

Applied Type System

(*Extended Abstract*)

Hongwei Xi - Boston University

概要：Pure Type System フレームワーク (*PTS*) は型システムをデザイン/形式化する単純で一般的なアプローチを提供します。しかし依存型の存在を認めると、general recursion、再帰型、作用 (例: 例外、参照、入出力)、などの現実的なプログラミング機能の多くを *PTS* に組み込むことが困難になります。この論文では、実際のプログラミング機能をサポートする型システムをたやすくデザインし形式化できる、新しいフレームワーク Applied Type System (*ATS*) を提案します。*ATS* の鍵となる突出した特徴は、型を作ったり分析したりする静的な部分から、プログラムを書いて評価する動的な部分の完全に分離することです。この分離の元では、プログラムが型の中に現われることは不可能になります。(*PTS* では許可されていました。) この論文では *ATS* の形式化だけでなく、実用的なプログラミングのための型システムを作るフレームワークとして *ATS* を使った例もいくつか紹介します。

(この翻訳の元論文は <http://www.ats-lang.org/PAPER/ATS-types03.pdf> で、Japan ATS User Group <http://jats-ug.metasepi.org/> によって翻訳されています。また、この論文はフルペーパーである <http://www.cs.bu.edu/~hwxi/academic/drafts/ATS.pdf> の要約です。)

1. はじめに

Pure Type System フレームワーク (*PTS*) [Bar92] は型システムをデザイン/形式化する単純で一般的なアプローチを提供します。しかし依存型の存在を認めると、現実的なプログラミング機能の多くを *PTS* に組み込むことが困難になります。とりわけ、general recursion [CS87]、再帰型 [Men87]、作用 [HMST95]、例外 [HN88]、入出力が存在するとき *PTS* を使って純粋性を担保するためには、多大な努力が必要になることを私達は学びました。このような *PTS* の限界に対処するために、実際のプログラミング機能をサポートする型システムをたやすくデザインし形式化できる、新しいフレームワーク Applied Type System (*ATS*) を提案します。*ATS* の鍵となる突出した特徴は、型を作ったり分析したりする静的な部分から、プログラムを書いて評価する動的な部分の完全に分離することです。この分離は Dependent ML (DML) [XP99,Xi98] で開発された制限付き依存型の成果に由来していて、参照や例外のような作用の存在下でも依存型を柔軟にサポートします。また、ガード型 (*guarded types*) と アサート型 (*asserting types*) という 2 つの新しい型を導入することで、*ATS* では *PTS* よりも柔軟に効果的にプログラムの不変条件を捕捉することができることを示します。

ATS のデザインと形式化がこの論文の主な貢献であり、似たアイデアを提案した [Zen97,XP99,XCC03] に基づいた将来の研究のための基準点にすることが目標です。*ATS* を使うと、*PTS* の生来の欠陥を乗り越えて、依存型の存在下で多くの一般的なプログラミング機能をサポートする型システムをたやすく設計できます。私達は現在 *ATS* に基づいた型システムを持ち、(DML で開発されたような) 依存型のみではなく guarded recursive datatypes [XCC03] をもサポートする、型付き関数型プログラミング言語を設計/実装している最中です。Scheme が導入したようなアプローチ、つまり新しい言語機能を既存のもので実装するような手法で、*ATS* を用いて多様な言語拡張をサポートできないか私達は探求しています。とりわけ、オブジェクト指向プログラミング [XCC03]、メタプログラミング [XCC03,CX03]、型クラス [XCC02] のようないくつかのプログラミング機能をこの手法で扱えることを、私達は既に示しています。

この論文の残りは次のような構成になっています。第 2 節では、*ATS* フレームワークを詳説します。*ATS* で構成された汎用的な Applied Type System である *ATS* を形式化し、それから subject reduction と progress 定理を示します。第

3 節では、*ATS* を拡張し、general recursion、パターンマッチ、作用といった実地的な機能を導入します。第 4 節では、applied type system の興味深い例をいくつか示します。最後に、関連研究と開発の将来の可能性について紹介した後、結論を述べます。この extended abstract を補完した完全な論文がオンライン [Xi03] から入手できます。

$$\begin{array}{c}
\frac{}{\vdash \mathcal{S}_\emptyset [sig]} \quad \frac{\vdash \mathcal{S} [sig]}{\vdash \mathcal{S}, sc : [\sigma_1, \dots, \sigma_n] \Rightarrow b [sig]} \\
\frac{\Sigma(a) = \sigma}{\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} a : \sigma} \quad \frac{\mathcal{S}(sc) = [\sigma_1, \dots, \sigma_n] \Rightarrow b \quad \Sigma \vdash_{\mathcal{S}} s_i : \sigma_i \text{ for } i = 1, \dots, n}{\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} sc[s_1, \dots, s_n] : b} \\
\frac{\Sigma, a : \sigma_1 \vdash_{\mathcal{S}} s : \sigma_2}{\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} \lambda a : \sigma_1. s : \sigma_1 \rightarrow \sigma_2} \quad \frac{\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} s_1 : \sigma_1 \rightarrow \sigma_2 \quad \Sigma \vdash_{\mathcal{S}} s_2 : \sigma_1}{\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} s_1(s_2) : \sigma_2}
\end{array}$$

図 1 statics のシグニチャ構築規則と種付け規則

2. Applied Type System

この節では Applied Type System (*ATS*) フレームワークの形式化を示します。ここでは *ATS* で形式化された型システムを表わすのに *applied type system* という用語を使います。この後の説明では、静的な要素 (statics) と動的な要素 (dynamics) から成る一般的な applied type system として、*ATS* を定義します。直感的には、statics と dynamics はそれぞれ型とプログラムを扱っています。単純化のために、statics は純粋な単純型付き言語であると仮定します。そしてこの言語の型を 種 (*sort*) という名前と呼ぶことにします。statics の項を 静的な項 (*static term*) と呼びます。また dynamics の項を 動的な項 (*dynamic term*) と呼びます。そして、*type* という特別な種に属する静的な項を dynamics の型として用います。

2.1 Statics

静的な要素の形式的な表現を示します。基礎種を b と表わします。2 つの特別な基礎種 *type* と *bool* が存在すると仮定します。

$$\begin{array}{ll}
\text{sorts} & \sigma ::= b \mid \sigma_1 \rightarrow \sigma_2 \\
\text{static terms} & s ::= a \mid sc[s_1, \dots, s_n] \mid \lambda a : \sigma. s \mid s_1(s_2) \\
\text{static var. ctx.} & \Sigma ::= \emptyset \mid \Sigma, a : \sigma \\
\text{signatures} & \mathcal{S} ::= \mathcal{S}_\emptyset \mid \mathcal{S}, sc : [\sigma_1, \dots, \sigma_n] \Rightarrow b \\
\text{static subst.} & \Theta_S ::= [] \mid \Theta_S[a \mapsto s]
\end{array}$$

