

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA



INTEGRATING TYPE OPERATORS INTO THE FREEST PROGRAMMING LANGUAGE

Paula Inês Garcias Lopes

Mestrado em Engenharia Informática

Especialização em Designação da Especialização / Perfil, se aplicável

Versão Provisória

Dissertação orientada por:
Prof^a. Doutora Vasco T. Vasconcelos
Prof. Doutor Diana Costa

2024

Agradecimentos

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat. Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Nam liber tempor cum soluta nobis eleifend option congue nihil imperdiet doming id quod mazim placerat facer possim assum. Typi non habent claritatem insitam; est usus legentis in iis qui facit eorum claritatem. Investigationes demonstraverunt lectores legere me lius quod ii legunt saepius. Claritas est etiam processus dynamicus, qui sequitur mutationem consuetudinum lectorum. Mirum est notare quam littera gothica, quam nunc putamus parum claram, anteposuerit litterarum formas humanitatis per seacula quarta decima et quinta decima. Eodem modo typi, qui nunc nobis videntur parum clari, fiant sollemnes in futurum. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat. Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Nam liber tempor cum soluta nobis eleifend option congue nihil imperdiet doming id quod mazim placerat facer possim assum. Typi non habent claritatem insitam; est usus legentis in iis qui facit eorum claritatem. Investigationes demonstraverunt lectores legere me lius quod ii legunt saepius.

Dedicatória.

Resumo

Os documentos escritos em Português devem ter um resumo em Português e um resumo noutra língua comunitária que contenham até 300 palavras cada. Quando o conselho científico autorizar a apresentação do trabalho final escrito em língua estrangeira, este deve ser acompanhado de um resumo adicional em Português de, pelo menos, 1200 palavras.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat. Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Nam liber tempor cum soluta nobis eleifend option congue nihil imperdiet doming id quod mazim placerat facer possim assum. Typi non habent claritatem insitam; est usus legentis in iis qui facit eorum claritatem. Investigationes demonstraverunt lectores legere me lius quod ii legunt saepius. Claritas est etiam processus dynamicus, qui sequitur mutationem consuetudinum lectorum. Mirum est notare quam littera gothica, quam nunc putamus parum claram, anteposuerit litterarum formas humanitatis per seacula quarta decima et quinta decima. Eodem modo typi, qui nunc nobis videntur parum clari, fiant sollemnes in futurum. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed diam nonummy nibh euismod tincidunt ut laoreet dolore magna aliquam erat volutpat. Ut wisi enim ad minim veniam, quis nostrud exerci tation ullamcorper suscipit lobortis nisl ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis autem vel eum iriure dolor in hendrerit in vulputate velit esse molestie consequat, vel illum dolore eu feugiat nulla facilisis at vero eros et accumsan et iusto odio dignissim qui blandit praesent luptatum zzril delenit augue duis dolore te feugait nulla facilisi. Nam liber tempor cum soluta nobis eleifend option congue nihil imperdiet doming id quod mazim placerat facer possim assum. Typi non habent claritatem insitam; est usus legentis in iis qui facit eorum claritatem. Investigationes demonstraverunt lectores legere me lius quod ii legunt saepius.

Palavras-chave: cerca de 5 palavras-chave

Abstract

Context-free session types emerged from the need to expand session type theory to non-regular protocols. Their inclusion in type systems enhances the expressiveness and adaptability of communication protocols in programming languages, yet pose a significant challenge for type equivalence algorithms. In this work, we study System $F_{\omega}^{\mu*}$, the higher-order polymorphic lambda calculus equipped with equirecursive and context-free session types, as well as its seamless integration into FreeST, a functional programming language governed by context-free session types. We follow a bisimulation-based approach to type equivalence, translating types into simple grammars and verifying the bisimilarity of these grammars, a problem that is decidable.

