

ПЕРША ФОРМАЛЬНА СИСТЕМА

Середовище виконання,
формальна система мов
та базові бібліотеки
для програмування,
доведення теорем
і формальної філософії

Максим Сохацький
Кам'янець-Подільський—Київ, 26 травня 2021

Зміст

| | | |
|----------|--|-----------|
| 0.1 | Актуальність роботи | 2 |
| 0.2 | Формалізована постановка задачі | 3 |
| 0.2.1 | Мотивація та мета дослідження | 3 |
| 0.2.2 | Цілі та завдання дослідження | 3 |
| 0.2.3 | Об'єкт та предмет дослідження | 4 |
| 0.2.4 | Методи дослідження | 4 |
| 0.2.5 | Класифікація мов програмування | 4 |
| 0.3 | Наукова новизна | 5 |
| 0.3.1 | Формальне середовище виконання | 7 |
| 0.3.2 | Гомотопічна модальна система верифікації | 7 |
| 0.4 | Практичні результати | 7 |
| 0.4.1 | Основні результати | 7 |
| 0.4.2 | Продукт дослідження | 8 |
| 0.4.3 | Апробація роботи | 8 |
| 0.4.4 | Аналіз результатів | 8 |
| 0.5 | Структура роботи та публікації | 9 |
| 0.6 | Подяка | 10 |
| 1 | Формальна верифікація | 11 |
| 1.1 | Формальна верифікація та валідація | 11 |
| 1.2 | Формальна специфікація | 12 |
| 1.2.1 | Програмне забезпечення | 12 |
| 1.2.2 | Математичні компоненти | 13 |
| 1.3 | Формальні методи верифікації | 13 |
| 1.3.1 | Спеціалізовані системи моделювання | 13 |
| 1.3.2 | Мови з залежними типами та індукцією | 13 |
| 1.3.3 | Гомотопічні мови | 14 |
| 1.3.4 | Системи автоматичного доведення теорем | 14 |
| 1.4 | Формальні мови та середовища виконання | 15 |
| 1.4.1 | Формальні інтерпретатори та ОС | 16 |
| 1.4.2 | Формальний ввід-вивід | 16 |
| 1.4.3 | Чисті системи типів | 16 |
| 1.4.4 | Гомотопічні системи типів | 16 |
| 1.4.5 | Мультимодальні мови | 16 |
| 1.5 | Висновки | 17 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2 | Концептуальна модель формальної системи мов | 19 |
| 2.1 | Попередні відомості та теорії | 19 |
| 2.2 | Структурне представлення моделі | 22 |
| 2.2.1 | Мінімальна система | 22 |
| 2.2.2 | Максимальна система | 23 |
| 2.3 | Формальні мови програмування | 23 |
| 2.3.1 | Чиста система типів O_{PTS} | 24 |
| 2.3.2 | Теорія типів Мартіна-Льофа O_{MLTT} | 24 |
| 2.3.3 | Система індуктивних типів O_{ITS} | 25 |
| 2.3.4 | Гомотопічна система типів O_{HTS} | 26 |
| 3 | Система мов середовища виконання | 27 |
| 3.1 | Інтерпретатор як основна лямбда-система | 27 |
| 3.1.1 | Векторизація засобами мови Rust | 28 |
| 3.1.2 | Байт-код інтерпретатора | 29 |
| 3.1.3 | Синтаксис | 29 |
| 3.1.4 | Формальне середовище виконання | 30 |
| 3.1.5 | Категорія середовища виконання O_{CPS} | 31 |
| 3.2 | Система числення процесів SMP async | 31 |
| 3.2.1 | Операційна система | 31 |
| 3.2.2 | Властивості | 32 |
| 3.2.3 | Структури ядра | 35 |
| 3.2.4 | Протокол InterCore | 37 |
| 3.3 | Система числення тензорів AVX | 37 |
| 3.4 | Висновки | 37 |
| 4 | Бібліотека середовища виконання | 39 |
| 4.1 | Загальні принципи | 39 |
| 4.2 | Формальна специфікація | 40 |
| 4.2.1 | Серверні та клієнтські мови | 40 |
| 4.2.2 | Обрані мови реалізації | 41 |
| 4.3 | Пакети формального середовища | 42 |
| 4.3.1 | Структури даних BASE | 43 |
| 4.3.2 | Сервіси середовища виконання RT | 43 |
| 4.3.3 | Прикладні протоколи N2O | 45 |
| 4.3.4 | Сховище даних KVS | 46 |
| 4.3.5 | Бізнес-процеси BPE | 46 |
| 4.3.6 | Контрольні елементи протоколу NITRO | 47 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | Система вищих мов | 49 |
| 5.1 | Чиста система типів PTS^∞ | 49 |
| 5.1.1 | Генерація сертифікованих програм | 50 |
| 5.1.2 | Синтаксис | 52 |
| 5.1.3 | Операційна семантика | 54 |
| 5.1.4 | Використання мови | 56 |
| 5.2 | Система індуктивних типів ITS | 58 |
| 5.2.1 | Синтаксис | 58 |
| 5.2.2 | Поліноміальні функтори | 59 |
| 5.2.3 | Кодування Бома | 59 |
| 5.3 | Гомотопічна система типів HTS | 60 |
| 5.3.1 | Синтаксис | 60 |
| 5.4 | Висновки | 61 |
| 6 | Бібліотека вищих мов | 63 |
| 6.1 | Інтерналізація теорії типів | 63 |
| 6.1.1 | Типи Π , Σ , Path | 67 |
| 6.1.2 | Всесвіти | 74 |
| 6.1.3 | Контексти | 76 |
| 6.1.4 | Інтерналізація | 76 |
| 6.2 | Індуктивні типи | 77 |
| 6.2.1 | Empty, Unit | 77 |
| 6.2.2 | Bool, Maybe, Either, Tuple | 77 |
| 6.2.3 | Nat, List, Stream | 78 |
| 6.2.4 | Fin, Vector, Seq | 79 |
| 6.2.5 | Імпредикативне кодування | 80 |
| 6.3 | Гомотопічна теорія типів | 81 |
| 6.3.1 | Гомотопії | 81 |
| 6.3.2 | Групоїдна інтерпретація | 82 |
| 6.3.3 | Функціональна екстенсіональність | 83 |
| 6.3.4 | Пулбеки | 84 |
| 6.3.5 | Пушаути та фібрації | 85 |
| 6.3.6 | Еквівалентність, Ізоморфізм, Унівалентність | 85 |
| 6.4 | Вищі індуктивні типи | 87 |
| 6.4.1 | Інтервал | 88 |
| 6.4.2 | n-Сфера | 88 |
| 6.4.3 | Суспензія та цикли | 88 |
| 6.4.4 | Транкейшин та факторизація | 88 |
| 6.5 | Модальності | 89 |
| 6.5.1 | Процеси | 89 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7 | Математичні компоненти | 93 |
| 7.1 | Теорія категорій | 93 |
| 7.1.1 | Категорія | 93 |
| 7.1.2 | (Ко)термінал | 94 |
| 7.1.3 | Функтор | 94 |
| 7.1.4 | Натуральні перетворення | 95 |
| 7.1.5 | Розширення Кана | 95 |
| 7.1.6 | Ізоморфізм категорій | 95 |
| 7.1.7 | Резк-поповнення | 96 |
| 7.1.8 | Конструкції | 96 |
| 7.1.9 | Приклади | 97 |
| 7.1.10 | k-морфізми | 98 |
| 7.1.11 | 2-категорія | 98 |
| 7.1.12 | Аддитивна категорія | 99 |
| 7.1.13 | Група Гротендіка | 99 |
| 7.1.14 | Категорія Гротендіка | 99 |
| 7.2 | Теорія топосів | 99 |
| 7.2.1 | Теорія множин | 100 |
| 7.2.2 | Топологічна структура | 101 |
| 7.2.3 | Топос Гротендіка | 102 |
| 7.2.4 | Елементарний топос | 105 |
| 7.2.5 | Висновки | 107 |
| 7.3 | Алгебраїчна топологія | 107 |
| 7.3.1 | Теорія груп | 107 |
| 7.3.2 | Простори | 107 |
| 7.3.3 | Теорія гомотопій | 108 |
| 7.3.4 | Теорія гомологій | 113 |
| 7.4 | Диференціальна геометрія | 113 |
| 7.4.1 | V-многовиди | 113 |
| 7.4.2 | G-структури | 113 |
| 7.4.3 | H-простори | 113 |
| 8 | Додаткові матеріали | 115 |
| 8.1 | Формалізація мадх'яміки | 115 |
| 8.2 | Формалізація вводу-виводу для Coq/OCaml | 118 |
| 8.3 | Формалізація вводу-виводу для PTS/BEAM | 119 |

| | |
|-----------------------------------|------------|
| Список використаних джерел | 123 |
|-----------------------------------|------------|

ВСТУП

Присвячується піонерам
формальної школи філософії

Фреге, Расселу, Вайтхеду,
Геделю, Гільберту, Каррі, Черчу

У вступі розкажується про новий формальний підхід до математичної верифікації та спробу автора у цій парадигмі побудувати замкнену уніфіковану систему формальних мов для програмування, математики та філософії. В процесі розробки моделі такої системи автору довелося апробувати частини її імплементації для головних SML-подібних формальних академічних мов, мови Erlang та інших (загалом 7 мов). За 10 років автором було проаналізовані синтаксис та семантика основних мов програмування (більше 50 мов) з різних промислових та академічних доменів, 8 мов з яких були особисто реалізовані автором. В роботі описані 8 мов уніфікованої мовної системи (концептуальна модель) та представлені 2 їх імплементації.

Головним чином, натхнення було почерпнуте з LISP-машин минулого, APL-систем, перших систем доведення теорем таких як AUTOMATH, віртуальних машин паралельної та узгодженої обробки нескінченних процесів, таких як BEAM, та кубічних MLTT-пруверів.

Вступне слово

Якщо говорити про математичну логіку, формальну математику, формальні методи, то основоположниками цих теорій можна вважати Бертрана Рассела та Альфреда Норта Вайтхеда та їх роботу *Principia Mathematica*¹, де будується формально теорія множин та доводиться твердження $1+1=2$. Пізніше методи та предмет лябда-числення був розроблених Хаскелем Каррі та

¹<https://principia.lol> — імплементація метатеорії Principia Mathematica для Menhir та OCaml

Алонсо Черчем, а теорема Геделя про неповноту до цих знаходить своє відображення в інфініті-топосах та у злічених всесвітах сучасних пруверів.

Зараз формальні методи верифікації та відповідно теорії на яких вони побудовані є актуальними засобами забезпечення математичної якості та гарантій для розробки не тільки програмного забезпечення, але і математики та навіть формальної філософії.

0.1 Актуальність роботи

Ціна помилок в індустрії надзвичайно велика. Основні відомі приклади в індустрії: 1) Mars Climate Orbiter (1998), помилка² невідповідності типів британської метричної системи, коштувала 80 мільйонів фунтів стерлінгів. Невдача стала причиною переходу NASA³ повністю на метричну систему в 2007 році. 2) Ariane Rocket (1996), причина⁴ катастрофи – округлення 64-бітного дійсного числа до 16-бітного. Втрачені кошти на побудову ракети та запуск 500 мільйонів доларів. 3) Помилка в FPU в перших Pentium (1994), збитки на 300 мільйонів доларів. 4) Помилка⁵ в SSL (heartbleed), оцінені збитки у розмірі 400 мільйонів доларів. 5) Помилка у логіці бізнес-контрактів EVM (неконтрольована рекурсія), збитки 50 мільйонів, що привело до появи верифікаторів та валідаторів контрактів^{6, 7}. Більше того, і найголовніше, помилки у програмному забезпеченні можуть коштувати життя людей.