静的な項の変数は a を使って表わし、静的な項を s で表わします。予め宣言された静的な定数 sc も 0 個以上あるものと仮定します。この定数は、静的な定数コンストラクタ scc もしくは静的な関数定数 scf のどちらかです。静的な定数の種、 sc 種 (sc -sorts) を表わすのに $[\sigma_1, \dots, \sigma_n] \Rightarrow b$ を使います。静的な定数 sc が与えられたとき、なんらかの種 $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ について sc に sc 種 $[\sigma_1, \dots, \sigma_n] \Rightarrow b$ が割り当てられていて、 $i = 1, \dots, n$ について s_i に種 σ_i を割り当てることができるなら、種 b の項 $sc[s_1, \dots, s_n]$ を作ることができます。誤解を生じない場合は、 $sc[]$ を sc と書くこともあります。 sc 種は (普通の) 種とは見なされないことに注意してください。

静的な変数を静的な項に写像するような静的な置換を Θ_S で表わします。また Θ_S の定義域を $\mathbf{dom}(\Theta_S)$ で表わします。空の写像を表わすのに $[]$ と書きます。 $a \notin \mathbf{dom}(\Theta_S)$ のとき、 a から s に写すよう Θ_S を拡張した写像を $\Theta_S[a \mapsto s]$ と表わします。また、 Θ_S をなんらかの構文 \bullet に適用した結果を表わすのに、 $\bullet[\Theta_S]$ と書きます。構文 \bullet は、静的な項、静的な項の列、この後で定義する動的な変数コンテキスト、のいずれかを表わします。

シグニチャは宣言された静的な定数 sc への sc 種の割り当てを表わし、そのシグニチャの形成ルールは図 1 で与えられます。初期シグニチャ \mathcal{S}_0 が次の宣言を含むことを仮定しています。

$$\begin{array}{lll}
\mathbf{1} : [] \Rightarrow \text{type} & \top : [] \Rightarrow \text{bool} & \perp : [] \Rightarrow \text{bool} \\
\rightarrow_{tp} : [\text{type}, \text{type}] \Rightarrow \text{type} & \supset : [\text{bool}, \text{type}] \Rightarrow \text{type} & \\
\wedge : [\text{bool}, \text{type}] \Rightarrow \text{type} & \leq_{tp} : [\text{type}, \text{type}] \Rightarrow \text{bool} &
\end{array}$$

この表では、” \vdash ” の左側は静的な定数で、その右側には一致する sc 種が割り当てられています。また、それぞれの種 σ について、 S_0 は2つの静的コンストラクタ \forall_σ と \exists_σ に sc 種 $[\sigma \rightarrow_{tp} type] \Rightarrow type$ を割り当ててを仮定しています。静的な定数を表わすのに中置表記を使うことがあります。例えば、 $\rightarrow_{tp} [s_1, s_2]$ を表わすのに $s_1 \rightarrow_{tp} s_2$ のように、 $\leq_{tp} [s_1, s_2]$ を表わすのに $s_1 \leq_{tp} s_2$ のように書きます。さらに、 $\forall_a[\lambda a : \sigma.s]$ と $\exists_a[\lambda a : \sigma.s]$ をそれぞれ $\forall_a : \sigma.s$ と $\exists_a : \sigma.s$ のように書きます。statics の分類規則は図1で与えられますが、大部分は標準的なものです。例えば、 $\emptyset \vdash_{S_0} \forall_{type}[\lambda a : type.a \rightarrow_{tp} a] : type$ が導けるので、 $\forall a : type.a \rightarrow_{tp} a$ は種 $type$ を割り当てることができる静的な項です。静的なコンストラクタ sc の内、なんらかの種 $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ について sc 種 $[\sigma_1, \dots, \sigma_n] \Rightarrow type$ を割り当てられるものは型コンストラクタです。例えば $\mathbf{1}, \rightarrow_{tp}, \sqsupset, \wedge, \forall_\sigma, \exists_\sigma$ は全て型コンストラクタですが、 \leq_{tp} は型コンストラクタではありません。直感的には、 $\mathbf{1}$ は通常のユニット型を表わし、 \rightarrow_{tp} は関数型を作り、 \leq_{tp} は型におけるサブタイピング関係を表わします。静的なコンストラクタ \sqsupset と \wedge はそれぞれガード型 (guarded types) とアサート型 (asserting types) を作り、これらは後で解説します。

静的な変数に種を割り当てよう、静的な変数コンテキストを表わすのに Σ を使います; $\text{dom}(\Sigma)$ は Σ で宣言された静的な変数の集合です; もし $a : \sigma$ が Σ で宣言されていたら、 $\Sigma(a) = \sigma$ です。例によって、 Σ において静的な変数 a は一回しか宣言できません。もし $\Sigma \vdash s : bool$ が導けるなら、静的な項 s は Σ の下の 命題 (proposition) と呼ばれます。(なんらかの静的な変数コンテキストの下で) 命題を表わすのに P を使います。 $P \sqsupset s$ という形の型を表わすのに ガード型 (guarded type)、 $P \wedge s$ という形の型を アサート型 (asserting type) と呼びます。これらは両方とも次の例で使います。
Example 1. int を整数 ^{*1} を表わす種に、 \mathbf{list} を sc 種 $[type, int] \Rightarrow type$ の型コンストラクタとすると、次の静的な項は型になります:

$$\forall a : type. \forall n : int. n \geq 0 \sqsupset (\mathbf{list}[a, n] \rightarrow_{tp} \mathbf{list}[a, n])$$

直感的には、もし $\mathbf{list}[s, n]$ がそれぞれの要素の型が s で長さ n のリストを表わす型だとすると、リストの長さを変えないようなリストからリストへの関数を、上記の型は意図していると言えます。また次の型は、もし与えられたリストが空でなければそのリストの tail を返し、そうでなければ単に例外を発生させるような関数に割り当ててを意図しています。

$$\forall a : type. \forall n : int. n \geq 0 \sqsupset (\mathbf{list}[a, n] \rightarrow_{tp} n > 0 \wedge \mathbf{list}[a, n - 1])$$

アサート型 $n > 0 \wedge \mathbf{list}[a, n - 1]$ は、長さ n のリストにこの関数を適用した後、もしこの関数が返るなら、 $n > 0$ であり返値が長さ $n - 1$ のリストであるという不変条件を捕捉しています。これはいくぶん興味深い機能で、後の Example 2 で詳しく解説します。Dependent ML [XP99, Xi98] における研究でも既にアサート型がありましたが、アサート型の正確な概念はこれまで形式化されたことがありませんでした: DML ではこの論文でアサート型と呼んでいるものをシミュレートするのにサブセット種を使わねばなりませんでした。