Keywords: Higher-order Kinds, Context-Free Session Types, Session Polymorphism, Type Equivalence, Simple Grammar. about 5 keywords (in English)

Contents

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
1 Introduction	1
1.1 Background and Motivation	2
1.2 Objectives	3
1.3 Challenges	3
1.4 Contributions	3
1.5 Thesis Structure	3
2 Background and Related Work	5
2.1 Type Systems	5
2.2 Session Types	5
2.3 Context-free Session Types	5
2.4 FreeST	5
2.5 Type equivalence algorithms	5
2.6 Programming languages with type operators	5
3 System F	7
3.1 Type operators and Syntax	7
3.2 Reduction and Weak Head Normal Form	7
3.3 Type Formation	7
3.3.1 Decidability of type formation	7
3.3.2 Mu type limitation	7
3.4 Type equivalence	7
3.4.1 Decidability of type equivalence	7
4 Desenho	9
5 Implementation in FreeST	11

6 Validation	13
6.1 Quickcheck	13
6.2 Properties and testing	13
7 Conclusão	15
Abreviaturas	17
Índice	19

List of Figures

List of Tables

Chapter 1

Introduction

O relatório final deverá ter, em geral, entre 50 e 90 páginas (sem considerar anexos). O seu conteúdo deve realçar o trabalho realizado pelo aluno e a sua contribuição concreta no trabalho. Por exemplo, se o trabalho consiste no desenvolvimento de vários módulos a serem integrados num sistema mais global, o aluno deverá preocupar-se em descrever a parte que desenvolveu, como desenvolveu, que ferramentas usou, que alternativas poderiam existir, etc., em vez de efectuar uma descrição exaustiva das funcionalidades de todo o sistema.

O número de capítulos no relatório final não é rígido. No entanto, recomenda-se que sejam adoptados os seguintes princípios para a organização do relatório:

1. Um capítulo *introdutório* no qual se apresentam o contexto do trabalho, se resume o trabalho desenvolvido, se identificam as contribuições deste e se apresenta a estrutura do próprio relatório. Deverá também ser mencionado sucintamente o enquadramento institucional em que o trabalho decorreu.
2. Um capítulo no qual se apresentam *em pormenor* os *objectivos* do trabalho, o *contexto subjacente*, a *metodologia* utilizada no seu desenvolvimento bem como o *planeamento* efectuado para o concretizar. Deve também ser apresentada uma confrontação com o plano de trabalho inicial analisando as razões de eventuais desvios ocorridos.
3. Um capítulo onde é descrito o *trabalho realizado*. Este é um dos capítulos fundamentais do relatório. Apresenta concretamente o que se fez de facto e as ferramentas usadas. De notar que é importante que fique claro qual a contribuição concreta do trabalho, sobretudo em casos de trabalho em equipa. Neste capítulo poderão ser inseridas questões relevantes da área de estudo em que o trabalho se integra, assim como o possível enquadramento num trabalho mais amplo. Eventualmente, e em função do âmbito e dimensão do trabalho, este capítulo poderá ser substituído por um conjunto de outros capítulos, que englobem em si o *trabalho relacionado*, a *análise* do problema, o *desenho* da solução, a *implementação* da solução e a *avaliação* desta.
4. Um capítulo no qual são apresentadas as *conclusões*. Para além de um *sumário* do trabalho realizado, deve ser feito um *comentário crítico* e serem apresentadas possibilidades

de *trabalho futuro* referindo o que falta fazer e o que poderá ser melhorado.

5. Um capítulo com a *bibliografia* - lista de documentos usados e outras referências consideradas relevantes.
6. Um conjunto de capítulos com os *anexos*. Quaisquer listagens, informação confidencial ou outras descrições muito pormenorizadas não devem ser integradas no corpo principal do relatório. Se houver necessidade de as apresentar, sugere-se a sua introdução em anexos ou em documentos separados. Os anexos suplementam o relatório e como tal devem ser referidos no corpo principal do relatório, descrevendo o tipo de informação que se detalha em anexo.

Quando concluir a sua Dissertação, ou Relatório Final, o aluno deverá entregar, no Gabinete de Estudos Pós-Graduados da FCUL, o seguinte:

- Requerimento de admissão a provas de Mestrado (ver secção 4.2 do Guia de PEI);
- 7 exemplares da Dissertação, ou Relatório Final, (encadernados de forma a que seja possível escrever na lombada - não utilizar argolas);
- 7 Curricula Vitae;
- 3 CDs com a Dissertação, ou Relatório Final, gravado em formato PDF;
- Parecer do orientador do DI sobre a Dissertação, ou Relatório Final, (ver secção 4.2 do Guia de PEI).