Таким чином зросла популярність формальних мов з типизацією, які дають певні гарантії на стадії компіляції, витрачаючи при цьому небагато часу на специфікації. Піонер в цьому класі мов – Standard ML та ML-подібні мови.

Пізніше, більш загально, Системи Жирара F та F_{ω} стали промисловим стандартом де-факто. Усі сучасні мови для популярних віртуальних машин та середовищ виконання намагаються бути близькими до цих типових систем. Для JVM існує мова Scala, але перша формальна мова для JVM був порт Standard ML – MLj.

²Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board Phase I Report November 10, 1999.

https://llis.nasa.gov/llis_lib/pdf/1009464main1_0641-mr.pdf

³National Aeronautics and Space Administration, національна адміністрація аеронавтики та космосу США

⁴ARIANE 5 Flight 501 Failure,

<http://www-users.math.umn.edu/~arnold/disasters/ariane5rep.html>

⁵The Matter of Heartbleed.

<http://mdbailey.ece.illinois.edu/publications/imc14-heartbleed.pdf>

⁶Vandal: A Scalable Security Analysis Framework for Smart Contracts, <https://arxiv.org/pdf/1809.03981.pdf>

⁷Short Paper: Formal Verification of Smart Contracts, <https://www.cs.umd.edu/~aseem/solidetherplas.pdf>

Для CLR існує мова F#. Мова Haskell поставляється разом з середовищем виконання GHC. Усі ці мови так чи інакше пов'язані з системами Жирара.

0.2 Формалізована постановка задачі

Після 5 років цього дослідження, виконавши у вигляді вправ декілька імплементацій мов, було прийнято рішення формально оформити всю роботу згідно академічних нормативів. Тому в цій секції дається формальна постановка задачі, яка складається з опису об'єкту та предмету дослідження, мети, цілей та завдань. Дається головна мотивація та аналіз результатів.

0.2.1 Мотивація та мета дослідження

Головна мотивація цієї роботи — пошук єдиної мови або мовної системи, що здатна стати єдиною мовою, яка пропонує аналогічний спрощений формальний спосіб програмування та доведення теорем.

Одна з причин низького рівня впровадження у виробництво систем верифікації — це висока складність таких систем. Складні системи верифікуються складно. Ми хочемо запропонувати спрощений підхід до верифікації — оснований на концепції компактних та простих мовних ядер для створення специфікацій, моделей, перевірки моделей, доведення теорем у теорії типів з кванторами.

Метою цього дослідження є побудова єдиної системи, яка поєднує формальне середовище виконання та систему верифікації програмного забезпечення з великим спектром мовних засобів, які допомагають вбудувати в себе максимальну кількість існуючих мов. Це прикладне дослідження, яке є сплавом фундаментальної математики та інженерних систем з формальними методами верифікації.

0.2.2 Цілі та завдання дослідження

Головними цілями цього дослідження є побудова мінімальної системи мовних засобів для побудови ефективного циклу верифікації програмного забезпечення та доведення теорем. Основні компоненти системи, як продукт дослідження: 1) інтерпретатор безтипного лямбда числення; 2) компактне ядро — система з однією аксіомою; 3) мова з індуктивними типами; 4) мова з гомотопічним інтервалом $[0, 1]$; 5) уніфікована базова бібліотека; 6) бібліотека математичних компонент.

Завданням цього дослідження є імплементація (апробація) специфікації системи мов на різних мовах програмування та ти-

пових системах. Для цього детально проводився аналіз усіх існуючих мов програмування (близько 2000), які детально прокатегоризовані в Енциклопедії Мов Програмування.

0.2.3 Об'єкт та предмет дослідження

Об'єктом дослідження в широкому сенсі є множина всіх формальних мов, та можливих зв'язків між ними.

Формально, об'єктом дослідження данної роботи є: 1) системи верифікації програмного забезпечення; 2) системи доведення теорем; 3) мови програмування; 4) операційні системи, які виконують обчислення в реальному часі; 3) їх поєднання, побудова формальної системи для уніфікованого середовища, яке поєднує середовище виконання та систему верифікації у єдину систему мов та засобів.

Предметом та методом дослідження такої системи мов є теорія типів, як сучасний фундамент математики, який стисло та компактно представляє не тільки теорію множин, але і теорію категорій, алгебраїчну топологію та диференціальну геометрію. Теорія типів вивчає обчислювальні властивості мов та виділилася в окрему науку Пером Мартіном-Льофом як запит на вакантне місце у трикутнику теорій, які відповідають ізоморфізму Каррі-Говарда-Ламбека (Логіки, Мови, Категорії).

0.2.4 Методи дослідження

Існує багато підходів для формальної специфікації, верифікації та валідації, усі вони даються у розділі 1 та ґрунтуються вибір методу моделювання з використанням мови з залежними типами (теорії типів Мартіна-Льофа). Для розкриття семантики цього методу використовується категорний метод та категоріальна логіка – теорія топосів. Теорія категорій довела свою корисність не тільки для математики⁸, але і для програмного забезпечення⁹

0.2.5 Класифікація мов програмування

Повна класифікація об'єктів дослідження була зловлена в рамках проекту Енциклопедія Мов Програмування, де була зроблена спроба надати формальну БНФ-нотацію для тих мов, для яких це не було ще ніколи не зроблено (наприклад для APL-подібної мови K).

⁸Близько 10 робіт медалістів премії Філдса ґрунтуються на категорних методах

⁹Категорні бібліотеки таких мов як Haskell, Scala тощо.

Таблиця 0.1: Класифікація мов програмування

| Домен | Мови програмування |
|----------------|---|
| HW | VHDL, Verilog, Clash, Chisel, SystemC, Lava, BSV |
| ASM | PDP-11, VAX, S/360, M68K, PowerPC, MIPS, SPARC, Super-H Intel, ARM, RISC-V |
| ALG | C, BCPL, ALGOL, SNOBOL, Simula, Pascal, Oberon, COBOL, PL/1 |
| ML | SML, Alice ML, OCaml, UrWeb, Flow, F |
| PURE | HOPE, Miranda, Clean, Charity, Joy, Mercury, Elm, PureScript |
| F _ω | Scala, Haskell, 1ML, Plutus |
| MACR | LISP, Scheme, Clojure, Racket, Dylan, LFE, CL Nemerle, Nim, Haxe, Perl, Elixir |
| OOI | Simula, Smalltalk, Self, REBOL, Io JS, Lua, Ruby, Python, PHP, TS, Java, Kotlin |
| CMP | C++, Rust, D, Swift, Fortran |
| SHELL | PowerShell, TCL, SH, CLIPS, BASIC, FORTH |
| SVC | IDL, SOAP, ASN.1, GRPC |
| MARK | TeX, PS, XML, SVG, CSS, ROFF, OWL, SGML, RDF, SysML |
| LOGIC | AUT-68, ACL2, LEGO, ALF, Prolog CPL, Mizar, Dedukti, HOL, Isabelle, Z |
| ΠΣ | Coq, F*, Lean, NuPRL, ATS, Epigram, Cayenne, Idris, Dhall, Cedile, Kind |
| HoTT | Menkar, Cubical, yacctl, redtt, RedPRL, Arend, Agda |
| CHKR | TLA+, Twelf, Promela, CSPM |
| PAR | Ling, Pony, Erlang, BPMN, Ada, E, Go, Occam, Oz |
| ARR | Julia, Wolfram, MATHLAB, Octave, Futhark, APL SQL, cg, Clarion, Clipper, QCL, K, MUMPS, Q, R, S, J, O |

Сірим кольором показані фокусні домени дослідження.

0.3 Наукова новизна

Автор спробував поглянути на проблему розширення, або мовного доповнення топосів та категорій де відбуваються обчислення, з точки зору теорії типів, та їх мовних синтаксисів та категорій. За допомогою спектрального розкладення на елементарні мови, які репрезентують певні типи та описуються сигнатурами ізоморфізмів, будується єдиний погляд на еволюцію мови та її покомпонентний аналіз. Також автор зазирнув у спектр мов, які доречно використовувати та тримати як мови нижнього рівня (системне програмування) для програмування середовища виконання.

Таблиця 0.2 : Ландшафт атаки

| Термінальна мова/Ефекти | Чиста мова | Система F | Runtime | Віртуалізація |
|-------------------------|------------|-----------|---------|---------------|
| Agda/MAlonzo | Morte | Haskell | GHC | HaLVM |
| Coq/coq.io | N/A [CoC] | OCaml | native | Mirage |
| HTS/IOI | PTS | Hamler | BEAM | LING |
| HTS/IOI | PTS | ITS-F | CPS | L4 |

Сірим кольором показані напрямки атаки.

Кожен інститут чи компанія інвестує в одну певну мову, для зосередження зусиль на одному проекті. Особливість цієї роботи полягає в побудові уніфікованої системи, яка системно підходить до вирішення проблеми розширення мовних ядер, та їх евалуаторів. Ця робота пропонує замкнений фреймворк, який складається з мінімальної системи мов, що покриваються максимальну кількість мовних синтаксисів та семантик.

Крім того, попередні дослідники зосереджувались на побудові системних бібліотек для певного середовища виконання та асоційованих з ним вищих мов (з відповідними біндингами). На відміну від фокусних досліджень, ця робота пропонує мультидисциплінарний або мовний підхід, де ми зосереджуємося на побудові моделі, яка буде вбудовуватися з мінімальними зусиллями в основні аглекбраїчні мови. У таблиці яка показує можливий ландшафт атаки мовних систем які можна вважати аналогічними підходами до побудови не тільки замкненого життєвого циклу мовного забезпечення, але і системи віртуалізації.

Інновація роботи полягає в побудові унікальної замкненої системи яка складається з: 1) системного програмного забезпечення – модального середовища виконання разом з інтерпретатором написаним на формальній мові, разом з базовою бібліотекою та архітектурою прикладного програмування N2O.TECH; 2) прикладного програмного забезпечення – системи вищих формальних мов, для яких надано моделі, імплементації та базова бібліотека разом з математичними компонентами.

У цій роботі представлені дві конфігурації мовних систем, та три вектора атаки для їх дослідження. Перша атака — це побудова замкненої системи мов для компіляції в середовище виконання віртуальної машини BEAM що входить до складу Erlang/OTP. Друга атака — це побудова власної віртуальної машини CPS, яка пропонує більш формальну та сучасну модель обчислень. Третя атака — це розробка бібліотеки вищих мов що могла би компілюватися в BEAM та/або CPS.

0.3.1 Формальне середовище виконання

В рамках розробленого фреймворку будується архітектура системи доведення теорем та обчислювального середовища (яке складається з верифікованого засобами Rust інтерпретатора та операційної системи, подібно до Erlang, але без надлишкових копіювань), яке побудовано за сучасними стандартами: 1) відсутність системи управління пам'яті у реальному часі (тільки на стадії компіляції); 2) автоматична векторизація за допомогою AVX інструкцій (тензорне ядро); 3) дані ніколи не копіюються; 4) в системі немає очікування та даремного витрачання ресурсів; 5) лінійний лямбда-інтерпретатор, програми якого поміщаються в L1 кеш процесора.

Також додається модель базової бібліотеки середовища виконання для мов Erlang та Hamler, яка пройшла апробацію на підприємствах.

0.3.2 Гомотопічна модальна система верифікації

Чиста мова з однією аксомою дається як перша мова системи вищих мов. Далі надається базова бібліотека для вищих мов, яка сумісна з кубічним верифікатором, в якому аксіома унівалентності Воеводського має конструктивну інтерпретацію, це `subcaltt` авторства Андерса Мортберга (2017). Також надається спектр вищих формальних мов.

Гомотопічні системи типів та системи типів в зв'язаних топосах є сучасним поглядом на конструктивну математику на шляху до формалізації таких моделей як інфінітезимальні околи, нескінченно малі (які потрібні для моделювання послідовності Коші), тощо.

