Warszawa, 6 czerwca 2022

Paweł Urzyczyn
Instytut Informatyki
Uniwersytetu Warszawskiego

Recenzja rozprawy doktorskiej Michała Szynwelskiego
„A functional programming language for sets with atoms"

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgra Michała Szynwelskiego jest propozycja nowego podejścia do programowania funkcyjnego umożliwiającego obliczenia z użyciem nieskończonych obiektów o skończonej reprezentacji. Droga do tego celu prowadzi poprzez wykorzystanie koncepcji zbiorów z atomami (zbiorów „nominalnych"), która zapoczątkowana została w teoretycznej informatyce przez M. Gabbaya and A. Pittsa, ale sięga swoimi korzeniami do atomowej teorii mnogości Kripke-Platek. W ostatnich latach znaczący postęp w tej dziedzinie został osiągnięty przez grupę warszawską (Bojańczyk, Lasota, Klin,...) z której wywodzi się doktorant.

Z grubsza chodzi o to, że nieskończone obiekty (zbiory, funkcje,...), zdeterminowane przez skończone „wsparcie" (ang. *support*), mogą być przedmiotem finitarnych definicji i manipulacji, wyrażalnych w odpowiednim języku programowania czy też, w bardziej teoretycznym ujęciu, specyficznym rachunku lambda. Taki właśnie rachunek lambda jest prezentowany w pierwszej części rozprawy, a jego metalogiczne własności są szczegółowo dyskutowane. Druga część poświęcona jest implementacji proponowanego języka $N\lambda$ w Haskellu.

Rozprawa składa się z jedenastu rozdziałów. Rozdziały pierwszy i drugi stanowią wstęp i wprowadzenie do teorii zbiorów z atomami. Rozdział trzeci definiuje podstawowy rachunek lambda $N\lambda$: typy, składnię, semantykę denotacyjną (w dziedzinie zbiorów z atomami). Następnie wprowadzony zostaje system przypisania typów w stylu Curry'ego i reguły redukcji. Osobliwością tych reguł jest to, że przepisywanie odbywa się w kontekście prewarunku wyrażonego formułą pierwszego rzędu. Niestety definicja semantyki denotacyjnej pozbawiona jest dowodu poprawności: stwierdzenie $[\![M]\!]^\rho \in [\![\alpha]\!]$

jest w większości przypadków oczywiste, jednak przypadek abstrakcji (D2) wydaje się wymagać silniejszego założenia indukcyjnego.

Własności rachunku Nλ są dyskutowane w kolejnych rozdziałach. Rozdział 4 zawiera dowód poprawności redukcji ze względu na przypisanie typów (ang. *subject reduction*). Jest to dosyć rutynowy argument indukcyjny, jednak bardziej uciążliwy niż zwykle, ze względu na liczbę i stopień złożoności reguł przepisywania. Byłby ten dowód nieco bardziej przejrzysty, gdyby wcześniej sformułowano odpowiedni lemat o generowaniu czy też inwersji: teraz nie jest jasne dlaczego zakłada się, że derywacje muszą być właśnie takiej a nie innej postaci. (Poza tym reguły przypisania typów mogłyby mieć swoje nazwy.)

Rozdział 5 zatytułowany jest „Equivalence of semantics". Może nieco na wyrost, bo jego głównym wynikiem jest twierdzenie 5.2 stwierdzające tylko poprawność semantyki denotacyjnej względem operacyjnej (redukcje zachowują znaczenie wyrażeń). Nie ma natomiast mowy o jakieś formie adekwatności (nie jest zresztą jasne jak taka własność powinna w tym przypadku wyglądać).

Własność Churcha-Rossera jest przedmiotem rozważań rozdziału 6. Tu też mamy zastosowanie znanej metody redukcji równoległych, ale w niezbyt rutynowej sytuacji, bo redukcje odbywają się zawsze w kontekście pewnej formuły. Dlatego zapewne autor nie mógł się odwołać do ogólnej teorii systemów przepisywania wyższego rzędu.

Rozdział 7 to wreszcie najtrudniejsza z metawłasności rachunku Nλ: silna normalizacja, dowodzona metodą Taita (zwaną też metodą redukowalności). Pytanie czy język Nλ jest w jakimś sensie istotnym rozszerzeniem zwykłego rachunku typów prostych ze względu na siłę wyrazu pozostaje jednak bez odpowiedzi – ciekawsze przykłady też pojawią się dopiero w rozdziale końcowym.

W rozdziale 8 rozważane są różne rozszerzenia rachunku Nλ: o dodatkowe stałe, typy danych, wiązania `let`, wreszcie o rekursję i polimorfizm. Część z takich rozszerzeń jest względnie „bezpieczna", część jednak powoduje, że dowodzone w rozdziałach 3–7 własności przestają być oczywiste lub wręcz nie zachodzą. Brak mi tu dyskusji zwłaszcza tego, jak rozważane rozszerzenia mogą wpływać na własność Churcha-Rossera. Rozdział 9 umieszcza rozprawę w kontekście podobnych projektów innych autorów, wspominając np. o imperatywnym podejściu do programowania z atomami.

Opracowana implementacja rachunku Nλ w języku Haskell omawiana jest w rozdziale 10. Narzędzia i konstrukcje już dostępne w Haskellu pozwalają na uwzględnienie także tych rozszerzeń, o których mowa w rozdziale 8. Wreszcie rozdział 11 pokazuje na kilku przykładach (algorytmy grafowe, automaty) jak można programować w opracowanym języku.

Praca jest ogólnie napisana w sposób przejrzysty i zrozumiały. Autor dobrze posługuje się językiem angielskim, większość technicznego materiału przedstawia w sposób ścisły i poprawny. Jednak nie ustrzegł się pewnych niezręczności. Na przykład definicja 2.2 właściwie niczego nie definiuje. Składnia użyta na stronach 29 i 32 jest inna niż na stronach 18 i 33. Trzeba się domyślać sensu reguł z kropkami, np. kształt (P12) błędnie sugeruje, że redukcja dotyczy tylko jednej lub dwóch współrzędnych. Także definicja 7.1 jest dość niejasna: czy ψ jest ustalone? Kwantyfikowane uniwersalnie?

Rozprawa została zaopatrzona w liczne cytowania, na ogół trafnie dobrane, choć czasem konfundujące. Na przykład **Y** (chyba) faktycznie pojawia się jawnie dopiero w książce Curry'ego i Feysa, ale kombinatory punktu stałego znał już Turing 20 lat wcześniej. A o typach egzystencjalnych Mitchell i Plotkin pisali już w 1988 roku.

Powyższe uwagi krytyczne odnoszą się jednak do strony prezentacyjnej pracy a nie do jej istotnej zawartości merytorycznej. W istocie, rozprawa zawiera ciekawy nowatorski pomysł rozszerzenia funkcyjnych języków programowania o infinitarne typy danych. Pomysł ten jest szczegółowo opracowany na poziomie teoretycznym i praktycznym. Zdefiniowano nietrywialny system formalny i dogłębnie zbadano jego własności. Na bazie tego systemu opracowano praktyczną implementację w Haskellu. Podsumowując, rozprawa doktorska mgra Michała Szynwelskiego niewątpliwie zawiera samodzielne rozwiązanie nietrywialnego problemu naukowego. Praca dowodzi szerokiej wiedzy teoretycznej i profesjonalizmu autora, rzetelnie spełniając wszelkie wymagania stawiane przed rozprawami doktorskimi. Dlatego wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr. Michała Szynwelskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Paweł Urzyczyn