



# Uma Certificação em Coq do Algoritmo W Monádico

Rafael Castro

rafaelcgs10@gmail.com

Departamento de Ciência da Computação  
Centro de Ciências e Tecnológicas  
Universidade do Estado de Santa Catarina

22 de Agosto de 2019



# Sumário

- Introdução
- Fundamentos
- Certificação do Algoritmo W



# Introdução



# Introdução - Sistemas de Tipos

- Sistemas de tipos são relações que ditam quais expressões podem ser associadas a quais tipos.
- Nas linguagens de programação, classificavam os dados para serem tratados corretamente pelo processador;
- Passaram a ser utilizados como uma técnica para identificar falhas na consistência de programas.
- Tipagem estática e dinâmica:
  - Estática: atribuições de tipo não mudam em *run time*; uma forma de verificação automática.
  - Dinâmica: atribuições de tipo **podem mudar** em *run time*; mais permissível; mais permissível a erros.

[1, 'a', objeto, [2]]



# Introdução - Inferência de Tipos e Polimorfismo

- A **inferência de tipos** é o processo de encontrar a assinatura de tipo de um programa.
- Liberdade ao programador de escolher anotar ou não os tipos das funções.
- Polimorfismo é quando uma função pode assumir vários usos com diferentes tipos de dados. Em especial, o polimorfismo paramétrico é feito pela quantificação de variáveis de tipos.

```
reverse :: [a] -> [a]
```



# Introdução - Algoritmo para Inferência de Tipos

- O **algoritmo W** é um algoritmo para a inferência de tipos no sistema Damas-Milner.  
Uma das bases para a inferência em Haskell e OCaml.
- *Idealmente* um algoritmo de inferência deve *representar* o que o seu sistema de tipos define.
- Formalmente isso é *Soundness* e *Completeness*.
- *Essas propriedades são diretamente refletidas nas implementações?*



# Introdução - Provas mecanizadas

- O uso de assistentes de provas na pesquisa de linguagens de programação.
- Aproximam formalização e implementação.
- Reduzem o trabalho da verificação da prova.
- *PoplMark Challenge* e *Principles of Programming Languages* (POPL)



# Introdução - O que é este trabalho?







# Introdução - O que é este trabalho?

Uma Certificação em Coq do  
Algoritmo W Monádico



# Introdução - O que é este trabalho?

## Uma Certificação em Coq do Algoritmo W Monádico

- Uma completa certificação de uma implementação monádica do **algoritmo W** no assistentes de provas Coq.
- Certificação do algoritmo de unificação.
- Uso da *Hoare State Monad* (HSM) para certificar o código monádico.



## Introdução - Objetivos específicos

- Uma implementação certificada do **algoritmo de unificação**: consistência, completude e terminação.
- Modificar a *Hoare State Monad* para lidar com o efeito de exceção necessário no algoritmo W e avaliar as qualidades dessa técnica.
- Provar a consistência e a completude do algoritmo W monádico.



# Fundamentos



# Fundamentos - Damas-Milner e algoritmo W

- Damas-Milner: polimorfismo via *let*: forma restrita de polimorfismo.
- O algoritmo W é consistente e completo em relação as regras de Damas-Milner.
- Consistência (*Soundness*): O que o algoritmo W infere pode ser demonstrado pelas regras de Damas-Milner.
- Completude (*Completeness*): Se o sistema Damas-Milner mostra que  $e$  tem o tipo  $\tau$ , então o algoritmo infere para  $e$  o tipo  $\tau'$ , de maneira que  $\tau = \mathbb{R}(\tau')$  para alguma substituição  $\mathbb{R}$ .