0.4 Практичні результати

В результаті цього дослідження встановлено, що формалізація системи програмування та доведення теорем можлива в рамках однієї уніфікованої системи, та показано на прикладі спектр мовних засобів [починаючи з інтерпретатора та безтипового лямбда числення, операційної системи середовища виконання (розділ 3), а також гомотопічної базової бібліотеки (розділ 6), здатної охопити майже всю глибину математики (розділ 7)] необхідних для побудови замкненої формальної системи доведення теорем та виконання програм.

0.4.1 Основні результати

Автор особисто створив моделі та імплементації формального середовища виконання, бібліотеки середовища виконання,

декількох верифікаторів та базової бібліотеки як приклади використання та моделювання системи доведення теорем. Автор також розробив курс гомотопічної теорії типів, на якому здійснюється формалізація певних розділів математики (теорія категорій, різні частини алгебраїчної топології та диференціальної геометрії).

0.4.2 Продукт дослідження

Окрім того створений сайт, присвячений документації по базовій бібліотеці системи вищих мов для кубічного верифікатора гомотопічної мови програмування. Також частина моделей розроблений автором попала в апстрім кубічного верифікатора, як приклади використання.

0.4.3 Апробація роботи

Апробації: 1) Відбулися виступи на двох міжнародних конференціях: MMCTSE, IAI; 2) Впровадження базової бібліотеки середовища виконання в державних компаніях: ПриватБанк, ІНФОТЕХ; 3) Впровадження прототипу середовища виконання описаного в роботі, який ліг в основу комерційного продукту.

0.4.4 Аналіз результатів

0.5 Структура роботи та публікації

Якщо коротко суть роботи зводиться до побудови системи, яка складається з: i) середовища виконання; ii) формального інтерпретатора; iii) системи формальних мов для доведення теорем математики, програмної інженерії та філософії.

Формальна верифікація

У розділі 1 дається огляд існуючих рішень для доведення властивостей систем та моделей, класифікуються мови програмування та системи доведення теорем.

Концептуальна модель

У розділі 2 розглядається математична модель формальної системи, яка умовно розділяється на систему мов для системного програмування (спектр мов середовище виконання) та систему мов для прикладного та програмування вищих логік (спектр вищих мов). Час дослідження цього напрямлення припав на 2017-2018 роки.

Формальне середовище виконання

У розділі 3 розкажується про повний стек формального програмного забезпечення від віртуальної машини, байт-код інтерпретатора, середовища виконання та планування процесів до формальної мови для доведення теорем (або сімейства мов). Час дослідження цього напрямлення припав на 2016-2017 роки.

У розділі 4 описується базова бібліотека системи середовища виконання, написана на мові нижчого рівня Erlang. Час дослідження цього напрямлення припав на 2013-2021 роки.

Система верифікації

У розділі 5 подається опис системи вищих формальних мов для доведення теорем до кубічної теорії та гомотопічної системи типів. Час дослідження цього напрямлення припав на 2021-2023 роки.

У розділі 6 описується базова бібліотека системи формальних мов, індуктивна та гомотопічні системи типів для кубічних тайпчекерів. Час дослідження цього напрямлення припав на 2018-2021 роки.

Математичні компоненти

У розділі 7 пропонується ряд математичних моделей та теорій з використанням базової бібліотеки розділу 3 та мови гомотопічної системи типів. Час дослідження цього напрямлення припав на 2018-2021 роки.

Додаткові матеріали

У додатках надаються приклади іншого використання формальних мов та моделей, зокрема для мінімальної формальної мови, побудованої в рамках дисертації, та мови програмування Coq. А також дається приклад використання гомотопічної мови для формальної філософії.

0.6 Подяка

Формальна верифікація

Присвячується вчителям
нідерландської школи

Ніколасу де Брейну,
Хенку Барендрехту
та Барту Якобсу

Перша глава дає огляд існуючих рішень та вступ до предмету формальної верифікації. Розглядається класифікація систем верифікації, систем доведення теорем, та систем моделювання. Зображається місце дослідження у області та дотичні системи, такі як формалізовані середовища виконання.

Вступне слово

Батьком першої формальної механізованої комп'ютерної системи верифікації теорем у фібраційній моделі став Ніколас де Брейн та співавтори системи AUTOMATH. Пізніше Хенк Барендрехт класифікував усі конфігурації типових систем лямбда числень у лямбда-кубі та довів майже усі його теореми. У цій роботі для вищих формальних мов використовується лише одна, найвища вершина решітки лямбда-куба Барендрехта, а для середовища виконання — система Жирара.

1.1 Формальна верифікація та валідація

Для унеможливлення помилок на виробництві застосовуються різні методи формальної верифікації. Формальна верифікація — доказ, або заперечення відповідності системи у відношенні до певної формальної специфікації або характеристики, із використанням формальних методів математики.

Дамо основні визначення згідно з міжнародними нормами (IEEE, ANSI)¹ та у відповідності до вимог Європейського Ае-

¹IEEE Std 1012-2016 — V&V Software verification and validation

рокоsmічного Агенства². У відповідності до промислового процесу розробки, верифікація та валідація програмного забезпечення є частиною цього процесу. Програмне забезпечення перевіряється на відповідність функціональних властивостей згідно вимог.

Процес валідації включає в себе перегляд (code review), тестування (модульне, інтеграційне, властивостей), перевірка моделей, аудит, увесь комплекс необхідний для доведення, що продукт відповідає вимогам висунутим при розробці. Такі вимоги формуються на початковому етапі, результатом якого є формальна специфікація.

1.2 Формальна специфікація

Для спрощення процесу верифікації та валідації застосовується математична техніка формалізації постановки задачі — формальна специфікація. Формальна специфікація — це математична модель, створена для опису систем, визначення їх основних властивостей, та інструментарій для перевірки властивостей (формальної верифікації) цих систем, побудованих на основі формальної специфікації.

Існують два фундаментальні підходи до формальних специфікацій: 1) Агребраїчний підхід, де система описується в термінах операцій, та відношень між ними (або аналітичний метод), та 2) Модельно-орієнтований підхід, де модель створена конструктивними побудовами, як то на базі теорії множин, чи інкаше, а системні операції визначаються тим, як вони змінюють стан системи (конструктивний, або синтетичний метод). Також були створені сімейства послідованих та розподілених мов.

1.2.1 Програмне забезпечення

Найбільш стандартизована та прийнята в області формальної верифікації — це нотація Z^3 (Spivey, 1992), приклад модельно-орієнтованої мови Названа у честь Ернеста Цермело, роботи якого мали вплив на фундамент математики та аксіоматику теорії множин. Саме теорія множин, та логіка предикатів першого порядку є теорією мови Z . Тут також заслуговують уваги сесійні типи Кохея Хонди⁴, які дозволяють формалізувати протоколи на рівні вбудованої теорії типів.

Інша відома мова формальної специфікації як стандарт для моделювання розподілених систем, таких як телефонні мережі

²ESA PSS-05-10 1-1 1995 – Guide to software verification and validation

³ISO/IEC 13568:2002 – Z formal specification notation

⁴<http://mrg.doc.ic.ac.uk/kohei/>

та протоколи, це LOTOS⁵ (Bolognesi, Brinksma, 1987), як приклад алгебраїчного підходу. Ця мова побудована на темпоральних логіках, та поведінках залежних від спостережень. Інші темпоральні мови специфікацій, які можна відзначити тут — це TLA+⁶, CSP (Hoare, 1985), CCS⁷ (Milner, 1971), Actor Model, BPMN, etc.

1.2.2 Математичні компоненти

Перші системи комп'ютерної алгебри були розроблені ще під PDP-6 та PDP-10, такі як MATHLAB (MIT), інші ранні системи: MACSYMA (Джоел Мозес), SCRATCHPAD (Ричард Дженкс, IBM), REDUCE (Тони Хирн), SAC-I, пізніше SACLIB (Джорж Коллінз), MUMATH для мікропроцесорів (Девід Стоутмаєр) та пізніше DERIVE. Сучасні системи комп'ютерної алгебри: AXIOM послідовних SCRATCHPAD (NAG), MAGMA (Джон Кеннон, Сіднейський університет), MUPAD (Бенно Фуксштейнер, університет міста Падерборн).

1.3 Формальні методи верифікації

1.3.1 Спеціалізовані системи моделювання

Можна виділити три підходи до верифікації. Перший застосовується де вже є певна програма написана на певній мові програмування і потрібно довести ізоморфність цієї програми до доведеної моделі. Ця задача вирішується у побудові теоретичної моделі для певної мови програмування, потім програма на цій мові переводиться у цю теоретичну модель і доводить ізоморфізм цієї програми у побудованій моделі до доведеної моделі. Приклади таких систем та піходів: 1) VST (CompCert, сертифікація C програм); 2) NuPRL (Cornell University, розподілені системи, залежні типи); 3) TLA+ (Microsoft Research, Леслі Лампорт); 4) Twelf (для верифікації мов програмування); 5) SystemVerilog (для програмного та апаратного забезпечення).

1.3.2 Мови з залежними типами та індукцією

Другий підхід можна назвати підходом вбудованих мов. Компілятор основної мови перевіряє модель закодовану у ній же. Можливо моделювання логік вищого порядку, лінійних логік, модальних логік, категорний та гомотопічних логік. Процес специфікації та верифікації відбувається в основній мові, а сертифіковані програми автоматично екстрагуються в довільні мови.

⁵ISO 8807:1989 — LOTOS — A formal description technique based on the temporal ordering of observational behaviour

⁶The TLA+ Language and Tools for Hardware and Software Engineers

⁷J.C.M. Baeten. A Brief History of Process Algebra.

Приклади таких систем: 1) Coq побудована на мові OCaml від науково-дослідного інституту Франції INRIA; 2) Agda побудована на мові Haskell від шведського інституту технологій Чалмерс; 3) Lean побудована на мові C++ від Microsoft Research та Університету Каргені-Мелона; 4) F* – окремий проект Microsoft Research.

1.3.3 Гомотопічні мови

Приклади таких систем: 1) cubicaltt – ⁸CCHM імплементація авторства Андерса Мортберга кубічної теорії типів Саймона Губера; 2) uacstt – ще одна декартова кубічна теорія ⁹ABCFHL; 3) Agda –cubical – вбудований кубічний тайпчекер в Агду; 4) Lean – Lean також має вбудований кубічний тайпчекер; 5) RedPRL – кубічна імплементація декартової кубічної теорії ABCFHL.

1.3.4 Системи автоматичного доведення теорем

Третій підхід полягає в синтезі конструктивного доведення для формальної специфікації. Це може бути зроблено за допомогою асистентів доведення теорем, таких як HOL/Isabelle, Coq, ACL2, або систем розв'язку задач виконуваності формул в теоріях (Satisfiability Modulo Theories, SMT).

Перші спроби пошуку формального фундаменту для теорії обчислень були покладені Алонзо Черчем та Хаскелем Каррі у 30-х роках 20-го століття. Було запропоноване лямбда числення як апарат який може замінити класичну теорію множин та її аксіоматику, пропонуючи при цьому обчислювальну семантику. Пізніше в 1958, ця мова була втілена у вигляді LISP лауреатом премії тюрінга Джоном МакКарті, який працював в Принстоні. Ця мова була побудована на конструктивних примітивах, які пізніше виявилися компонентами індуктивних конструкцій та були формалізовані за допомогою теорії категорій Вільяма Лавіра. Окрім LISP, нетипізоване лямбда числення маніфестується у такі мови як Erlang, JavaScript, Python. До цих пір нетипізоване лямбда числення є одною з мов у які робиться конвертація доведених програм (екстракція).