PTS でのデザインと同様に、 ATS でのデザインにおいても型の等価性は重要な役割を果たします。けれどもさらなる研究によって、 ATS における型の等価性はサブタイピング関係 \leq_{tp} によって定義できることが明らかになりました。2つの型 s_1 と s_2 が与えられたとき、もし命題 $s_1 \leq_{tp} s_2$ と命題 $s_2 \leq_{tp} s_1$ の両方が成立するなら、 s_1 と s_2 は等しいと言えるのです。一般に、(ある前提の元に) 与えられた命題が成立するかどうか決定する必要があります。そこで、次ような制約関係の概念を導入します。

Definition 1. S, Σ, \vec{P}, P_0 をそれぞれ 静的なシグニチャ, 静的な変数コンテキスト, Σ の下での命題の組, Σ の下での1つの命題であるとしします。もし次の規則条件が満たされるなら、関係 $\Sigma; \vec{P} \models_S P_0$ は正規の制約関係であると言います:

- (1) 図2の規則ルール全てが有効である; すなわちそれぞれの規則ルールについて、もしルールの前提が成立するならルールの結論が成立し、なおかつ
- (2) $\Sigma; \vec{P} \models_S s_1 \rightarrow_{tp} s_2 \leq_{tp} s'_1 \rightarrow_{tp} s'_2$ ならば $\Sigma; \vec{P} \models_S s'_1 \leq_{tp} s_1$ と $\Sigma; \vec{P} \models_S s_2 \leq_{tp} s'_2$ で、なおかつ
- (3) $\Sigma; \vec{P} \models_S P \sqsupset s \leq_{tp} P' \sqsupset s'$ ならば $\Sigma; \vec{P}, P' \models_S P$ かつ $\Sigma; \vec{P}, P' \models_S s \leq_{tp} s'$ で、なおかつ
- (4) $\Sigma; \vec{P} \models_S P \wedge s \leq_{tp} P' \wedge s'$ ならば $\Sigma; \vec{P}, P \models_S P'$ かつ $\Sigma; \vec{P}, P \models_S s \leq_{tp} s'$ で、なおかつ
- (5) $\Sigma; \vec{P} \models_S \forall a : \sigma.s \leq_{tp} \forall a : \sigma.s'$ ならば $\Sigma, a : \sigma; \vec{P} \models_S s \leq_{tp} s'$ で、なおかつ
- (6) $\Sigma; \vec{P} \models_S \exists a : \sigma.s \leq_{tp} \exists a : \sigma.s'$ ならば $\Sigma, a : \sigma; \vec{P} \models_S s \leq_{tp} s'$ で、なおかつ
- (7) $\emptyset; \emptyset \models_S scc[s_1, \dots, s_n] \leq_{tp} scc'[s'_1, \dots, s'_n]$ は $scc = scc'$ です。

^{*1} 形式的には、それぞれの整数 n について、 sc 種 $\square \Rightarrow int$ の静的なコンストラクタ \underline{n} が存在し、 \underline{n} は n に相当する種 int の静的な項であることを言う必要があります。

$$\begin{array}{c}
\frac{}{\Sigma; \vec{P} \models_S \top} \text{ (reg-true)} \qquad \frac{}{\Sigma; \vec{P}, \perp \models_S P} \text{ (reg-false)} \\
\\
\frac{\Sigma; \vec{P} \models_S P_0}{\Sigma, a : \sigma; \vec{P} \models_S P_0} \text{ (reg-var-thin)} \qquad \frac{\Sigma \vdash_S P : \text{bool} \quad \Sigma; \vec{P} \models_S P_0}{\Sigma; \vec{P}, P \models_S P_0} \text{ (reg-prop-thin)} \\
\\
\frac{\Sigma, a : \sigma; \vec{P} \models_S P \quad \Sigma \vdash_S s : \sigma}{\Sigma; \vec{P}[a \mapsto s] \models_S P[a \mapsto s]} \text{ (reg-subst)} \qquad \frac{\Sigma; \vec{P} \models_S P_0 \quad \Sigma; \vec{P}, P_0 \models_S P}{\Sigma; \vec{P} \models_S P} \text{ (reg-cut)} \\
\\
\frac{\Sigma \vdash_S s : \text{type}}{\Sigma; \vec{P} \models_S s \leq_{tp} s} \text{ (reg-refl)} \qquad \frac{\Sigma; \vec{P} \models_S s_1 \leq_{tp} s_2 \quad \Sigma; \vec{P} \models_S s_2 \leq_{tp} s_3}{\Sigma; \vec{P} \models_S s_1 \leq_{tp} s_3} \text{ (reg-tran)}
\end{array}$$

図 2 規則ルール

$\Sigma; \vec{P} \models_S P_0$ と書くときはいつでも $P \in \vec{P}, P_0$ について $\Sigma \vdash_S P : \text{bool}$ を導出できることを仮定していることに注意してください。

制約関係は、ATS の dynamics を定義するとき必要となります。どの正規性規則も、どの正規性条件も、subject reduction 定理 (Theorem 1) と progress 定理 (Theorem 2) を証明するのに後で必要になります。一般に、ATS フレームワークは制約関係がパラメータ化されています。この時点では、制約関係の決定可能性は気にしません。それぞれの制約関係 \models_S について、どのような Σ, \vec{P} と P_0 が与えられても $\Sigma; \vec{P} \models_S P_0$ が満たされるかどうか、決定してくれるオラクルが存在することを単純に仮定することにします。後で、制約関係を決定する実用的なアルゴリズムを持つ applied type system の例をいくつか紹介します。

非叙述性 (impredicativity) のために、与えられたシグニチャ S について制約関係 \models_S をいかに厳密に定義できるかは、一般にかなり難しい問題です。[Xi03] では、モデル理論的なアプローチで私達はこの問題を解決しています。

2.2 Dynamics

ATS の dynamics は型付き言語で、種 type の静的な項は dynamics における型です。動的な定数がいくつか宣言されているものとし、引数 n の動的な定数 dc それぞれに次の形の dc 型が割り当てられているものとします。

$$\forall a_1 : \sigma_1 \dots \forall a_k : \sigma_k. P_1 \supset (\dots (P_m \supset ([s_1, \dots, s_n] \Rightarrow_{tp} s)) \dots)$$

このとき s_1, \dots, s_n, s は型であると仮定しています。 dc が動的なコンストラクタ dcc である場合、なんらかの型コンストラクタ scc について型 s は $scc[s]$ の形を取れなければなりません。この時、 dcc は scc に関連付けられている、と言えます。静的な項の (空である可能性のある) 列を表わすのに \vec{s} を使っていることに注意してください。例えば、次のように dc 型を割り当てることで、2つの動的なコンストラクタ \underline{nil} と \underline{cons} を型コンストラクタ \mathbf{list} と関連付けることができます。

$$\begin{array}{l}
\underline{nil} : \forall a : \text{type}. \mathbf{list}[a, 0] \\
\underline{cons} : \forall a : \text{type}. \forall n : \text{int}. n \geq 0 \supset ([a, \mathbf{list}[a, n]] \Rightarrow_{tp} \mathbf{list}[a, n+1])
\end{array}$$