## Fundamentos - Trabalhos relacionados

- [Dubois and Ménissier-Morain, 1999] forneceram provas em Coq de consistência e completude do algoritmo W. As propriedades da unificação foram tomadas como axiomas e *binding* de variáveis é resolvido com *de Bruijn indices*.
- [Naraschewski and Nipkow, 1999] também apresentaram provas de consistência e completude do algoritmo W, mas em Isabelle/HOL. As propriedades da unificação também foram assumidas como axiomas e *de Bruijn indices* também foi utilizado.
- [Kothari and Caldwell, 2009] relataram um resultado parcial na certificação em Coq da extensão polimórfica do algoritmo de Wand.
- [Tan et al., 2015] verificaram a inferência de tipos de CakeML, uma linguagem baseada em SML (Standard ML) cujo compilador tem um *backend* completamente verificado [Kiam Tan et al., 2019]. As provas de consistência e completude da inferência de tipos foram feitas no assistente de provas HOL4.

# Fundamentos - Hoare State Monad

- *Hoare State Monad* (HSM): apresentada por [Swierstra, 2009]  
Uma variante da usual mônada de estados.
- Verificação de programas com efeitos de estado.
- Um tipo `HoareState p a q` : a pré-condição, o tipo do valor de retorno e a pós-condição.

```
Program Definition HoareState (pre : Pre) (a : Type) (post : Post a) : Type :=  
  forall i : {t : st | pre t}, {(x, f) : a * st | post i x f}.
```

```
Program Definition ret (a : Type) : forall x,  
  @HoareState top a (fun i y f => i = f /\ y = x) := fun x s => (x, s).
```

```
Program Definition bind : forall a b P1 P2 Q1 Q2,  
  (@HoareState P1 a Q1) -> (forall (x : a), @HoareState (P2 x) b (Q2 x)) ->  
  @HoareState (fun s1 => P1 s1 /\ forall x s2, Q1 s1 x s2 -> P2 x s2)  
    b  
  (fun s1 y s3 => exists x, exists s2, Q1 s1 x s2 /\ Q2 x s2 y s3) :=  
    fun a b P1 P2 Q1 Q2 c1 c2 s1 => match c1 s1 as y with  
      | (x, s2) => c2 x s2  
    end.
```

Figura: A Mônada de Estado de Hoare.

# Fundamentos - *Hoare Exception-State Monad*

- O algoritmo W tem dois tipos de efeitos: estado e exceção.
- *Hoare Exception-State Monad* (HESM):  
embute-se o tipo *sum* na definição de HoareState.

```
Program Definition HoareState (B:Prop) (pre:Pre) (a:Type) (post:Post a) : Type :=  
  forall i : {t : st | pre t},  
    {e : sum (prod a st) B | match e with  
      | inl (x, f) => post (proj1_sig i) x f  
      | inr _ => True  
    end}.  
end.
```

```
Program Definition bind : forall a b P1 P2 Q1 Q2 B,  
  (@HoareState B P1 a Q1) -> (forall (x:a), @HoareState B (P2 x) b (Q2 x)) ->  
  @HoareState B (fun s1 => P1 s1 /\ forall x s2, Q1 s1 x s2 -> P2 x s2) b  
    (fun s1 y s3 => exists x, exists s2, Q1 s1 x s2 /\ Q2 x s2 y s3) :=  
  fun B a b P1 P2 Q1 Q2 c1 c2 s1 => match c1 s1 as y with  
    | inl (x, s2) => c2 x s2  
    | inr R => _  
  end.
```

Figura: A Mônada de Estado-Exceção de Hoare.





## Certificação do algoritmo W



# Certificação do algoritmo W - Unificação I

- O algoritmo de unificação [Robinson, 1965] é parte fundamental do algoritmo W.
- Modifica-se a certificação da unificação realizada por [Ribeiro and Camarão, 2016]:
  - A operação da substituição é de reformulada para ser não-incremental.
  - O algoritmo é reescrito para unificar somente dois tipos, ao invés de uma lista de tipos.
- A unificação não é recursão estrutural. A prova de terminação é feita por uma relação bem-fundada sobre uma ordenação lexicográfica.
- Essas modificações resultaram em algumas alterações não triviais na prova de terminação.