Перший математичний прuver AUTOMATH (і його модифікації AUT-68 та AUT-QE), який був написаний для комп'ютерів розроблявся під керівництвом де Брейна, 1967. У цьому прuverі був квантор загальності та лямбда функція, таким чином це

⁸Cyril Cohen, Thierry Coquand, Simon Huber, Anders Mörtberg. Cubical Type Theory: a constructive interpretation of the univalence axiom. 2015. <https://5ht.co/cubicaltt.pdf>

⁹Carlo Angiuli, Brunerie, Coquand, Kuen-Bang Hou (Favonia), Robert Harper, Dan Licata. Cartesian Cubical Type Theory. 2017. <https://5ht.co/cctt.pdf>

був перший прувер побудований на засадах ізоморфізма Каррі-Говарда-Ламбека.

ML/LCF або метамова і логіка обчислювальних функцій були наступним кроком до досягнення фундаментальної мови простору, тут вперше з'явилися алебраїчні типи даних у вигляді індуктивних типів, поліноміальних функторів або термінованих (well-founded) дерев. Роберт Мілнер, асистований Морісом та Н'юві розробив Метамову (ML), як інструмент для побудови прувера LCF. LCF був основоположником у родині пруверів HOL88, HOL90, HOL98 та останньої версії на даний час HOL/Isabell. Пізніше були побудовані категорні моделі Татсою Хагіно (CPL, Японія) та Робіна Кокета (Charity, Канада).

У 80-90 роках були створені інші системи автоматичного доведення теорем, такі як Mizar (Трибулек, 1989). PVS (Оур, Рушбі, Шанкар, 1995), ACL2 на базі Common Lisp (Боєр, Кауфман, Мур, 1996), Otter (МакКюн, 1996).

1.4 Формальні мови та середовища виконання

Усі середовища виконання можна умовно розділити на два класи: 1) інтерпретатори нетипізованого або просто типізованого (рідше з більш потужними системами типів), лямбда числення з можливими JIT оптимізаціями; та 2) безпосередня генерація інструкцій процесора і лінування цієї програми з середовищем виконання що забезпечує планування ресурсів (в цій області переважно використовується System F типізація).

До першого класу можна віднести такі віртуальні машини та інтерпретатори як Erlang (BEAM), JavaScript (V8), Java (HotSpot), K (Kx), PHP (HHVM), Python (PyPy), LuaJIT та багато інших інтерпретаторів.

До другого класу можна віднести такі мови програмування: ML, OCaml, Rust, Haskell, Pony. Часто використовується LLVM як спосіб генерації програмного коду, однак на момент публікації статті немає промислового верифікованого LLVM генератора. Rust використовує проміжну мову MIR над LLVM рівнем. Побудова верифікованого компілятора для такого класу систем виходить за межі цього дослідження. Нас тут буде цікавити лише вибір найкращого кандидата для середовища виконання.

Найбільш цікаві цільові платформи для виконання програм які побудовані на основі формальних доведень для нас є OCaml (тому, що це основна мова екстракту для промислової системи доведення теорем Coq), Rust (тому, що рантайм може бути написаний без використання сміттєзбірника), Erlang (тому, що підтримує неблоковану семантику пі-калкулуса) та Pony (тому, що семантика його пі-калкулуса побудована на імутабельних чергах

та CAS-курсорax). У цій роботі ми зосередимося на дослідженні тих підходів та побудові наступних прототипів.

1.4.1 Формальні інтерпретатори та ОС

Перший прототип, рантайм `cps` – лінійний векторизований інтерпретатор (підтримка SSE/AVX інструкцій) та система управління ресурсами з планувальником лінійних програм та системою черг і CAS курсорів у якості моделі пі-калькула. Розглядається також використання ядра L4 на мові C, верифікованого за допомогою HOL/Isabell, у якості базової операційної системи.

1.4.2 Формальний ввід-вивід

Другий прототип побудований на базі `soq.io`, що дозволяє використовувати бібліотеки OCaml для промислового програмування в Soq. У цій роботі ми формально показали і продемонстрували коіндуктивний шел та вічно працюючу тотальну програму на Soq. Ця робота проводилася в рамках дослідження системи ефектів для результуючої мови програмування.

1.4.3 Чисті системи типів

Третій прототип – побудова тайпчекера та екстрактора у мову Erlang та O. Ця робота представлена у вигляді PTS тайпчекера OM, який виступає у ролі проміжної мови для повної нормалізації лямбда термів. В роботі використане нерекурсивне кодування індуктивних типів та продемонстрована теж бескінечна тотальна програма у якості способу лінкування з підсистемою вводу-виводу віртуальної машини Erlang. В доповнення до існуючих імплементацій CoC на Haskell (Morte).

1.4.4 Гомотопічні системи типів

Четвертий прототип – імплементація першого кубічного верифікатора на мові Erlang в доповнення до існуючих CCHM (Erlang, Haskell), ABCFHL (Haskell, OCaml).

1.4.5 Мульти模альні мови

1.5 Висновки

Як результат цього розділу, було досліджено: i) усі системи доведення теорем; ii) формальні мови програмування; iii) системи верифікації; iv) формальні середовища виконання, та встановлено, що усі такі системи є носіями мовних елементів які згідно теорії типів Мартіна-Льофа можна кластеризувати по наступним мовам, кожна з яких репрезентує правила типу: i) O_λ — нетипизоване λ -числення Чорча; ii) O_π — числення процесів, CCS, CSP або π -числення Мілнера; iii) O_μ — тензорне числення та векторизація (MatLab, Julia, kx, J); iv) O_Π — числення конструкцій (функціональна повнота); v) O_Σ — числення контекстів (контекстуальна повнота); vi) $O_=$ — теорія типів Мартіна-Льофа (логіка); vii) O_W — числення індуктивних конструкцій (матіндукція); viii) O_I — гомотопічна система типів (формальна математика).

Концептуальна модель формальної системи мов

Присвячується автору ML, CCS,
LCF та π -числення

Артуру Джону Робіну Мілнеру

Другий розділ описує розвиток концептуальної моделі системи доведення теорем як сукупності: i) середовища виконання, яке складається з інтерпретатора та операційної системи; ii) послідовності формальних мов програмування, кожна наступна з яких, складніша за попередню, має свою операційну семантику, та наслідує усі властивості попередніх мов послідовності.

Вступне слово

ML/LCF — LISP/LMI,CL/ACL2 — Smalltalk-80 — APL,K — BEAM —

2.1 Попередні відомості та теорії

Для розповіді про систему доведення теорем, як систему мов програмування будемо використовувати теорію категорії та теорію індуктивних типів для специфікації синтаксисів мов програмування. Перелік необхідних формальних теорій: лямбда-числення, теорії індуктивних типів, вищі рівності для гомотопічної системи тощо, містяться в розділі 3. Формальна теорія категорії міститься у розділі 4. Слід зауважити, що ця формалізація проводиться на основі гомотопічної мови програмування побудованої в даному розділі 2.

Визначення 1. (Концепт, Готлоб Фреге). Концепт — це предикат над об'єктом, або іншими словами залежний Π -тип з теорії типів Мартіна-Льофа. Об'єкт x : o належить до концепту, тільки якщо

сам концепт, параметризований цим об'єктом, населений $p(o)$: \mathcal{U} , де p : $\text{concept}(o)$.

Визначення 2. (Система). Визначимо систему як сукупність об'єктів $Ob : \mathcal{U}$ та зв'язків між ними $\text{Hom} : Ob \rightarrow Ob \rightarrow \mathcal{U}$.

Визначення 3. (Концептуальна модель). Таким чином концептуальна модель визначається як категорія, об'єкти якої індексовані певною множиною, або залежні від параметра.

Визначення 4. (Синтаксичне дерево). Синтаксичне дерево — це індуктивний тип або дерево Бома, конструктори якого відповідають одному з 5 правил в теорії типів, як правило використовуються три правила: правило формації, інтро-правила та елімінатор.

Визначення 5. (Вище синтаксичне дерево). Синтаксичне дерево в яке додано β та η правила називається вищим синтаксичним деревом.

Визначення 6. (Мова програмування). Мова програмування або мовна категорія — це категорія, об'єкти якої — це *maybe*-типи сум синтаксичних дерев мов програмування, а морфізми — це стрілки (які містять правила виводу, типизації, нормалізації, екстації тощо). Приклади синтаксичних дерев: O_{Π} , O_{Σ} , $O_{=}$. Приклади мовних категорій: O_{PTS} , O_{MLTT} , O_{HTS} .

Визначення 7. (Модель). Модель визначимо як систему формальних мов (об'єкти) разом з їх програмами, та мовними перетвореннями (зв'язки) між ними для яких працює правило асоціативності композиції та правила лівої і правої композиції з одиничними стрілками. Іншими словами будемо розуміти тут категорну модель.

Визначення 8. (Послідовність синтаксичних дерев). Кожна послідовність синтаксичних дерев

$$O_{\Pi} \rightarrow O_{\Sigma} \rightarrow O_{=} \rightarrow O_W \rightarrow O_I. \quad (2.1)$$

генерує відповідну послідовність мов програмування

$$\begin{aligned} O_{PTS}(O_{\Pi}) \rightarrow O_{CTX}(O_{\Pi}, O_{\Sigma}) \rightarrow O_{EQU}(\dots, O_{\Sigma}, O_{=}) \rightarrow \\ \rightarrow O_{ITS}(\dots, O_{=}, O_W) \rightarrow O_{HTS}(\dots, O_W, O_I). \end{aligned} \quad (2.2)$$

наступним чином. Кожна мова програмування залежить від синтаксису який її визначає та всіх попередніх синтаксисів мов програмування з послідовності. Перша мова програмування містить тільки перший синтаксис. Розкриті сигнатури мають вигляд: $O_{PTS} : O_{\Pi} \rightarrow \mathcal{U}$, $O_{CTX} : O_{\Pi} \rightarrow O_{\Sigma} \rightarrow \mathcal{U}$, $O_{EQU} : O_{\Pi} \rightarrow O_{\Sigma} \rightarrow O_{=} \rightarrow \mathcal{U}$, $O_{ITS} : O_{\Pi} \rightarrow O_{\Sigma} \rightarrow O_{=} \rightarrow O_W \rightarrow \mathcal{U}$, $O_{HTS} : O_{\Pi} \rightarrow O_{\Sigma} \rightarrow O_{=} \rightarrow O_W \rightarrow O_I \rightarrow \mathcal{U}$.

Таким чином кожна наступна мова програмування містить усі попередні мови програмування, визначені послідовністю синтаксичних дерев,

Визначення 9. (Створення мовної категорії). Мови можна додавати, наприклад $O_{HTS} = O_{\Pi\Sigma=WI}$, для побудови якої необхідно об'єднати у індуктивному типі мови усі індуктивні типи її підмов. Таким чином функтор діє на декартовому добутку синтаксичних дерев мовних категорій та має значення в категорії мовних категорій. Приклад найпотужнішої гомотопічної мови:

$$(2.3) \quad O_{HTS} = O_{\Pi\Sigma=WI} : O_{\Pi} \rightarrow O_{\Sigma} \rightarrow O_{=} \rightarrow O_W \rightarrow O_I \rightarrow \mathcal{U}.$$

Кожне синтаксичне дерево, як правило, містить конструктори та елімінатори певного одного типу. Але починаючи з O_{ITS} складність типів, які додаються до ядра значно зростає. Таким чином мовні категорії конструються гранулярно з точністю до включення певного типу в ядро верифікатора.

Визначення 10. (Типи синтаксичних дерев). У розділі 1 були проаналізовані усі мови програмування та середовища виконання, а також спеціалізовані мови моделювання. В результаті чого було встановлено чіткі індивідуальні мовні синтаксиси. Кожен синтаксис складається з множини синтаксичних одиниць цієї мови (конструктори індуктивного типу), які відповідають правилам теорії типів Мартіна-Льофа (формації, інтро-правило, елімінатор, β -, та η -правила). Якщо додати β -, та η -правила як рівності у визначення синтаксису, то для представлення потрібні вищі індуктивні типи. Таким чином кожному синтаксичному дереву відповідає певний тип в теорії типів Мартіна-Льофа.