このとき、要素の型が a で長さが n のリストを表わす型として $\mathbf{list}[a, n]$ を使っています。

動的な値を動的な項に写像する動的な置換を Θ_D で表わします。また Θ_D の定義域を $\mathbf{dom}(\Theta_D)$ で表わします。動的な置換の形成、適用を行う構文は静的な置換のそれと同じなので省きます。 $\mathbf{dom}(\Theta_D^1) \cap \mathbf{dom}(\Theta_D^2) = \emptyset$ となるような Θ_D^1 と Θ_D^2 が与えられたとき、 Θ_D^1 と Θ_D^2 の和集合を $\Theta_D^1 \cup \Theta_D^2$ で表わします。

任意の構文を \bullet で表わすと、 $\Sigma = a_1 : \sigma_1, \dots, a_k : \sigma_k$ において、 $\forall a_1 : \sigma_1 \dots \forall a_k : \sigma_k. \bullet$ を $\forall \Sigma. \bullet$ と書くことにします。同様に、 $\vec{P} = P_1, \dots, P_m$ において $P_1 \supset (\dots (P_m \supset \bullet) \dots)$ を $\vec{P} \supset \bullet$ と書くことができます。例えば、 dc 型は常に $\forall \Sigma. \vec{P} \supset ([s_1, \dots, s_n] \Rightarrow_{tp} s)$ の形になります。動的な定数の宣言を許可するために、シグニチャの定義を次のように拡張する必要があります。

$$\text{signatures } \mathcal{S} ::= \dots \mid \mathcal{S}, dc : \forall \Sigma. \vec{P} \supset ([s_1, \dots, s_n] \Rightarrow_{tp} s)$$

さらに、シグニチャを作るために次のような追加のルールが必要になります。

$$\frac{\begin{array}{l} \vdash \mathcal{S} [sig] \quad \Sigma \vdash_{\mathcal{S}} P : \text{bool} \text{ for each } P \text{ in } \vec{P} \\ \Sigma \vdash_{\mathcal{S}} s_i : \text{type} \text{ for each } 1 \leq i \leq n \quad \Sigma \vdash_{\mathcal{S}} s : \text{type} \end{array}}{\vdash \mathcal{S}, dc : \forall \Sigma. \vec{P} \supset ([s_1, \dots, s_n] \Rightarrow_{tp} s) [sig]}$$

dynamics の構文を図 3 に示します。図の中で、 x は動的な変数を、 d は動的な項を表します。引数の個数が n の動的な定数 dc が与えられたとき、引数 d_1, \dots, d_n への dc の適用を $dc[d_1, \dots, d_n]$ と書きます。 $n = 0$ の場合には $dc[]$ の代わりに dc と書きます。

$$\begin{array}{ll} \text{dyn. terms} & d ::= x \mid dc[d_1, \dots, d_n] \mid \mathbf{lam} \ x.d \mid \mathbf{app}(d_1, d_2) \mid \\ & \quad \supset^+(v) \mid \supset^-(d) \mid \wedge(d) \mid \mathbf{let} \ \wedge(x) = d_1 \ \mathbf{in} \ d_2 \mid \\ & \quad \forall^+(v) \mid \forall^-(d) \mid \exists(d) \mid \mathbf{let} \ \exists(x) = d_1 \ \mathbf{in} \ d_2 \\ \text{values} & v ::= x \mid dcc[v_1, \dots, v_n] \mid \mathbf{lam} \ x.d \mid \supset^+(v) \mid \wedge(v) \mid \forall^+(v) \mid \exists(v) \\ \text{dyn. var. ctx.} & \Delta ::= \emptyset \mid \Delta, x : s \\ \text{dyn. subst.} & \Theta_D ::= [] \mid \Theta_D[x \mapsto d] \end{array}$$

図 3 dynamics の構文

$$\frac{\vdash \mathcal{S} [sig]}{\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} \emptyset [dctx]} \quad \frac{\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} \Delta [dctx] \quad \Sigma \vdash_{\mathcal{S}} s : \text{type}}{\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} \Delta, x : s [dctx]}$$

図 4 動的な変数コンテキストを表わす形成ルール

型付けの導出において帰納的な意味付けに必要な Lemma 3 を証明するために、標識 $\supset^+(\cdot)$, $\supset^-(\cdot)$, $\wedge(\cdot)$, $\forall^+(\cdot)$, $\forall^-(\cdot)$, $\exists(\cdot)$ を導入します。これらの標識がないと、型の導出において帰納的証明を行なうことが、著しく困難になります。Lemma 3 を証明することも困難になってしまうでしょう。

$\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} \Delta[dctx]$ の形の判断は、 Σ と \mathcal{S} の下で Δ が well-formed な動的な変数コンテキストであることを示しています。このような判断を導出するルールを図 4 に示します。型付けの文脈には、 $\Sigma; \vec{P}; \Delta$ の組を用います。次のルールは $\vdash_{\mathcal{S}} \Sigma; \vec{P}; \Delta$ の形の判断を導出しています。

$$\frac{\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} P : \text{bool} \text{ for each } P \text{ in } \vec{P} \quad \Sigma \vdash \Delta [dctx]}{\vdash_{\mathcal{S}} \Sigma; \vec{P}; \Delta}$$

これは $\Sigma; \vec{P}; \Delta$ が well-formed であることを示しています。

$\Sigma; \vec{P}; \Delta$ が well-formed な型付け文脈で、かつ $\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} s : \text{type}$ が導出できるとき、型付け判断は $\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} d : s$ の形を取ります。制約関係 $\models_{\mathcal{S}}$ が正則であると仮定したとき、このような判断を導くための型付けルールを図 5 に示します。 $\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} \Theta_S : \Sigma_0$ と書くとき、それぞれの $a \in \text{dom}(\Theta_S) = \text{dom}(\Sigma)$ について $\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} \Theta_S(a) : \Sigma(a)$ が導出できることを意味します。型付けルールにおいては明らかな条件のいくつかを省略していることに注意してください。例えば、ルール (ty- \forall -intro) を適用するとき、 \vec{P}, Δ もしくは s において値 a は自由変数として出現 (free occurrences) できません。(ty-gua-intro) と (ty- \forall -intro) には一種の値制限 (value restriction) を適用しています。^{*2} 技術的な理由で、ルール (ty-var) を次のようなルールで置き換えます。^{*3}

^{*2} 実際には Theorem 2 を成立させるために、型付けルール (ty-gua-intro) の値に対する制約は、この時点でも必要です。

^{*3} 訳注: 実際には既に置き換え済みのものが図 5 に書かれています。単純ミスと思われます

$$\frac{\vdash_{\mathcal{S}} \Sigma; \vec{P}; \Delta \quad \Delta(x) = s \quad \Sigma; \vec{P} \models_{\mathcal{S}} s \leq_{tp} s'}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} x : s'} \text{ (ty-var')}$$