# Certificação do algoritmo W - Unificação II

- Os tipos (monomórficos) são definidos em Coq como tipos indutivos, onde os identificadores são números naturais.
- A substituição de tipos é definida em Coq como uma lista de duplas de identificadores de tipo e tipos.  
Acompanhado de uma operação de aplicação da substituição.



# Certificação do algoritmo W - Damas-Milner em Coq I

- O trabalho de [Dubois and Ménissier-Morain, 1999] é a principal referência desta formalização.
- Termos e tipos da linguagem de Damas-Milner são definidos em Coq como tipos indutivos.
- A linguagem dos tipos é dividida em duas:
  - Tipos monomórficos.
  - Tipos polimórficos: possuem um construtor a mais para representar variáveis quantificadas.



# Certificação do algoritmo W - Damas-Milner em Coq II

- Contextos são representados como listas de duplas de identificadores e tipos polimórficos.
- As regras de tipagem do sistema Damas-Milner são utilizadas na versão *syntax-directed*, pelo o tipo indutivo `has_type`.
- Essas modificações resultaram em algumas alterações não triviais na prova de terminação.
  - Árvores de provas tem um único formato para cada termo lambda
  - Quantificação e instanciação estão embutidas, respectivamente, nas regras para variáveis e *lets*.



# Certificação do algoritmo W - Instanciação de tipos

- Tipos polimórficos são instanciados para tipos monomórficos por meio de uma operação de substituição especial chamada.
- Definiu-se uma forma de substituição: `inst_subst` é apenas uma lista de tipos monomórficos, ao invés de uma lista de associatividade.
- O número  $n$  na variável quantificada associada com o tipo encontrado na  $n$ -ésima posição em `inst_subst`.



# Certificação do algoritmo W - Generalização de tipos

## A problemática da generalização

- $\alpha$  e  $\beta$  são duas variáveis de tipo sintaticamente distintas.
- Não ocorrem livres no contexto considerado.
- Os tipos  $\alpha \rightarrow \alpha$  and  $\beta \rightarrow \beta$  são quantificados, respectivamente, para  $\forall \alpha, \alpha \rightarrow \alpha$  e  $\forall \beta, \beta \rightarrow \beta$ .
- Sintaticamente diferentes, mas representam exatamente o mesmo conjunto de tipos.



# Certificação do algoritmo W - Generalização de tipos

## A problemática da generalização

- $\alpha$  e  $\beta$  são duas variáveis de tipo sintaticamente distintas.
- Não ocorrem livres no contexto considerado.
- Os tipos  $\alpha \rightarrow \alpha$  and  $\beta \rightarrow \beta$  são quantificados, respectivamente, para  $\forall \alpha, \alpha \rightarrow \alpha$  e  $\forall \beta, \beta \rightarrow \beta$ .
- Sintaticamente diferentes, mas representam exatamente o mesmo conjunto de tipos.
- *Binding* de variáveis costuma dificultar provas. Utiliza-se de *Bruijn indices* para lidar com as variáveis quantificadas e evitar lidar com equivalência  $\alpha$ .
- A função de `gen_ty` quantifica as variáveis de tipo são quantificados linearmente: se `var n` é a  $m$ -ésima variável de tipo, então essa é convertida em `sc_gen m`.





# Certificação do algoritmo W - A algoritmo W monádico

- O algoritmo W foi implementado de forma monádica com a HESM.
- A certificação é dada pela assinatura com tipos dependentes:

```
Program Fixpoint W (e:term) (G:ctx) {struct e} :  
  Infer (fun i => new_tv_ctx G i) (ty * substitution)  
    (fun i x f => i <= f /\ new_tv_subst (snd x) f /\ new_tv_ty (fst x) f /\  
      new_tv_ctx (apply_subst_ctx (snd x) G) f /\  
      has_type (apply_subst_ctx ((snd x)) G) e (fst x) /\  
      completeness e G (fst x) ((snd x)) i) :=
```



# Certificação do algoritmo W - Prova de consistência

- Enunciado por `has_type` sobre o resultado do algoritmo W.
- Trivial para a maioria dos casos:
  - O caso da aplicação: requer o lema da estabilidade da substituição.
  - O caso do termo *let*: requer vários lemas e definições auxiliares, incluindo sobre listas disjuntas<sup>1</sup>, sub-listas e substituições de renomeação.