Визначення 11. (Спектральна категорія мов). Так, виділяється наступна послідовність мов, та функторів між ними, де кожна мова-кодомен є складнішою та біль потужною за мову-домейн. Система мов є категорією мовних категорій або категорією мов програмування.

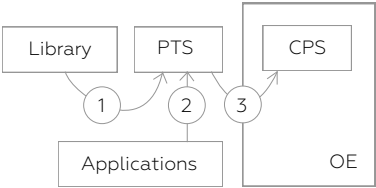
$$(2.4) \quad O_{\infty} : O_{CPS} \rightarrow O_{PTS} \rightarrow O_{MLTT} \rightarrow O_{ITS} \rightarrow O_{HTS} \rightarrow \dots$$

Визначення 12. (Коконтекстуальна категорія мов). Якщо не виділяти певну послідовність мовного ускладнення та розглядати усі суми усієї певної множини мовних синтаксисів, то ми отриміємо коконтекстуальну категорію, де об'єкти — це усі можливі мовні категорії побудовані за допомогою усіх перестановок суми мовних синтаксисів, а морфізми це функтори перетворення однієї мовної категорії в іншу мовну категорію. Приклади: $O_{I*} \rightarrow O_{\Pi=}$, $O_{\Pi} \rightarrow O_{\Pi\Sigma}$, $O_{\Pi} \rightarrow O_{\Pi\Sigma}$, $O_{\Pi*} \rightarrow O_{\Pi}$.

Таблиця 2.1 : Аналіз формальних суб-мов як примітивів ядра

| Синтаксис | Мова програмування |
|--------------------|---|
| O_λ | Нетипизоване λ -числення Чорча |
| O_π | Числення процесів, CCS, CSP або π -числення Мілнера |
| O_μ | Тензорне числення та векторизація |
| O_Π | Числення конструкцій (функціональна повнота) |
| O_Σ | Числення контекстів (контекстуальна повнота) |
| $O_=$ | Теорія типів Мартіна-Льофа (логіка) |
| O_W | Числення (ко-)індуктивних конструкцій (матіндукція) |
| O_I | Гомотопічна система типів (формальна математика) |
| O_\triangleright | Кубічна система с обмежувальною рекурсією |
| $O/_$ | Система фактор-типів (Lean) |
| O_H | Мова з оператором Адамара (квантова фізика) |
| O_{\neg} | Модальна HoTT (фізика) |

Сірим кольором показаний спектр мовних примітивів ядра концептуальної моделі.



: Мінімальна система з чистої мови та інтерпретатора

Рис. 2.1

2.2 Структурне представлення моделі

Виходячи з визначення моделі, вони можуть мати різний набір об’єктів в системі мов програмування. Покажемо приклади екземплярів які можна породити в рамках цієї моделі.

2.2.1 Мінімальна система

Приклад мінімальної системи, яка містить лише одну мову для доведення теорем та одну мову для виконання програм.

$$PTS_{CPS} = \begin{cases} Ob : \{O_{CPS}, O_{PTS}\} \\ Hom : \{1, 2 : \mathbb{1} \rightarrow O_{PTS}, 3 : O_{PTS} \rightarrow O_{CPS}\} \end{cases}$$

(2.5)

Стрілки 1 та 2 визначають модель та базову бібліотеку, а стрілка 3 означає екстракт доведення (якщо таке є) в інтерпретатор. Можна використати графічну мову мереж Петрі для зображення екземпляра моделі системи мов.

2.2.2 Максимальна система

Інший приклад системи — це максимальна система, яка містить усі формальні мови програмування та формальне середовище виконання (порядок синтаксичних дерев як параметрів при конструюванні мовної категорії може змінюватися, тут генеалогія HTS не ведеться від MLTT, яке є розгалуженням).

$$(2.6) \quad \text{Total} = \begin{cases} \text{Ob} : \{O_{\text{CPS}}, O_{\text{PTS}}, O_{\text{MLTT}}, O_{\text{ITS}}, O_{\text{HTS}}\} \\ \text{Hom} : \begin{cases} 1, 2 : \mathbb{1} \rightarrow O_{\text{HTS}}, 3 : O_{\text{MLTT}} \rightarrow O_{\text{ITS}} \\ 4 : O_{\text{HTS}} \rightarrow O_{\text{ITS}}, 5 : O_{\text{ITS}} \rightarrow O_{\text{PTS}}, 6 : O_{\text{PTS}} \rightarrow O_{\text{CPS}} \end{cases} \end{cases}$$

За допомогою мереж Петрі це можна відобразити наступним чином:

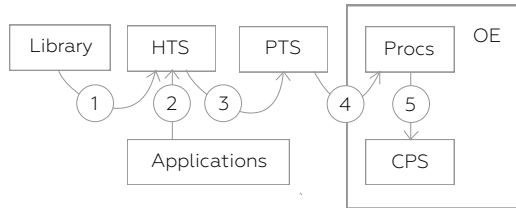


Рис. 2.2 : Кубічна та чиста системи типів та середовище виконання

2.3 Формальні мови програмування

Тут йдеться про мови програмування придатні для доведення теорем, та їх таксономію від найелементарніших (чистої системи з одним типом Π) до найпотужніших гомотопічних систем. Одна така гомотопічна система є кінцевим завданням цього розділу — побудова моделі гомотопічного верифікатора. В процесі його побудови в цьому розділі ми розглянемо під мікроскопом складові частини його нижчих мовних рівнів.

Застосуємо категорну семантику для мов програмування і будемо розглядати мови програмування як моноїдальні мовні категорії, об'єкти яких є просторами усіх програм цих мов програмування, а морфізми — правила верифікації та компіляції цих мов. Морфізми між мовними категоріями в категорії мов програмування — це функтори підвищення та пониження складності мови, подібно до того як діють морфізми в контекстуальних категоріях. Морфізм деконструює або конструює за допомогою Either-типу або Σ -типу індуктивний тип мови програмування.

Мови розкладаються у спектральну (індексовану натуральними числами $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{U}$) послідовність мов, кожен елемент якої є

мовою програмування, яка не містить синтаксичне дерево вищої мови програмування.

2.3.1 Чиста система типів O_{PTS}

Чиста ситема або числення конструкцій або система з одним типом або система з однією аксіомою, продовжує традиції елементарних прверів в стилі першого AUTOMATH та сучасних Henk, Morte, Cedile, Om.

Визначення 13. (Мовна категорія чистої мови O_{PTS}).

$$O_{PTS} = \begin{cases} \text{Ob} : \{ X : \text{maybe PTS}, \text{target} : \text{maybe CPS} \} \\ \text{Hom} : \begin{cases} \text{type}, \text{norm} : X \rightarrow X, \text{extract} : X \rightarrow \text{target} \\ \text{certify} : X \rightarrow \text{target} = \text{type} \circ \text{norm} \circ \text{extract} \end{cases} \end{cases} \quad (2.7)$$

Визначення 14. (Синтаксис мовної категорії O_{PTS}). Чиста мова O_{PTS} містить лише синтаксис одного типу, П-типу. Така теорія називається теорією з одним типом, або з однією аксіомою.

```
data PTS = ppure ( _ : pts PTS)
```

Вона описана в літературі як Calculus of Construction (Кокан), Pure Type System (Стемп, Фу).

Визначення 15. (Синтаксичне дерево O_{Π}).

```
data pts (lang: U)
= star (n: nat)
| var (x: name) (l: nat)
| pi (x: name) (l: nat) (f: lang)
| lambda (x: name) (l: nat) (f: lang)
| app (f a: lang)
```

2.3.2 Теорія типів Мартіна-Льофа O_{MLTT}

Мова теорії типів є сучасною основою всіх прверів з залежними типами, такими, наприклад, як NuPRL та Agda. Багато так званих ПΣ прверів імплементують MLTT серед таких як: ПΣ¹, ПV².

Визначення 16. (Мовна категорія O_{MLTT}).

$$O_{MLTT} = \begin{cases} \text{Ob} : \{ \text{maybe MLTT} \} \\ \text{Hom} : \begin{cases} \text{type}, \text{norm} : \text{Ob} \rightarrow \text{Ob} \\ \text{certify} : \text{Ob} \rightarrow \text{Ob} = \text{type} \circ \text{norm} \end{cases} \end{cases} \quad (2.8)$$

¹<https://github.com/zlizta/pisigma-0-2-2>

²<https://github.com/sweirich/pi-forall>

Визначення 17. (Синтаксис мовної категорії O_{MLTT}). Мова O_{MLTT} включає в себе синтаксиси трьох типів теорії Мартіна-Льофа: O_{Π} , O_{Σ} , $O_{=}$.

```
data MLTT = mpure ( _: pts MLTT)
          | msigma ( _: exists MLTT)
          | mid ( _: identity MLTT)
```

Визначення 18. (Синтаксичне дерево O_{Σ}). Також можна до чистої системи додати Σ -тип, піднявши типову систему до мови $O_{MLTT-72}$ або $O_{\Pi\Sigma}$:

```
data exists (lang: U)
  = sigma (n: name) (a b: lang)
  | pair (a b: lang)
  | fst (p: lang)
  | snd (p: lang)
```

Визначення 19. (Синтаксичне дерево $O_{=}$). Додавши тип рівності можна підняти систему ще на одну сходинку, до $O_{MLTT-84}$ або $O_{\Pi\Sigma=}$:

```
data identity (lang: U)
  = id (t a b: lang)
  | id_intro (a b: lang)
  | id_elim (a b c d e: lang)
```

2.3.3 Система індуктивних типів O_{ITS}

Визначення 20. (Мовна категорія O_{ITS}).

$$O_{ITS} = \begin{cases} Ob : \{ X : \text{maybe ITS}, \text{target} : \text{maybe CPS} \} \\ Hom : \begin{cases} \text{type, norm, induction} : X \rightarrow X, \text{extract} : X \rightarrow \text{target} \\ \text{certify} : X \rightarrow \text{target} \\ \text{cerfity} = \text{type} \circ \text{norm} \circ \text{induction} \circ \text{extract} \end{cases} \end{cases}$$

(2.9)

Мова індуктивних типів дозволяє безпосередньо кодувати індуктивні типи, не використовуючи схеми кодування Бома, містить усі попередні мовні синтаксиси: $O_{=}$, O_{Σ} , O_{Π} .

Визначення 21. (Синтаксичне дерево мовної категорії O_{ITS}).

```
data ITS = ipure ( _: pts ITS)
          | isigma ( _: exists ITS)
          | iid ( _: identity ITS)
          | iITS ( _: ind ITS)
```

Мова містить наступні допоміжні визначення: i) телескопу, який містить послідовність елементів мови; ii) розгалуження, як конструкцій case оператора; iii) імен конструкторів індуктивного типу.

```

data tele (A: U) = emp | tel (n: name) (b: A) (t: tele A)
data branch (A: U) = br (n: name) (args: list name) (term: A)
data label (A: U) = lab (n: name) (t: tele A)
                  | com (n: name) (t: tele A) (dim: list name)
                    (s: list (prod (prod name bool) A))

```

Визначення 22. (Синтаксичне дерево O_*). Правило формації, конструктора та елімінатора визначається синтаксичним деревом O_* :

```

data ind (lang: U)
= datum (n: name) (t: tele lang) (labels: list (label lang))
| case (n: name) (t: lang) (branches: list (branch lang))
| ctor (n: name) (args: list lang)

```

2.3.4 Гомотопічна система типів O_{HTS}

Визначення 23. (Мовна категорія O_{HTS}).

$$O_{HTS} = \begin{cases} Ob : \{ \text{maybe HTS} \} \\ Hom : \begin{cases} \text{type, norm} : Ob \rightarrow Ob \\ \text{certify} : Ob \rightarrow Ob = \text{type} \circ \text{norm} \end{cases} \end{cases}$$

Визначення 24. (Синтаксис мовної категорії O_{HTS}). Синтаксис гомотопічної мовної категорії містить усі попередні мовні синтаксиси: O_I , O_W , $O_=$, O_Σ , O_Π :

```

data HTS = hpure (_: pts HTS)
          | hsigma (_: exists HTS)
          | hid (_: identity HTS)
          | hind (_: ind HTS)
          | homotopy (_: hts HTS)

```

Гомотопічна типа наслідує O_{ITS} але модифіковану з Path-типом в індуктивних визначеннях, структурою композиції, анонсує Path-тип (формація, конструктор, та елімінатор) як лямбда функцію на відрізу, а також склейку типів у всесвіті та склейку змінних з відповідними елімінаторами.