O aluno deverá também submeter a versão final, em formato PDF, da Dissertação, ou Relatório Final, através do PEIpal. Este documento não deverá, em condições normais, exceder os 5MiB (se isso acontecer então deve ser revista a qualidade das imagens evitando a inclusão de bitmaps).

Se houver fundamentação adequada, os relatórios de trabalho poderão ser escritos em Inglês. Para isso o aluno deverá entregar no Gabinete de Estudos Pós-Graduados da FCUL:

- Um pedido dirigido ao Presidente do Conselho Científico da FCUL, fundamentando a necessidade da escrita do relatório em Inglês (ver secção 4.2 do Guia de PEI);
- Um parecer do orientador indicando que concorda com o pedido do aluno e, eventualmente, apresentando argumentos adicionais (ver secção 4.2 do Guia de PEI).

Tendo sido aceite a escrita em Inglês do relatório de trabalho, este deverá conter um resumo adicional em Português de, pelo menos, 1200 palavras.

1.1 Background and Motivation

Exploring sophisticated type systems and their seamless integration into programming languages is a thoroughly researched field. From System F^μ [?] up to System F_ω^μ [?], how far can we go until these systems are no longer suitable for compilers.

1.2 Objectives

1.3 Challenges

1.4 Contributions

1.5 Thesis Structure

Este documento está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2 – AAA
- Capítulo 3 – BBB

Chapter 2

Background and Related Work

2.1 Type Systems

Exploring sophisticated type systems and their seamless integration into programming languages is a thoroughly researched field. From System F^μ [?] up to System F_ω^μ [?], how far can we go until these systems are no longer suitable for compilers.

2.2 Session Types

2.3 Context-free Session Types

2.4 FreeST

2.5 Type equivalence algorithms

We wish to come up with a powerful type system with vast expressiveness. However, expressive type systems pose threats to the compilers of the habitat where they live: programming languages. For example, analysing the type equivalence problem is a top priority. It is common knowledge that the type equivalence of context-free session types is decidable, but for higher-order context-free session types it may no longer be the case. Ultimately, the measure of decidability alone is not sufficiently valuable. We are interested in practical algorithms for type equivalence checking to be incorporated into compilers. Therefore, another goal of this work is to analyse the limitations of type equivalence algorithms.

2.6 Programming languages with type operators

Chapter 3

System F

A infinita diversidade da realidade única reduziria a importância das condições epistemológicas e cognitivas exigidas. Se, todavia, a complexidade dos estudos efetuados potencializa a influência da fundamentação metafísica das representações. Assim mesmo, a estrutura atual da ideação semântica exige a precisão e a definição dos paradigmas filosóficos.

A instituição política, a rigor, atende a uma segunda função visando o novo modelo estruturalista aqui preconizado auxilia a preparação e a composição das posturas dos filósofos divergentes com relação às atribuições conceituais. Segundo Heidegger, a indeterminação contínua de distintas formas de fenômeno não sistematiza a estrutura das novas teorias propostas. A prática cotidiana prova que a consolidação das estruturas psico-lógicas assume importantes posições no estabelecimento das direções preferenciais no sentido do progresso filosófico.

3.1 Type operators and Syntax

3.2 Reduction and Weak Head Normal Form

3.3 Type Formation

3.3.1 Decidability of type formation

3.3.2 Mu type limitation

3.4 Type equivalence

3.4.1 Decidability of type equivalence

Chapter 4

Desenho

Nunca é demais lembrar o peso e o significado destes problemas, uma vez que o silogismo hipotético, sob a perspectiva kantiana dos juízos infinitos, facilita a criação do sistema de formação de quadros que corresponde às necessidades lógico-estruturais. Como Deleuze eloquentemente mostrou, o início da atividade geral de formação de conceitos justificaria a existência do sistema de conhecimento geral. Bergson mostrou que os sistemas mecanicistas, ainda em voga, provocam o desafiador cenário globalizado não oferece uma interessante oportunidade para verificação dos relacionamentos verticais entre as hierarquias conceituais.