---

<sup>1</sup>Cujo predicado chama-se `are_disjoints`



# Certificação do algoritmo W - Substituição de renomeação

- A substituição de renomeação é uma substituição com tais características em que:
  - Cada variável no domínio ( $id$ ) mapeia para uma variável ( $id$ ).
  - O domínio e a imagem da substituição são disjuntos.
  - Duas distintas variáveis no domínio têm diferentes imagens.
- Definido pelo tipo `ren_subst`, implementado como uma lista de associatividade entre identificadores.
- Condições são formalizadas no tipo indutivo: `is_rename_subst`.
- A prova do caso  $let^2$  requer a demonstração da existência de uma substituição de renomeação em especial: o domínio é uma lista de variáveis  $l$  e que não mapeia para as listas de variáveis  $l1$  e  $l2$ .

---

<sup>2</sup>Para a prova de consistência do algoritmo W e do lema da estabilidade da tipagem sobre a substituição



# Certificação do algoritmo W - Estabilidade da substituição

- O lema da estabilidade da substituição é uma propriedade clássica em sistemas de tipos.
- Se é verdade que  $\Gamma \vdash e : \tau$ , então para qualquer substituição  $S$  tem-se  $S\Gamma \vdash e : S\tau$ .
- Casos monomórficos são fáceis.
- O caso polimórfico do `let_ht` requer uma prova sobre a comutação de uma generalização de tipo (de algum  $\tau$ ) com uma substituição de tipo  $s$ .

Condição: condição: a substituição  $s$  não pode estar relacionada com as variáveis a serem quantificadas  $\tau$

- Computa-se uma substituição  $\rho$  que renomeia as variáveis de tipo em  $\tau$  que devem ser generalizadas em novas variáveis de tipos que não ocorrem na substituição  $s$  e não são livres no contexto considerado.



# Certificação do algoritmo W - Estabilidade da substituição

- O lema da estabilidade da substituição é uma propriedade clássica em sistemas de tipos.
- Se é verdade que  $\Gamma \vdash e : \tau$ , então para qualquer substituição  $S$  tem-se  $S\Gamma \vdash e : S\tau$ .
- Casos monomórficos são fáceis.
- O caso polimórfico do `let_ht` requer uma prova sobre a comutação de uma generalização de tipo (de algum  $\tau$ ) com uma substituição de tipo  $s$ .

Condição: condição: a substituição  $s$  não pode estar relacionada com as variáveis a serem quantificadas  $\tau$

- Computa-se uma substituição  $\rho$  que renomeia as variáveis de tipo em  $\tau$  que devem ser generalizadas em novas variáveis de tipos que não ocorrem na substituição  $s$  e não são livres no contexto considerado.

A definição de completude é:

```
Definition completeness (e:term) (G:ctx) (tau:ty) (s:substitution) (st:id) :=  
  forall (tau':ty) (phi:substitution),  
    has_type (apply_subst_ctx phi G) e tau' ->  
    exists s', tau' = apply_subst s' tau /\  
    (forall x:id, x < st ->  
      apply_subst phi (var x) = apply_subst s' (apply_subst s (var x))).
```

- A HESM é útil nesta prova, pois permite raciocinar sobre o estado do contador.
- É necessário apresentar (computar) quem é a substituição  $s'$ .
- O caso da aplicação se utiliza do fato da unificação computada ser a mais geral.
- A maior dificuldade novamente é o caso do termo *let*, que requer raciocínio sobre a criação de novas variáveis de tipo e a relação de mais geral entre tipos.