Визначення 25. (Синтаксичне дерево O_I).

```

data hts (lang: U)
= path (t a b: lang)
| plam (n: name) (a: alg) (b: lang)
| papp (f: name) (a: lang) (p: alg)
| comp_ (a b: lang)
| fill_ (a b c: lang)
| glue_ (a b c: lang)
| glue_elem (a b: lang)
| unglue_elem (a b: lang)

```

Таким чином, O_{HTS} містить два Id-типа, один унаслідований від $O_=$, а інший який міститься в синтаксичному дереві O_I .

Система мов середовища виконання

Присвячується автору Erlang

Джо Армстронгу

Третій розділ описує розвиток концептуальної моделі системи доведення теорем як сукупності формальних середовищ виконання, кожне наступе з яких, складніше за попереднє, має свою операційну семантику, та наслідуює усі властивості попередніх операційних середовищ послідовності.

Вступне слово

3.1 Інтерпретатор як основна лямбда-система

Мінімальна мова системи O_{CPS} визначається простим синтаксичним деревом:

```
data cps = var (x: nat)
          | lam (l: nat) (d: cps)
          | app (f a: cps)
```

Однак, на практиці, застосовують більш складні описи синтаксичних дерев, зокрема для лінійних обчислень, та розширення синтаксичного дерева спеціальними командами пов'язаними з середовищем виконання. Програми таких інтерпретаторів відповідно виконуються у певній пам'яті, яка використовується як контекст виконання. Кожна така програма крутиться як одиниця виконання на певному ядрі процесора. Система процесів, де кожен процес є CPS-програмою яку виконує інтерпретатор на певному ядрі.

Мотивація для побудови такого інтерпретатору, який повністю розміщується разом зі програмою в L1 стеку (який лімітований 64КБ) базується на успіху таких віртуальних машин

Таблиця 3.1 : Заміри на інтерпретаторах ландшафту атаки

| Мова | Фас(5) в нс |
|--------|------------------|
| Rust | 0 |
| Java | 3 |
| PyPy | 8 |
| CPS | 291 |
| Python | 537 |
| K | 756/635 |
| Erlang | 10699/1806/436/9 |
| LuaJIT | 33856 |

Таблиця 3.2 : Заміри на інтерпретаторах ландшафту атаки

| Мова | Akk(3,4) в мкс |
|------|----------------|
| CPS | 635 |
| Rust | 8,968 |

як LuaJIT, V8, HotSpot, а також векторних мов програмування типу K та J. Якби ми могли побудувати дійсно швидкий інтерпретатор який би виконував програми цілком в L1 кеші, байткод та стріми якого були би вирівняні по словам архітектури, а для векторних обчислень застосовувалися би AVX інструкції, які, як відомо перемагають по ціні-якості GPU обчислення. Таким чином, такий інтерпретатор міг би, навіть без спеціалізованої JIT компіляції, скласти конкуренцію сучасним промисловим інтерпретаторам, таким як Erlang, Python, K, LuaJIT.

Для дослідження цієї гіпотези мною було побудовано еспериментальний інтерпретатор без байт-коду, але з вирівняним по словам архітектури стріму команд, які є безпосередньою машинною презентацією конструкторів індуктивних типів (enum) мови Rust. Наступні результати були отримані після неотпимізованої версії інтерпретатора при обчисленні факторіала (5) та функції Акермана у точці (3,4).

Ключовим викликом тут стали лінійні типи мови Rust, які не дозволяють звертатися до ссилкок, які вже були оброблені, а це впливає на всю архітектуру тензорного преставлення змінних в мові інтерпретатор CPS, яка наслідує певним чином мову K.

3.1.1 Векторизація засобами мови Rust

```
objdump ./target/release/o -d | grep mulpd
223f1: c5 f5 59 0c d3      vmulpd (%rbx,%rdx,8),%ymm1,%ymm1
223f6: c5 dd 59 64 d3 20    vmulpd 0x20(%rbx,%rdx,8),%ymm4,%ymm4
22416: c5 f5 59 4c d3 40    vmulpd 0x40(%rbx,%rdx,8),%ymm1,%ymm1
2241c: c5 dd 59 64 d3 60    vmulpd 0x60(%rbx,%rdx,8),%ymm4,%ymm4
```

```
2264d: c5 f5 59 0c d3      vmulps (%rbx,%rdx,8),%ymm1,%ymm1
22652: c5 e5 59 5c d3 20      vmulps 0x20(%rbx,%rdx,8),%ymm3,%ymm3
```

3.1.2 Байт-код інтерпретатора

Синтаксичне дерево, або неформалізований байт-код віртуальної машини або інтерпретатора OCPS розкладається на два дерева, одне дерево для управляючих команд інтерпретатора: *Defer*, *Continuation*, *Start* (початок програми), *Return* (завершення програми).

```
data Lazy = Defer (otree: NodeId) (a: AST) (cont: Cont)
           | Continuation (otree: NodeId) (a: AST) (cont: Cont)
           | Return (a: AST)
           | Start
```

Операції віртуальної машини: умовний оператор, оператор присвоєння, лямбда функція та аплікація, є відображеннями на конструктори синтаксичного дерева.

```
data Cont = Expressions (a: AST) (v: Option (Iter AST)) (c: Cont)
           | Assign (ast: AST) (cont: Cont)
           | Cond (c,d: AST) (cont: Cont)
           | Func (a,b,c: AST) (cont: Cont)
           | List (acc: Vec AST) (vec: Iter AST) (i: Nat) (c: Cont)
           | Call (a: AST) (i: Nat) (cont: Cont)
           | Return
           | Intercore (m: Message) (cont: Cont)
           | Yield (cont: Cont)
```

3.1.3 Синтаксис

Синтаксис мови OCPS підтримує тензори, та звичайне лямбда числення з значеннями у тензорах машинних типів даних: i32, i64.

```
E: V | A | C
NC: ";" = [] | ";" m:NL = m
FC: ";" = [] | ";" m:FL = m
EC: ";" = [] | ";" m:EL = m
NL: NAME | o:NAME m:NC = Cons o m
FL: E | o:E | m:FC = Cons o m
EL: E | EC | o:E m:EC = Cons o m
C: N | c:N a:C = Call c a
N: NAME | S | HEX | L | F
L: "(" ")" = [] | "(" c:NL ")" m:FL ")" = Table c m
   | "(" l:EL ")" = List l
F: "{" "}" = Lambda [] [] []
   | "[" c:NL "]" m:EL "]" = Lambda [] c m
   | "{" m:EL "}" = Lambda [] [] m
```

Після парсера, синтаксичне дерево розкладається по наступним складовим: AST для тензорів (визначення вищого рівня);

Value для машинних слів; Scalar для конструкцій мови (куди входить зокрема списки та словники, умовний оператор, присвоєння, визначення функції та її аплікація, UTF-8 літерал, та оператор передачі управління в потік планувальника який закріплений за певним ядром CPU).

```
data AST      = Atom (a: Scalar)
               | Vector (a: Vec AST)

data Value    = Nil
               | SymbolInt (a: u16)
               | SequenceInt (a: u16)
               | Number (a: i64)
               | Float (a: f64)
               | VecNumber (Vec i64)
               | VecFloat (Vec f64)

data Scalar   = Nil
               | Any
               | List (a: AST)
               | Dict (a: AST)
               | Call (a b: AST)
               | Assign (a b: AST)
               | Cond (a b c: AST)
               | Lambda (otree: Option NodeId) (a b: AST)
               | Yield (c: Context)
               | Value (v: Value)
               | Name (s: String)
```

3.1.4 Формальне середовище виконання

Формальне середовище виконання складається з інтерпретатора (нетитизованого λ -числення) та числення акторів (процесів, черг, таймерів). Інтерпретатор та операційна система включені в систему доведення теорем для уніфікації всіх сигнатур системи та формалізації самого інтерпретатора як системи виконання. Слід зазначити, що не завжди є змога зробити екстракт в O_{CPS} , тому об'єкти мовних категорій є *opaque*-типами.

$$O_{CPS} : O_{\lambda} \rightarrow O_{\pi} \rightarrow O_{\mu} \rightarrow U$$

Далі буде йтися тільки про формальні інтерпретатори, так як вони є найбільш компактними формами мов для верифікації (в порівнянні з моделями System F). Таким чином будемо розглядати формальне середовище виконання, як сукупність інтерпретатора та операційної системи.

В цьому розділі ми побудуємо надшвидку імплементацію інтерпретатора, яка цілком, разом зі своїми програмами, розміщується в кеш-пам'яті першого рівня процесору, та здатна до AVX векторизацій засобами мови Rust. Як промислова опція, підтримується також екстракт в байт-код інтерпретатора BEAM віртуальної машини Erlang.

3.1.5 Категорія середовища виконання O_{CPS}

Визначення 26. (Категорія середовища виконання O_{CPS}).

$$O_{CPS} = \begin{cases} Ob : \{ \text{maybe CPS} \} \\ Hom : \{ eval : Ob \rightarrow Ob \} \end{cases}$$

Синтаксис середовища виконання може містити наступні синтаксиси: O_λ , O_π , O_μ .

Визначення 27. (Синтаксис мовної категорії O_{CPS}).

```
data CPS = church ( _ : lambda CPS)
          | milner ( _ : pi      CPS)
          | tensor ( _ : mu      CPS)
```

Визначення 28. (Синтаксичне дерево O_λ). Інтерпретатор визначається своїм трьома конструкторами: номер змінної (індекс де Брейна), лямбда функція та її аплікація:

```
data church = var (x : nat)
             | lam (l : nat) (d : cps)
             | app (f a : cps)
```

Мовою інтерпретаторів є нетипизоване лямбда числення, однак в залежності від складності інтерпретатора це дерево може виглядати по-різному.

Визначення 29. (Синтаксичне дерево O_π). Правило формації, конструктора та елімінатора визначається синтаксичним деревом O_* :

```
data milner (lang : U)
  = process (protocol : lang)
  | spawn (cursors : lang) (core : nat) (program : lang)
  | snd (cursor : lang) (data : lang)
  | rcv (cursor : lang)
  | pub (size : nat)
  | sub (cursor : lang)
```

Кожна секція цієї глави буде присвячена цим мовним компонентам системи доведення теорем. В кінці розділу дається повна система, яка включає в себе усі мови та усі мовні перетворення.

3.2 Система числення процесів SMP async

3.2.1 Операційна система

Перелічимо основні властивості операційної системи (прототип якої опублікований на Github¹).

¹<https://github.com/voxo/kerne1>

3.2.2 Властивості

Автобалансована низьколатентна, неблокована, без копіювання, система черг з CAS-мультикурсорами, з пріоритетами задач та масштабованими таймерами.