これは (ty-var) と (ty-sub) を結合しています。この置換は Lemma 2 成立させるために必要です。

$$\begin{array}{c} \frac{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} d : s \quad \Sigma; \vec{P} \models_{\mathcal{S}} s \leq_{tp} s'}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} d : s'} \text{ (ty-sub)} \\[10pt] \frac{\begin{array}{c} \vdash_{\mathcal{S}} \Sigma; \vec{P}; \Delta \quad \mathcal{S}(dc) = \forall \Sigma_0. \vec{P}_0 \supset [s_1, \dots, s_n] \Rightarrow_{tp} s \\ \Sigma \vdash_{\mathcal{S}} \Theta_S : \Sigma_0 \quad \Sigma; \vec{P} \models_{\mathcal{S}} P[\Theta_S] \text{ for each } P \in \vec{P}_0 \\ \Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} d_i : s_i[\Theta_S] \text{ for } i = 1, \dots, n \quad \Sigma; \vec{P} \models_{\mathcal{S}} s[\Theta_S] \leq_{tp} s' \end{array}}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} dc[d_1, \dots, d_n] : s'} \text{ (ty-dc)} \\[10pt] \frac{\vdash_{\mathcal{S}} \Sigma; \vec{P}; \Delta \quad \Delta(x) = s \quad \Sigma; \vec{P} \models_{\mathcal{S}} s \leq_{tp} s'}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} x : s'} \text{ (ty-var)} \\[10pt] \frac{\Sigma; \vec{P}; \Delta, x : s_1 \vdash_{\mathcal{S}} d : s_2}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} \mathbf{lam} x.d : s_1 \rightarrow_{tp} s_2} \text{ (ty-fun-intro)} \\[10pt] \frac{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} d_1 : s_1 \rightarrow_{tp} s_2 \quad \Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} d_2 : s_1}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} \mathbf{app}(d_1, d_2) : s_2} \text{ (ty-fun-elim)} \\[10pt] \frac{\Sigma; \vec{P}, P; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} d : s}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} \supset^+(d) : P \supset s} \text{ (ty-gua-intro)} \\[10pt] \frac{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} d : P \supset s \quad \Sigma; \vec{P} \models_{\mathcal{S}} P}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} \supset^-(d) : s} \text{ (ty-gua-elim)} \\[10pt] \frac{\Sigma; \vec{P} \models_{\mathcal{S}} P \quad \Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} d : s}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} \wedge(d) : P \wedge s} \text{ (ty-ass-intro)} \\[10pt] \frac{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} d_1 : P \wedge s_1 \quad \Sigma; \vec{P}, P; \Delta, x : s_1 \vdash_{\mathcal{S}} d_2 : s_2}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} \mathbf{let} \wedge(x) = d_1 \mathbf{in} d_2 : s_2} \text{ (ty-ass-elim)} \\[10pt] \frac{\Sigma, a : \sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} v : s}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} \forall^+(v) : \forall a : \sigma. s} \text{ (ty-}\forall\text{-intro)} \\[10pt] \frac{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} d : \forall a : \sigma. s \quad \Sigma \vdash_{\mathcal{S}} s_0 : \sigma}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} \forall^-(d) : s[a \mapsto s_0]} \text{ (ty-}\forall\text{-elim)} \\[10pt] \frac{\Sigma \vdash_{\mathcal{S}} s_0 : \sigma \quad \Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} d : s[a \mapsto s_0]}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} \exists(d) : \exists a : \sigma. s} \text{ (ty-}\exists\text{-intro)} \\[10pt] \frac{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} d_1 : \exists a : \sigma. s_1 \quad \Sigma, a : \sigma; \vec{P}; \Delta, x : s_1 \vdash_{\mathcal{S}} d_2 : s_2}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_{\mathcal{S}} \mathbf{let} \exists(x) = d_1 \mathbf{in} d_2 : s_2} \text{ (ty-}\exists\text{-elim)} \end{array}$$

図 5 dynamics の型付けルール

ここで、動的な項を評価するルールの表現に進む前に、ガード型とアサート型がセキュリティを強制する役割を演じるような、シナリオをスケッチしてみましょう。これらの型を理解をさらに容易にしてくれるはずです。

Example 2. Secret は命題定数で、password と action が次のような dc 型が割り当てられた 2 つの関数で宣言されている、と仮定します。

$$\underline{action} : \underline{Secret} \supset [1] \Rightarrow_{tp} 1 \quad \underline{password} : [1] \Rightarrow_{tp} \underline{Secret} \wedge 1$$

password は呼び出しが返る前になんらかの secret 情報を検証しなければならない、というような方法で実装することができます。一方では、関数呼び出し action[$\langle \rangle$] をする前に、命題 Secret を成立させなければなりません。このとき、 $\langle \rangle$ はユ

ニット型 **1** の値を意味します。もう一方、関数呼び出し $\text{password}[\langle \rangle]$ が返った後では、命題 Secret は成立しています。従って、 action 呼び出しは次のプログラムパターンでないとできないということを意味していることになります：

$$\text{let } \wedge(x) = \text{password}[\langle \rangle] \text{ in } \dots \text{action}[\langle \rangle] \dots$$

特に x のスコープ外における action 呼び出しは ill-typed です。なぜなら命題 Secret を成立させることができないからです。

値渡し (call-by-value) の意味論を動的な項に規定するにあたっては、次に定義する評価コンテキストを利用します：

$$\begin{aligned} \text{eval. ctx. } E ::= & \square \mid dc[v_1, \dots, v_{i-1}, E, d_{i+1}, \dots, d_n] \mid \\ & \text{app}(E, d) \mid \text{app}(v, E) \mid \supset^-(E) \mid \forall^-(E) \mid \\ & \wedge(E) \mid \text{let } \wedge(x) = E \text{ in } d \mid \exists(E) \mid \text{let } \exists(x) = E \text{ in } d \end{aligned}$$

Definition 2. 簡約基 (redex) と簡約 (reduction) を次のように定義します。

- $\text{app}(\text{lam}x.d, v)$ は簡約基で、その簡約は $d[x \mapsto v]$ です。
- $\supset^-(\supset^+(v))$ は簡約基で、その簡約は v です。
- $\text{let } \wedge(x) = \wedge(v) \text{ ind}$ は簡約基で、その簡約は $d[x \mapsto v]$ です。
- $\forall^-(\forall^+(v))$ は簡約基で、その簡約は v です。
- $\text{let } \exists(x) = \exists(v) \text{ ind}$ は簡約基で、その簡約は $d[x \mapsto v]$ です。
- なんらかの値 v に等しいと定義された $dcf[v_1, \dots, v_n]$ は簡約基で、その簡約は v です。