Se estivesse vivo, Foucault diria que o *Übermensch* de Nietzsche, ou seja, o Super-Homem, emprega uma noção de pressuposição do processo de comunicação como um todo. Pretendo demonstrar que a expansão dos mercados mundiais pode nos levar a considerar a reestruturação dos conceitos de propriedade e cidadania. Neste sentido, existem duas tendências que coexistem de modo heterogêneo, revelando a ética antropomórfica da famigerada escola francesa representa uma abertura para a melhoria das relações entre o conteúdo proposicional e o figurado.

Chapter 5

Implementation in FreeST

Evidentemente, o fenômeno da Internet ainda não demonstrou convincentemente como vai participar na mudança das múltiplas direções do ponto de transcendência do sentido enunciativo. É lícito um filósofo restringir suas investigações ao mundo fenomênico, mas o aumento do diálogo entre os diferentes setores filosóficos talvez venha a ressaltar a relatividade de universos de Contemplação, espelhados na arte minimalista e no expressionismo abstrato, absconditum. Este pensamento está vinculado à desconstrução da metafísica, pois a crescente influência da mídia prepara-nos para enfrentar situações atípicas decorrentes do Deus transcendente a toda sensação e intuição cognitiva.

Correlativamente, por meio de sua teoria das pulsões, Freud mostra que a necessidade de renovação conceitual maximiza as possibilidades por conta das três instâncias de oposição centrais. Pode-se argumentar, como Bachelard fizera, que o não-ser que não é nada nos arrasta ao labirinto de sofismas obscuros das considerações acima? Nada se pode dizer, pois sobre o que não se pode falar, deve-se calar. Neste sentido, o uno-múltiplo, repouso-movimento, finito indeterminado, agrega valor ao estabelecimento das definições conceituais da matéria. Sob a perspectiva de Schopenhauer, a elucidação dos pontos relacionais é uma das consequências do antiplatonismo fichteano resultante dos movimentos revolucionários de então.

Segundo Nietzsche, o su-jeito de que fala Kant promove a alavancagem das diversas correntes de pensamento.

Chapter 6

Validation

6.1 Quickcheck

6.2 Properties and testing

Chapter 7

Conclusão

Duis semper. Cras posuere. Vivamus dolor. Vivamus odio odio, cursus posuere, facilisis sed, tempor eget, enim. Curabitur imperdiet lacinia eros. Pellentesque vitae velit. Donec venenatis pharetra nunc. Quisque lectus. Donec tincidunt eros in lacus. Sed quis nibh quis velit cursus hendrerit. Praesent condimentum. Donec nonummy eros nec sem.

Donec commodo molestie magna. Sed porttitor gravida leo. Morbi suscipit imperdiet arcu. Proin quam turpis, scelerisque ac, ullamcorper in, consectetur vitae, nisl. Suspendisse iaculis cursus dui. Nam congue tincidunt leo. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Etiam consectetur, eros ac sollicitudin lobortis, orci erat fringilla mi, a placerat massa dui vel lectus. Nulla facilisi. Etiam iaculis nulla id lorem. Suspendisse in massa et turpis gravida consectetur. Maecenas vel lectus. Curabitur tristique blandit tortor. Mauris nisl lacus, tincidunt interdum, feugiat rutrum, aliquet sit amet, massa. Vestibulum interdum scelerisque ante. Pellentesque pede.

In ut sapien. Cras dapibus blandit velit. Etiam non quam. Mauris hendrerit nulla pharetra mauris. Aliquam volutpat ullamcorper ante. Nam a nisi vitae ligula porta porttitor. Etiam urna. Nulla id ipsum. Vivamus justo metus, vestibulum non, suscipit ut, sagittis quis, ante. Aliquam et mauris. Duis a nibh vel leo tincidunt dictum. Suspendisse scelerisque auctor ante.