3.2.2.1 Асиметрична багапроцесорність

Ядро системи використовує асиметричну багапроцесорність (АП) для планування машинного часу. Так у системі для консольного вводу-виводу та вебсокет моніторингу використовується окремий ректор (закріплений за ядром процесора), аби планування не впливало на програми на інших процесорах.

Це означає статичне закріплення певного атомарного процесу обчислення за певним реактором, та навіть можливо дати гарантію, що цей процес не перерветься при наступному кванті планування ніяким іншим процесом на цьому ядрі (ситуація єдиного процесу на реактор ядра процесору). Ядро системи постається разом з конфігураційною мовою для закріплення задач за реакторами:

```
reactor[aux;0;mod[console;network]];  
reactor[timercore;1;mod[timer]];  
reactor[core1;2;mod[task]];  
reactor[core2;3;mod[task]];
```

3.2.2.2 Низьколатентність

Усі реактори повинні намагатися обмежити IP-лічильник команд діапазоном розміром з L1/L2 кеш об'єм процесора, для унеможливлення колізій між ядрами на міжядерній шині можлива конфігурація, де реактори виконують код, області пам'яті якого не перетинаються, та обмежені об'ємом L1 кеш пам'яті що при наявній AVX векторизації дасть змогу повністю використовувати ресурси процесору наповну.

3.2.2.3 Мультикурсори

Серцем низьколатентної системи транспорту є система наперед виділений кільцевих буферів (які називаються секторами глобального кільця). У цій системі кілець діє система курсорів для запису та читання, ці курсори можуть мати різний напрямок руху. Для забезпечення імутабельності (нерухомості даних) та відсутності копіювання в подальшій роботі, дані залишаються в черзі, а рухаються та передаються лише курсори на типизовані послідовності даних.

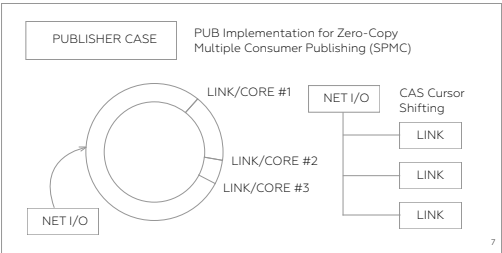


Рис. 3.1 : Кільцева статична черга з CAS-курсором для публікації

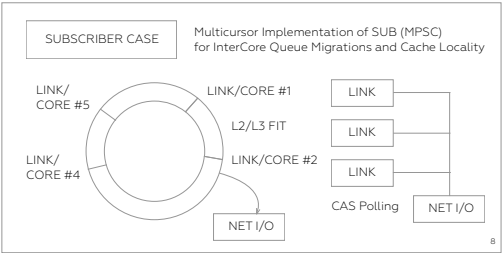


Рис. 3.2 : Кільцева статична черга з CAS-курсором для згортки

3.2.2.4 Реактори

Кожен процесор має три типи реакторів які можуть бути на ньому запущені: i) Task-реактор; ii) Timer-реактор; iii) ІО-цикли. Для Task-реактора існують черги пріоритетів, а для Timer-реактора — дерева інтервалів. Загальний спосіб комунікації для задач

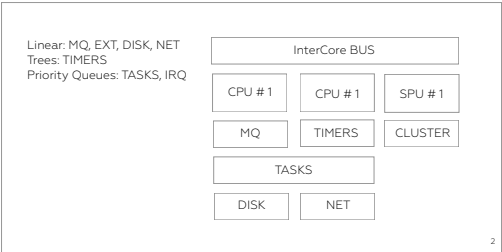


Рис. 3.3 : Система процесорних ядер та реакторів

виглядає як публікація у чергу (рух курсора запису) та підписка на черги і згортання (руху курсора читання). Кожна черга має як курсори для публікації так і курсори для читання. Можливо також використання міжреакторної шини InterCore та посилення службового повідомлення по цій шині на інший реактор. Так, наприклад, працюють таймери та старти процесів, які передають сигнал в реактор для перепланування. Можна створювати нові

повідомлення шини InterCore і систему фільтрів для згортання черги реактора для більш гнучкої обробки сигналів реального часу.

Task-реактор

Task-реактор або реактор задач виконує Rust задачі або програми інтерпретатора, які можуть бути двох видів: кінечні (які повертають результат виконання), або нескінченні (процеси).

Приклад бескінечної задачі — 0-процес, який запускається при старті системи. Цей процес завжди доступний по WebSocket каналу та з консолі терміналу.

IO-реактор

Мережевий сервер або IO-реактор може обслуговувати багато мережевих з'єднань та підтримує Windows, Linux, Mac смаки.

Timer-реактор

Різні типи сутностей планування (такі як Task, IO, Timer) мають різні дисципліни селекторів повідомлень для черг (послідовно, через само-балансуючі дерева, BTree дерева тощо).

3.2.2.5 Міжреакторний транспорт InterCore

Шина InterCore конструюється певним числом SPMS черг, виділених для певного ядра. Шина сама має топологію зірки між ядрами, та черга MPSC організована як функція над множиною паблішерів. Кожне ядро має рівно одного паблішера. Функція обробки шини протоколу InterCore називається `poll_bus` та є членом планувальника. Ви можете думати про InterCore як телепорт між процесорами, так як `pull_bus` викликається після кожної операції `Yield` в планувальник, і, таким чином, якщо певному ядру опублікували в його чергу повідомлення, то після наступного `Yield` на цьому ядрі буде виконана функція обробки цього повідомлення.

`pub` [capacity]

Створює новий CAS курсор для паблішінга, тобто для запису. Повертає глобальних машинний ідентифікатор, має єдиний параметр, розмір черги. Приклад: `p: pub[16]`.

`sub` [publisher]

Створює новий CAS курсор для читання певної черги, певного врайтера. Повертає глобальний машинний ідентифікатор для читання. Приклад: `s: sub[p]`.


```
spawn [ core ; program ; cursors ]
```

Створює нову програму задачу CPS-інтерпретатора для певного ядра. Задача може бути або програмою на мові Rust або будь якою програмою через FFI. Також при створенні задачі задається список курсорів, які ексклюзивно належатимуть до цієї задачі. Параметри функції: ядро, текст програми або назва FFI функції, список курсорів. Приклад: `spawn[0;"etc/proc0";(0;1)]`.

```
snd [ writer ; data ]
```

Посилає певні дані в певний курсор для запису. Повертає Nil якщо все ОК. Приклад: `snd[p;42]`.

```
rcv [ reader ]
```

Повертає прочитані дані з певного курсору. Якщо даних немає, то передає управління в планувальник за допомогою Yield. Приклад: `rcv[s]`.

3.2.3 Структури ядра

Ядро є системою акторів з двома основними типами акторів: чергами, які представляють кільцеві буфери та відрізки пам'яті; та задачами, які репрезентують байт-код програм та їх інтерпретацію на процесорі. Черги бувають двох видів: для публікації, які містять курсори для запису; та для читання, які містять курсори для читання. Задачі можна імплементувати як Rust програми, або як `OCPS` програми.

3.2.3.1 Черга для публікації

```
pub struct Publisher<T> {
    ring: Arc<RingBuffer<T>>,
    next: Cell<Sequence>,
    cursors: UncheckedUnsafeArc<Vec<Cursor>>,
}
```

3.2.3.2 Черга для читання

```
pub struct Subscriber<T> {
    ring: Arc<RingBuffer<T>>,
    token: usize,
    next: Cell<Sequence>,
    cursors: UncheckedUnsafeArc<Vec<Cursor>>,
}
```

Існує дві спеціальні задачі: InterCore задача, написана на Rust, яка запускається на всіх ядрах при запуску системи, а також CPS-інтерпретатор головного термінала системи, який запускається на BSP ядрі, поближче до Console та WebSocket IO селекторів. В процесі життя різні CPS та Rust задачі можуть бути запущені в такій системі, поєднуючи гнучкість програм інтерпретатора, та низькорівневих програм, написаних на мові Rust.

Окрім черг та задач, в системі присутні також таймери та інші IO задачі, такі як сервери мережі або сервери доступу до файлів. Також існують структури які репрезентують ядра та містять планувальники. Уся віртуальна машина є сукупністю таких структур-ядер.

3.2.3.3 Канал

Канал складається з одного курсору для запису та багатьох курсорів для читання. Канал предствляє собою компонент зірки шини InterCore.

```
pub struct Channel {
    publisher: Publisher<Message>,
    subscribers: Vec<Subscriber<Message>>,
}
```

3.2.3.4 Черги ядра

Память репрезентує усі наявні черги для публікації та читання на ядрі. Ця інформація передається клонованою кожній задачі планувальника на цьому ядрі.

```
pub struct Memory<'a> {
    publishers: Vec<Publisher<Value<'a>>>,
    subscribers: Vec<Subscriber<Value<'a>>>>,
}
```

3.2.3.5 Планувальник

Планувальник репрезентує ядра процесара, які розрізняються як BSP-ядра (або 0-ядра, bootstrap) та AP ядра (інші ядра > 0, application). BSP ядро тримає на собі Console та WebSocket IO селектори. Це означає, що BSP ядро дає свій час на обробку зовнішньої інформації, у той час як AP процесори не обтяжені таким навантаженням (іо черга в таких планувальниках пуста). Існує InterCore повідомлення яке додає або видаляє довільні IO селектори в планувальних для довільних конфігурацій.

```
pub struct Scheduler<'a> {
    pub tasks: Vec<T3<Job<'a>>>>,
    pub bus: Channel,
    pub queues: Memory<'a>,
}
```

```
pub io: IO,
}
```

3.2.4 Протокол InterCore

Протокол шини InterCore.

```
pub enum Message {
    Pub(Pub),
    Sub(Sub),
    Print(String),
    Spawn(Spawn),
    AckSub(AckSub),
    AckPub(AckPub),
    AckSpawn(AckSpawn),
    Exec(usize, String),
    Select(String, u16),
    QoS(u8, u8, u8),
    Halt,
    Nop,
}
```

3.3 Система числення тензорів AVX

3.4 Висновки

Як апогей, система HTS є фінальною категорією, куди сходять-ся всі стрілки категорії мов. Кожна мова та її категорія мають певний набір стрілок ендоморфізмів, які обчислюють, верифікують, нормалізують, оптимізують програми своїх мов. Стрілки виду $e_i : O_{n+1} \rightarrow O_n$ є екстракторами, які понижають систему типів, при чому $O_{CPS} = O_0$.

Базова бібліотека мови Ерланг у яку проводиться основний екстракт, поставляється з дистрибутивом Erlang/OTP. Базова бібліотека O_{PTS} наведена в репозиторії Github². Гомотопічна базова бібліотека відповідає термінальній мові O_{CSNM} , та теж відкрита на Github³. Останні два розділи присвячені математично-му моделюванню математики на цій мові.

²<https://github.com/groupoid/om>

³<https://github.com/groupoid/cubical>

Бібліотека середовища виконання

Присвячується автору
формальної системи F

Жану-Іву Жирану

Після побудови в розділі 3 формального середовища виконання, яке складається з операційної системи у якій виконуються CPS-інтерпретатори з формальною системою вводу-виводу IO, можна зразу переходити до базової бібліотеки середовища виконання.

Даний розділ формалізує інтерфейс прикладного програмування та систему бібліотек часу виконання для забезпечення потреб побудови гетерогенних систем та сервісів.

Вступне слово

Так чи інакше для дослідження будь-якої базової бібліотеки середовища виконання доведеться зустрітися з теорією яка стоїть за System F. Навіть базова бібліотека фундаментальної вищої мови PTS в сутності потребує для свого кодування лише системи Ф, так як є безпосереднім портом з мови Haskell. Тому доречно використовувати у якості проміжної типової системи систему Ф Жирану як цільову систему для екстрактів з вищих мов, таких як HTS (якщо такі екстракти існують для окремих програм).