なんらかの簡約基 d とその簡約 d' について $d_1 = E[d]$ かつ $d_2 = E[d']$ のような2つの動的な項 d_1 と d_2 が与えられたとき、 $d_1 \mapsto d_2$ は1ステップで d_1 を d_2 に簡約することを意味します。 \mapsto の反射推移閉包クロージャを \mapsto^* で表わします。それぞれの動的な関数定数 dcf に割り当てられた型は妥当であると仮定します。すなわち、もし $\emptyset; \emptyset \vdash_S dcf[v_1, \dots, v_n] : s$ が導出でき、かつ $dcf[v_1, \dots, v_n] \mapsto v$ が成立するなら、 $\emptyset; \emptyset \vdash_S v : s$ が導出できるとします。

判断 J が与えられたとき、 D が J の導出であることを示すために $D :: J$ と書きます。つまり D が J を結論とする導出であることを意味しています。

Lemma 1 (Substitution). 次が成立します。

- (1) $D :: \Sigma, a : \sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S d : s$ と $D_0 :: \Sigma \vdash_S s_0 : \sigma$ を仮定します。すると $\Sigma; \vec{P}[a \mapsto s_0]; \Delta[a \mapsto s_0] \vdash_S d : s[a \mapsto s_0]$ を導出できます。
- (2) $D :: \Sigma; \vec{P}, P; \Delta \vdash_S d : s$ と $\Sigma; \vec{P} \vdash_S P$ を仮定します。すると $\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S d : s$ を導出できます。
- (3) $D :: \Sigma; \vec{P}; \Delta, x : s_1 \vdash_S d_2 : s_2$ と $\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S d_1 : s_1$ を仮定します。すると $\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S d_2[x \mapsto d_1] : s_2$ を導出できます。

Proof. (1),(2),(3) は D に関する構造的帰納法を使って簡単に証明できます。(1) と (2) を証明する際、正規性ルール (**reg-subst**) と (**reg-cut**) をそれぞれ利用する必要があります。

導出 D が与えられたとき、 D の高さを $\mathbf{h}(D)$ で表わします。これは一般的な方法で定義できます。

Lemma 2. $D :: \Sigma; \vec{P}; \Delta, x : s_1 \vdash_S d : s_2$ と $\Sigma; \vec{P} \vdash_S s'_1 \leq_{tp} s_1$ を仮定します。すると $\mathbf{h}(D') = \mathbf{h}(D)$ となるような導出 $D' :: \Sigma; \vec{P}; \Delta, x : s'_1 \vdash_S d : s_2$ が存在します。

Proof. 証明は D に対する構造帰納法を使えばすぐに得られます。 D に最後に適用されたルールが (**ty-var'**) であるような場合を扱うために、規則ルール (**reg-trans**) を使います。

ルール (**tyrule-eq**) が存在するために、次の反転は一般的なものと少し異なります。

Lemma 3 (Inversion). $D :: \Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S d : s$ を仮定します。

- (1) もし $d = \text{lam}x.d_1$ かつ $s = s_1 \rightarrow_{tp} s_2$ ならば $\mathbf{h}(D') \leq \mathbf{h}(D)$ であるような導出 $D' :: \Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S d : s$ が存在します。なおかつ D' に適用された最後のルールは (**ty-sub**) ではありません。
- (2) もし $d = \supset^+(\supset^-(d_1))$ かつ $s = P \supset s_1$ ならば $\mathbf{h}(D') \leq \mathbf{h}(D)$ であるような導出 $D' :: \Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S d : s$ が存在します。なおかつ D' に適用された最後のルールは (**ty-sub**) ではありません。
- (3) もし $d = \wedge(d_1)$ かつ $s = P \wedge s_1$ ならば $\mathbf{h}(D') \leq \mathbf{h}(D)$ であるような導出 $D' :: \Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S d : s$ が存在します。なおかつ D' に適用された最後のルールは (**ty-sub**) ではありません。
- (4) もし $d = \forall^+(\forall^-(d_1))$ かつ $s = \forall a : \sigma. s_1$ ならば $\mathbf{h}(D') \leq \mathbf{h}(D)$ であるような導出 $D' :: \Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S d : s$ が存在します。な

おかつ D' に適用された最後のルールは **(ty-sub)** ではありません。

(5) もし $d = \exists(d_1)$ かつ $s = \exists a : \sigma.s_1$ ならば $\mathbf{h}(D') \leq \mathbf{h}(D)$ であるような導出 $D' :: \Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S d : s$ が存在します。なおかつ D' に適用された最後のルールは **(ty-sub)** ではありません。

Proof. $\mathbf{h}(D)$ に関する帰納法を使います。特に、(1) を成立するために Lemma 2 が必要になります。

ATS の型の健全性は次に示す 2 つの定理に基づいています。これらの証明は一般的であるため、ここでは省略します。

Theorem 1 (Subject Reduction). $D :: \Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S d : s$ と $d \hookrightarrow d'$ の両方を仮定します。すると $\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S d' : s$ を導出できます。

Theorem 2 (Progress). $D :: \emptyset; \emptyset; \emptyset \vdash_S d : s$ を仮定します。すると、 d は値となるか、もしくはなんらかの動的な項 d' について $d \hookrightarrow d'$ が成立するか、もしくはなんらかの簡約基でない動的な項 $dcf(v_1, \dots, v_n)$ について $d = E[dcf(v_1, \dots, v_n)]$ が成立します。

2.3 型消去済の動的な項

動的な項から、意味論を維持した型無しのラムダ式に変換する関数を示します。次のように形式的に定義された、型消去済の動的な項 (erasure) を e で表わします:

$$\begin{aligned} \text{erasures} \quad e &::= x \mid dc[e_1, \dots, e_n] \mid \mathbf{lam} \ x.e \mid \mathbf{app}(e_1, e_2) \mid \mathbf{let} \ x = e_1 \mathbf{in} \ e_2 \\ \text{erasure values } w &::= x \mid dcc[w_1, \dots, w_n] \mid \mathbf{lam} \ x.e \end{aligned}$$

すると、動的な項から型消去済の動的な項への変換する、次のような関数 $|\cdot|$ を定義できます。

$$\begin{aligned} |x| &= x & |dc[d_1, \dots, d_n]| &= dc[|d_1|, \dots, |d_n|] \\ |\mathbf{lam} \ x.d| &= \mathbf{lam} \ x.|d| & |\mathbf{app}(d_1, d_2)| &= \mathbf{app}(|d_1|, |d_2|) \\ |\top^+(d)| &= |d| & |\top^-(d)| &= |d| \\ |\wedge^+(d)| &= |d| & |\mathbf{let} \ \wedge(x) = d_1 \mathbf{in} \ d_2| &= \mathbf{let} \ x = |d_1| \mathbf{in} \ |d_2| \\ |\forall^+(d)| &= |d| & |\forall^-(d)| &= |d| \\ |\exists(d)| &= |d| & |\mathbf{let} \ \exists(x) = d_1 \mathbf{in} \ d_2| &= \mathbf{let} \ x = |d_1| \mathbf{in} \ |d_2| \end{aligned}$$