## Certificação do algoritmo W - Novas variáveis de tipo

- A existência de novas variáveis de tipo é tomada como garantida numa prova com papel e caneta, mas deve ser demonstrada numa prova mecanizada.
- É suficiente mostrar que o atual estado na mônada é maior que todos os números das variáveis de livres no contexto atual.
- A relação é definida para tipos monomórficos (`new_tv_ty`), para *schemes* (`new_tv_schm`), para contextos (`new_tv_ctx`) e para substituições (`new_tv_subst`).
- Diversos lemas sobre essa relação foram necessários.
- A assinatura do algoritmo de unificação garante que o mesmo não cria novas variáveis de tipo.
- A assinatura de tipos do algoritmo W garante que o estado é sempre novo em relação ao resultado do algoritmo.



# Certificação do algoritmo W - Relação mais geral

- A relação mais geral ( $\geq$ ) é definida formalmente no Damas-Milner.
- Aqui defini-se de forma mais estrita pelo tipo `is_schm_instance`: se um *scheme*  $\sigma_1$  é mais geral que outro  $\sigma_2$ , então toda instância de  $\sigma_2$  também é uma instância de  $\sigma_1$
- Essa relação é estendida para contextos.
- Diversos lemas sobre essas relações foram necessários, especial:
  - “Tipagem em um contexto mais geral”: se é possível construir uma prova de  $\Gamma_2 \vdash e : \tau$ , então também é possível construir uma prova de  $\Gamma_1 \vdash e : \tau$ , onde  $\Gamma_1$  é mais geral que  $\Gamma_2$ .





## Certificação do algoritmo W - Análise da prova

- A HESM é um tipo dependente: o programa, cujo tipo é a sua especificação, e a sua prova são desenvolvidos na mesma etapa.
- Program permiti que elementos da prova sejam postergados como obrigações de provas e a escrita do programa seja feita como em tipos simples, evitando casamentos de padrão dependentes.
- As informações presentes no contexto são similares as suposições feitas na prova com papel e caneta do algoritmo W [Damas, 1984]
- Evitou-se diversos lemas auxiliares *deselegantes* relacionados ao estado do contador e lemas que são hipóteses de indução.



# Conclusão

- Algumas modificações não triviais na certificação do algoritmo de unificação apresentado por [Ribeiro and Camarão, 2016].
- Modificou-se a *Hoare State Monad* para lidar com exceções.
- Apresentou-se uma certificação completa em Coq do algoritmo, cujo código pode ser extraído e executado.
- Uso da HESM para a certificação de um algoritmo de inferência de tipos.



# References I



Damas, L. M. M. (1984).

Type Assignment in Programming Languages.  
(CST-33-85).



Dubois, C. and Ménissier-Morain, V. (1999).

Certification of a Type Inference Tool for ML: Damas-Milner  
within Coq.

*Journal of Automated Reasoning*, 23(3-4):319–346.



Kiam Tan, Y., Myreen, M. O., Kumar, R., Fox, A., Owens, S.,  
and Norrish, M. (2019).

The Verified CakeML Compiler Backend.

*Journal of Functional Programming*, 29.



## References II



Kothari, S. and Caldwell, J. L. (2009).

Toward a machine-certified correctness proof of Wand's type reconstruction algorithm.



Naraschewski, W. and Nipkow, T. (1999).

Type Inference Verified: Algorithm script W sign in Isabelle/HOL.

*Journal of Automated Reasoning*, 23(3-4):299–318.



Ribeiro, R. and Camarão, C. (2016).

A mechanized textbook proof of a type unification algorithm.  
In Cornélio, M. and Roscoe, B., editors, *Formal Methods: Foundations and Applications*, Cham.



## References III



Robinson, J. A. (1965).  
A machine-oriented logic based on the resolution principle.  
*J. ACM*, 12(1):23–41.



Swierstra, W. (2009).  
The Hoare State Monad.  
*Technology*, pages 440–451.



Tan, Y. K., Owens, S., and Kumar, R. (2015).  
A verified type system for CakeML.  
pages 1–12.