽象的な型である個体 (項) として扱う。これにより、一階論理の枠組でオブジェクトの性質とオブジェクト間の関係を表現することができる。以下に、項表現によるオブジェクトの記述形式を示す。

$$\begin{aligned} class = \lambda x [prop_1(x, p_1) \& p_1 \in type_1 \& \dots \\ \& act_1(x) \in \Pi_{act}(A_1, B_1) \& \dots] \end{aligned}$$

また、E-R 図で表現されるような 1-1 関係、1-多関係、is-a (継承) 関係などを論理式で与えることができる。以下に、is-a 関係の記述を示す。

$$is-a(class_1, class_2) \equiv \forall x \{ x \in class_1 \rightarrow x \in class_2 \}$$

メッセージ通信による相互作用モデル

オブジェクト間のメッセージ通信による相互作用を、送信側、受信側双方の動作規則により定式化する。次式はそれぞれ、待ち行列付き非同期メッセージ通信の送信側、および受信側の動作規則を示す。

$$\begin{aligned} T('OCCUR(REQUEST(p, q, e))', s_1, s_2) \& \\ T('QUEUE(e, z)', s_1) \\ \rightarrow T('QUEUE(e, [z \parallel p])', s_2) \\ T('AT(p, ([SELECT WHEN A =>] \\ ACCEPT(e) THEN act))', s_1) \\ [\& T('A', s_1)] \& T('QUEUE(e, [q \mid z])', s_1) \\ \rightarrow \exists s_2 \{ T('OCCUR(do(p, ACCEPT(e), q))', s_1, s_2) \\ \& T('QUEUE(e, z)', s_2) \} \end{aligned}$$

4 メタレベルの記述と推論

本手法では、オブジェクト指向における分析 / 設計を支援するため、検証や合成の証明過程のメタレベルを記述し、推論する機構を与えている。ここでは、証明過程における認識状態と認識の状態変化のモデルを与える情報の論理の意味論を一階論理により形式化している。本手法では、リフレクションにより、証明手続きと状況記述の修正手続きに対応する一階述語を導入して、メタレベル推論を一階論理の枠内で定式化している [6, 7].

5 むすび

本論文では、オブジェクト指向分析 / 設計における複数のモデルを、時間や動作、状態推移などを表現する様相論理とプロバティ理論に基づいた抽象化によって統合的に記述し、推論できる一階論理言語を提案した。

今後の課題として、システム分析・設計過程におけるビューの移動や階層化、上位モデリングなどの形式化が挙げられるが、これらは、メタレベル記述の拡張と状況記述の抽象化・構造化により対応できるものと考えている。

参考文献

- [1] Beeson, M.J.: "Foundations of Constructive Mathematics", Springer-Verlag, 1985.
- [2] Devlin, K.: "Logic and Information", Cambridge Univ. Press, 1991.
- [3] Rumbaugh, J. et al: "Object-Oriented Modeling and Design", Prentice-Hall, 1991.
- [4] Turner, R.: "A Theory of Properties", Journal of Symbolic Logic, Vol.52, No.2, 1987.
- [5] 本位田真一, 大須賀昭彦, 内平直志: "代数的仕様と時制論理によるリアルタイム SA とオブジェクト指向設計の融合手法", 情報処理学会論文誌, Vol.33, No.2, 1992.
- [6] 高松忍, 和泉憲明, 黄瀬浩一, 福永邦雄: "ハードウェア設計仕様における自然言語記述の一階論理に基づく状況的・動的解釈", 人工知能学会誌, Vol.10, No.5, 1995.
- [7] 高松忍, 和泉憲明, 小島篤博, 谷忠明, 福永邦雄: "プロバティ理論と情報の論理に基づくエージェント・モデルの一階論理による形式化", 第9回人工知能学会全国大会予稿集, 1995.