Theorem 3. $D :: \emptyset; \emptyset; \emptyset \vdash_S d : s$ を仮定したとき

(1) もし $d \hookrightarrow^* v$ ならば $|d| \hookrightarrow^* |v|$ です。

(2) もし $|d| \hookrightarrow^* w$ ならば $d \hookrightarrow^* v$ かつ $|v| = w$ であるような値 v が存在します。

Proof. (1) は自明です。(2) は D に対する構造帰納法から得られます。

Theorem 3 を用いると、動的な項 d を評価するには、 d の型消去 $|d|$ を評価すれば良いことになります。

3. 拡張

この節では、ATS を拡張して一般的で現実的なプログラミング機能のいくつかをサポートします。

General Recursion ATS で general recursion をサポートするために、不動点演算子 **fix** を導入します。ここでは、変数 x を **lam** 変数と呼び、**fix** 変数 f を導入します。**lam** 変数が **fix** 変数のいずれかである変数を xf で表わします。

$$\begin{aligned} \text{dyn. terms} \quad d &::= \dots \mid f \mid \mathbf{fix} \ f.d \\ \text{dyn. var. ctx.} \quad \Delta &::= \dots \mid \Delta, f : s \\ \text{dyn. subst.} \quad \Theta_D &::= \dots \mid \Theta_D[f \mapsto d] \end{aligned}$$

ルール **(ty-var)** が変更を受けるために必要で、ルール **(ty-fix)** に不動点演算子の扱いを追加する必要があります:

$$\frac{\vdash_S \Sigma; \vec{P}; \Delta \quad \Delta(xf) = s}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S xf : s'} \quad (\mathbf{ty-var}) \qquad \frac{\Sigma; \vec{P}; \Delta, f : s \vdash_S d : s}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S \mathbf{fix} \ f.d : s} \quad (\mathbf{ty-fix})$$

fix $f.d$ の形の動的な項は簡約基で、その簡約は $d[f \mapsto \mathbf{fix} \ f.d]$ になります。この拡張について、subject reduction 定理 (Theorem 1) と progress 定理 (Theorem 2) の両方が素直に成立します。

Datatypes and Pattern Matching ATS を拡張してデータ型とパターンマッチをサポートするアプローチを示します。

patterns $p ::= x \mid dcc[p_1, \dots, p_n]$
 dyn. terms $d ::= \dots \mid \mathbf{case} d_0 \mathbf{of} p_1 \Rightarrow d_1 \mid \dots \mid p_n \Rightarrow d_n$
 eval. ctx. $E ::= \dots \mid \mathbf{case} E \mathbf{of} p_1 \Rightarrow d_1 \mid \dots \mid p_n \Rightarrow d_n$

それからいくつかの簡単な例を紹介します。次のような追加の構文が必要になります。

いつものように、どのような変数 x もパターン中に一度だけ登場できます。値 v とパターン p が与えられたとき、 $v = p[\Theta_D]$ を示すのに $v \Downarrow p \Rightarrow \Theta_D$ の形の判断を使います。そのような判断を導出するためのルールは次のように与えられます。

$$\frac{}{v \Downarrow x \Rightarrow [x \mapsto v]} \text{ (vp-var)} \quad \frac{v_i \Downarrow p_i \Rightarrow \Theta_D^i \text{ for } 1 \leq i \leq n}{dcc[v_1, \dots, v_n] \Downarrow dcc[p_1, \dots, p_n] \Rightarrow \Theta_D^1 \cup \dots \cup \Theta_D^n} \text{ (vp-dcc)}$$

なんらかの動的な置換 Θ_D について $v \Downarrow p \Rightarrow \Theta_D$ が導出できるとき、 v は p にマッチすると言います。ルール (vp-dcc) において、 $n = 0$ のとき空の動的な置換 $[]$ になるようなユニオン $\Theta_D^1 \cup \dots \cup \Theta_D^n$ は well-defined であることに注意してください。なぜなら、1 つのパターン中にどのような変数も最大一度まで登場できるからです。

$1 \leq i \leq n$ について $v \Downarrow p_i \Rightarrow \Theta_D^i$ が成立するなら、 $\mathbf{case} v \mathbf{of} p_1 \Rightarrow d_1 \mid \dots \mid p_n \Rightarrow d_n$ の形の動的な項は簡約基で、その簡約は $d_i[\Theta_D^i]$ になります。もし v が複数のパターン p_i にマッチするなら、このような簡約基の簡約は非決定性を引き起こすかもしれないことに注意してください。

$$\frac{\Sigma \vdash_S s : type}{\Sigma \vdash x \Downarrow s \Rightarrow \emptyset; \emptyset, x : s} \text{ (pat-var)}$$

$$\frac{\begin{array}{l} \mathcal{S}(dcc) = \forall \Sigma_0. \vec{P}_0 \supset ([s_1, \dots, s_n] \Rightarrow_{tp} scc[\vec{s}_0]) \\ \Sigma, \Sigma_0 \vdash p_i \Downarrow s_i \Rightarrow \Sigma_i; \vec{P}_i; \Delta_i \text{ for } 1 \leq i \leq n \\ \Sigma' = \Sigma_1, \dots, \Sigma_n \quad \vec{P}' = \vec{P}_1, \dots, \vec{P}_n \quad \Delta' = \Delta_1, \dots, \Delta_n \end{array}}{\Sigma \vdash dcc[p_1, \dots, p_n] \Downarrow scc[\vec{s}] \Rightarrow \Sigma_0, \Sigma'; \vec{P}_0, scc[\vec{s}_0] \leq_{tp} scc[\vec{s}], \vec{P}'; \Delta'} \text{ (pat-dc)}$$

$$\frac{\Sigma \vdash p \Downarrow s_1 \Rightarrow \Sigma'; \vec{P}'; \Delta' \quad \Sigma, \Sigma'; \vec{P}, \vec{P}'; \Delta, \Delta' \vdash_S d : s_2}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash p \Rightarrow d \Downarrow s_1 \Rightarrow s_2} \text{ (ty-cla)}$$

$$\frac{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S d_0 : s_1 \quad \Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash p_i \Downarrow d_i : s_1 \Rightarrow s_2 \text{ for } 1 \leq i \leq n}{\Sigma; \vec{P}; \Delta \vdash_S (\mathbf{case} d_0 \mathbf{of} p_1 \Rightarrow d_1 \mid \dots \mid p_n \Rightarrow d_n) : s_2} \text{ (ty-cas)}$$

図 6 パターンマッチの型付けルール

パターンマッチの型付けルールを図 6 に示します。 $\Sigma \vdash p \Downarrow s \Rightarrow \Sigma'; \vec{P}'; \Delta'$ の判断の意味は、次の補題で形式的に捕捉されます。

Lemma 4. $D :: \emptyset; \emptyset; \emptyset \vdash_S v : s, \varepsilon_1 :: \emptyset \vdash p \Downarrow s \vdash \Sigma; \vec{P}; \Delta$ と $\varepsilon_2 :: v \Downarrow p \Rightarrow \Theta_D$ を仮定します。すると、 \vec{P} のそれぞれの P について $\emptyset; \emptyset \vdash_S P[\Theta_S]$ であり、かつ $\emptyset; \emptyset; \emptyset \vdash_S \Theta_D : \Delta$ ような $\Theta_S : \Sigma$ が存在します。

Proof. この補題は ε_1 における構造帰納法から得られます。

例として、次の判断は導出可能です。

$$a' : type, n' : int \vdash \underline{cons}[x_1, x_2] \Downarrow \mathbf{list}[a', n'] \Rightarrow \Sigma; \vec{P}; \Delta$$

ここで \underline{cons} には次の dc 型が割り当てられているものとします。

$$\forall a : type. \forall n : int. n \geq 0 \supset ([a, \mathbf{list}[a, n]] \Rightarrow_{tp} \mathbf{list}[a, n+1])$$

なおかつ $\Sigma = (a : type, n : int)$ 、 $\vec{P} = (n \geq 0, \mathbf{list}[a, n+1] \leq_{tp} \mathbf{list}[a', n'])$ 、かつ $\Delta = (x_1 : a, x_2 : \mathbf{list}[a, n])$ です。

この拡張において subject reduction 定理 (Theorem 1) はすぐに証明できます: 今しがた簡約された簡約基が次の形になる場合を扱うために、Lemma 4 が必要になります。

また、この拡張において progress 定理 (Theorem 2) を成立させることができます。このとき well-typed なプログラム d

$$\text{case } d_0 \text{ of } p_1 \Rightarrow d_1 \mid \dots \mid p_n \Rightarrow d_n$$

$$E[\text{case } v_0 \text{ of } p_1 \Rightarrow d_1 \mid \dots \mid p_n \Rightarrow d_n]$$

が次の形を取る可能性を考慮するために、定理のわずかな修正が必要です。即ち、well-typed なプログラム d が次の形を取ることを許容します。

$1 \leq i \leq n$ について v_0 はどのような p_i にもマッチしなければ、 d が値でもなく簡約可能でもありません。しかしここでは progress すると見なすことにします。

Effects PTS と異なり、**ATS** は参照や例外のような作用をサポートする際にも素直な方法で拡張できます。例えば、参照を **ATS** に導入するためには、単に sc 種 $[type] \Rightarrow type$ の型コンストラクタ ref と、次のように対応する dc 型が割り当てられた動的な関数を宣言すれば事足ります。

$$\begin{aligned} \text{mkref} &: \forall a : type. [a] \Rightarrow_{tp} \text{ref}(a) \\ \text{deref} &: \forall a : type. [\text{ref}(a)] \Rightarrow_{tp} a \\ \text{assign} &: \forall a : type. [\text{ref}(a), a] \Rightarrow_{tp} 1 \end{aligned}$$

これらの関数の意図する意味は明らかです。また、 ref が \leq_{tp} について共変でも反変でもない型コンストラクタになってしまう問題に対処するため、Definition 1 に次の規則条件を追加する必要があります。

- $\Sigma; \vec{P} \models_s \text{ref}(s) \leq_{tp} \text{ref}(s')$ は $\Sigma; \vec{P} \models_s s \leq_{tp} s'$ と $\Sigma; \vec{P} \models_s s' \leq_{tp} s$ を意味します。

この拡張に動的な意味論を割り当てる手法は一般的なもので、subject reduction 定理と progress 定理の両方を成立できます。この手法の詳細については [Har94] を参照してください。

同様に **ATS** に例外を導入することも素直な方法で可能です。そのため詳細は省略します。

4. Applied Type System の例

驚くことではありませんが、 $\lambda\text{-cube}$ [Bar92] における System λ_2 と λ_ω が applied type system であることは簡単に示すことができます。また guarded recursive datatypes で λ_2 を拡張した $\lambda_{G\mu}$ 言語 [XCC03] と Dependent ML [XP99] も applied type system です。より詳細な説明は [Xi03] を参照してください。

5. 関連研究と結論

ATS フレームワークは、依存データ型を使って ML の型システムを改良した Dependent ML [XP99, Xi98] と、最新の研究である guarded recursive datatypes [XCC03] の成果に基づいています。これら 2 つの型 ^{*4} の間に類似点を見つけた私達は、自然にこれらの統一された表現の探求に導かれました。

Haskell の型クラスの根底にある qualified types [Jon94] に精通した人に対して、qualified type はガード型と見なせないことを指摘しておきます。その単純な理由は、applied type system におけるガードの証明が計算上の意味を持っていないことです。つまり、プログラムの実行時の挙動に影響を及ぼすことができないのです。しかし、qualified types の環境における型の述語の証明である dictionary はプログラムの実行時の挙動に影響を与えることができ、また多くの場合実際に影響を与えます。

別方向の関連研究として certified binaries のための型システム [SSTP02] があります。これもまた型とプログラムを完全に分離するアイデアです。帰納的な定義で拡張した calculus of constructions (CiC) [PPM89, PM93] にこの型言語は基づいているとはいえ、基本的にこの型システムにおける型言語と計算言語の概念は、それぞれ **ATS** の statics と dynamics の概念に相当します。けれども、**ATS** における制約関係の概念は [SSTP02] の体系には相当するものがありません。その代わりに、型の正規形を比較することで、2 つの型の等価性を決定できます。私達が applied type system と関連した制約関係の証明を効果的に表現/検証する手段さえあれば、[SSTP02] の意味での binary を保証する applied type system を構築することも困難ではありません。

要約すると、実用的なプログラミングをサポートするための型システムのデザインと形式化を促進する、**ATS** フレームワークを示しました。statics と dynamics を完全に分離することで、**ATS** は作用の存在下における依存型のサポートに特に威力を発揮します。また、**ATS** のガード型とアサート型を使うことで、より柔軟により効果的にプログラムの不変条件

^{*4} 実際には guarded recursive datatypes を、型が型をインデックスするような "依存型" として考えることができます。

を捕捉できます。これまで研究されてきた依存型 [XP99,Xi98] と guarded recursive datatypes [XCC03] の統一化と一般化であると、*ATS* をとらえることもできます。

現時点では *ATS* の静的な部分は単純型付きラムダ計算に基づいています。従って、静的な部分を多相性と依存型をサポートする型付きラムダ計算の上に構築する研究に自然と繋がります。また、*ATS* に基づく型システムを使って関数型プログラミング言語をデザイン/実装することに、私達は特に興味を持っています。それは既存の言語において新しい言語構造を実装するような方法で、言語拡張を行なう手段を提供できるでしょう。

謝辞 Assaf Kfoury からこの論文のドラフトに対するコメントをもらいました。また、Chiyen Chen とはこの論文の主題について議論しました。感謝します。

(本翻訳は Kiwamu Okabe によって行なわれ、Jun Inoue によって詳細な添削が行なわれました。感謝します。)

参考文献

(xxx 訳注: 元論文を参照してください xxx)