4.1 Загальні принципи

N2O.TECH — це формальна філософія та інженерна вправа водночас. Вона обмежує автора бути ефективним та точним не втрачаючи при цьому повноти та функціональності. Це нахшталт внутрішньої дисципліни при проектуванні програмного забезпечення. Ця філософія багато років застосовується на практиці для

побудови систем SYNRC, та визначає стандартний мінімальний набір для демонстрації однієї з сучасних моделей реактивного веб-програмування, яка включає: веб-сокет веб-фреймворк з бінарною серілізацією, пушами та контролем DOM елементів зі сторони сервера. N2O.TECH вчить будувати прості та надійні системи на будь-якій мові програмування.

4.2 Формальна специфікація

Формальне середовище виконання визначає структуру операційних середовищ (runtimes) як операційну систему лямбда-інтерпретаторів які працюють на паралельному обчислювальному середовищі (ядрах процесорів). Кожне з ядер процесорів виконує в нескінченному циклі команди лямбда-інтерпретаторів, переключаючи через певний проміжок часу на потік команд іншого інтерпретатора. Таке визначення дає змогу вбудувати цю структуру у віртуальну машину Erlang: 1) Головний процес додатку; 2) Супервізор додатку; 3) Проміжні супервізори; 4) Кінцеві пул процесорів повідомлень.

Тут визначена специфікація програмного забезпечення усіх рівнів прикладної моделі для підприємств на функціональних мовах програмування. Ця специфікація визначає правила побудови WebSocket сервера, бінарного серіалізатора та веб-фреймворку визначеному формальними протоколами. Промислові версії також підтримують систему управління бізнес-процесами та ефективне сховище з глобальним простором ключів.

4.2.1 Серверні та клієнтські мови

Мови програмування розділені на чотири рівня як для клієнтської (мобільної та веб розробки) так і для серверної розробки (бекенд системи). Нульовий рівень — тотальні формальні алгебраїчні мови програмування, що забезпечують повноту, функціональність та доведення властивостей програм згідно сучасних уявлень про математичне моделювання та системи залежних типів побудованих на розшаруваннях. Перший рівень — формальні функціональні мови програмування, як правило System F, System F λ які успішно використовуються в промисловості та забезпечують достатньо формальний запис який піддається масштабуванню у великих командах завдяки потужному ядру компіляторів. Другий рівень — неформальні (без формальної операційної чи денотаційної семантики) чи формальних верифікаторів, які проте успішно використовуються в промисловості, можуть бути як з розвиненими системами типів з узагальненими шаблонами та типами сумами, так і однотипними мовами програмування з динамічною типізацією. Третій рівень — мови які

погано піддаються масштабуванню у промисловому виробництві (на основі спостережень за власним досвідом).

Таблиця 4.1: Перелік кваліфікаційних рівнів верифікації

| Сторона/Рівень | Приклади мов |
|----------------|--------------------------------------|
| клієнт/3 | JavaScript, Lua |
| клієнт/2 | Swift, Kotlin, TypeScript |
| клієнт/1 | UrWeb, OCaml, PureScript |
| клієнт/0 | Kind, PTS |
| сервер/3 | PHP, Python, Perl, Ruby |
| сервер/2 | Erlang, Elixir |
| сервер/1 | SML, Scala, Haskell, F, Rust, Hamler |
| сервер/0 | Coq, Agda, Lean, MLTT/HTS |

4.2.2 Обрані мови реалізації

Тут перелічені мови, на яких реалізовано та апробовано N2O.TECH.

Standard ML¹. В академічних цілях Марат Хафізов створив за специфікаєю N2O/NITRO порт на мови Standard ML (SML/NJ та MLton). Ця робота представлена Github організацією O1 в структурі N2O.

Haskell². Перший експеримент з формалізації N2O в систему F була робота Андрія Мельникова. Пізніше, більш повну версію з NITRO протокол запропонував Марат Хафізов, ця версія представлена на Github як організація O3.

F³. Також у якості вправи Siegmentation Fault зробив порт NITRO на мову F разом з ETF кодуванням. Ці напрацювання представлені в Github організації O61.

Lean⁴. У якості більшо формальної платформи з залежними типами, мова Lean 4 від Леонардо де Мура з Microsoft. Siegmentation Fault автор порта, який представлений Github організацією O89 та сайтом lean4.dev.

Erlang⁵. Основна промислова платформа, яка в повній мірі реалізує специфікацію N2O.TECH.

Elixir⁶. Адаптація N2O.TECH для мови Elixir. Основна імплементація не змінена, постійно підтримується публікація пакетів на HEX.PM.

¹<https://github.com/o1>

²<https://github.com/o3>

³<https://ws.erp.uno>

⁴<https://github.com/o89>

⁵<https://github.com/synrc>

⁶<https://github.com/synrc>

Hamler. Нова формальна платоформа на базі PureScript для віртуальної машини Erlang. В подальшому цей розділ буде присвячений імплементації та специфікації на мові Hamler (варіація PureScript з бекендом в Erlang Core).

Таблиця 4.2: Перелік мов для яких існує версія базової бібліотеки

| Мова/Платформа | Набір реалізованих компонент |
|----------------|---------------------------------|
| Erlang/OTP | N2O, BPE, KVS, NITRO, MAD, FORM |
| Elixir/OTP | N2O, BPE, KVS, NITRO, FORM |
| Hamler/OTP | RT, BASE, N2O, BPE, KVS, NITRO |
| Standard ML | N2O, NITRO, ETF |
| Haskell | N2O, NITRO, ETF |
| F# | N2O, NITRO, ETF |
| Lean 4 | N2O, NITRO, MAD, ETF |

Авторськими вважаються імплементації на мовах Erlang (Elixir) та Hamler (PureScript). Інші представлені імплементації вважаються сертифікованими формальними референсними моделями.

Протягом 8 років автор практикувався аби адаптувати бібліотеку середовища виконання до основних формальних або напівформальних мов System F, які принаймі написані на мовах які теж є мовами System F (SML, F, Haskell). Сторонніми дослідниками була навіть зроблена адаптація для Lean 4⁷. В процесі цієї багаторічної вправи стало зрозумілим, що досягти на виробництві тієї якості, яка досягається в середовищі виконання Erlang/OTP майже неможливо. Тому модель базової бібліотеки, спочатку адаптувалася з оригінальної мови Erlang (2013) для мови Elixir (2018), і потім для мови Hamler (2021), що є варіацією PureScript (System F_ω). Всього існує 7 моделей для 7 мов програмування базової бібліотеки представленої в цій роботі.

4.3 Пакети формального середовища

Тут представлена модель бібліотеки формального середовища виконання, яке складається з JIT-інтерпретатора, потужної SMP-системе акторів з неблокуючими курсорами черг повідомлень для системи процесів 1:1 (процес-черга, кожен процес має свою чергу). Така спрощена модель дещо відрізняється від моделі CSP, CCS та класичного числення процесів (Pi Calculus) проте протягом цих 8 років на практиці стало зрозумілим, що модель Erlang/OTP більш гнучка до масштабування та стійка до помилок.

⁷<https://lean4.dev>

Іншими словами модель в System F базової бібліотеки середовища виконання формально визначає цей прошарок уніфікованого мовного середовища. А модель процесів хоча формально не відображає семантику коіндукції (стерта інформація), проте досі синтаксис мовного середовища представленого в розділі 2 є сумісним з моделлю Erlang/OTP яка є основною платформою, що підтримується у виробництві.

4.3.1 Структури даних BASE

Структури даних представлені додатком BASE. Основні модулі додатку: List, Array, Atomics, Binary, Bool, Char, Counters, DateTime, Digraph, Enum, Eq, Float, Int, Map, Maybe, Ord, OrdDict, OrdSet, Pid, Queue, Read, Record, Regex, Set, Time, Tuple.

Сигнатури додатка BASE максимально сумісні з базовою бібліотекою Hamler.

4.3.2 Сервіси середовища виконання RT

Сервіси середовища виконання представлені додатком RT, іменні простори якого дещо відрізняються від відповідних сигнатур базової бібліотеки мови Hamler.

4.3.2.1 Database

Модулі простору Database: Mnesia, ETS.

```
module RT.ETS where
import RT.ETS.Types

all      : IO [TableId]
browse  : IO String
delete  : (k: U) -> TableId -> k -> IO ()
first   : TableId -> (k: U) -> IO (Maybe k)
last    : (k: U) -> TableId -> IO (Maybe k)
foldl   : (v acc: U) -> (v -> acc -> acc) -> acc -> TableId -> IO acc
foldr   : (v acc: U) -> (v -> acc -> acc) -> acc -> TableId -> IO acc
insert  : (v: U) -> TableId -> v -> IO Boolean
lookup  : (k v: U) -> TableId -> k -> IO (List v)
member  : (k: U) -> TableId -> k -> IO Boolean
new     : Atom -> TableOptions -> IO TableId
next    : (k: U) -> TableId -> k -> IO (Maybe k)
prev    : (k: U) -> TableId -> k -> IO (Maybe k)
rename  : TableId -> Atom -> IO Atom
take    : (k v: U) -> TableId -> k -> IO (List v)
match   : (a v: U) -> TableId -> a -> IO (List v)
slot    : (v: U) -> TableId -> Integer -> IO (Maybe (List v))
```

4.3.2.2 Filesystem

Модулі простору Filesystem: Dir, File, FilePath, IO, Active.

4.3.2.3 OS

Модулі простору OS: Env, Init, Shell.

4.3.2.4 Process

Модулі простору Process: Application, Supervisor, Dict, GenServer, Spawn, Process, Timer.

4.3.2.5 Network

Модулі простору Network: TCP, UDP, TLS, Inet, WebSocket.

4.3.3 Прикладні протоколи N2O

Сервіси веб-сокета сервера, представлені додатком N2O: N2O, PI, Proto, Ring, MQTT, WS, TCP, Heart, Syn, FTP, NITRO, ETF, GCM, Session, Cache.

Модуль N2O пропонує ряд сервісів зручних та вивірених в промисловій роботі для побудови сервісних протоколів що вбудовуються в цикли сучасних TCP, QUIC, UDP, MQTT, WebSocket серверів, та в процесі своєї роботи можуть стартувати додаткові процеси для обробки інформації під супервізією середовища виконання.

```
module N2O where
```

```

pickle : Binary -> Binary
depickle : Binary -> Binary
encode : (k: U) -> k -> Binary
decode : (k: U) -> Binary -> IO k
reg: (k: U) -> k -> IO k
unreg : (k: U) -> k -> IO k
send : (k v z: U) -> k -> v -> IO z
getSession : (k v: U) -> k -> IO v
putSession : (k v: U) -> k -> v -> IO v
getCache : (k v: U) -> Atom -> k -> IO v
putCache : (k v: U) -> Atom -> k -> v -> IO v
```

Тут залишено лише саме необхідне, але не настільки тривіальне аби бути іграшковим. Всі функції всієї сервісів можуть підмінятися в ході виконання. В сутності тут зібрані сервіси: 1) бінарної серіалізації Erlang Term Format (ETF), функції encode/decode; 2) функції симетричного шифрування AES-GCM/128 pickle/depickle; 3) функції Pub/Sub внутрішнього Erlang реєстра (syn/gproc/global, тощо); 4) функції роботи з персональними сесіями, які захищені зашифрованими токенами; 5) функції роботи з глобальним кеш-сервісом для бізнес-об'єктів.

Модуль N2O.PI абстрагує користувача від надмірного фольклору Supervisor та пропонує простіший протокол запуску асинхронних процесів.

```
module N2O.PI where
```

```

data PI = PI String Atom Atom Atom Integer RestartType
data Sup = Ok Pid String | Error String

start : PI -> IO Sup
```

4.3.4 Сховище даних KVS

Сервіси сховища даних представлені додатком KVS: KVS, Stream, ST, Rocks, Mnesia, FS.

```
module KVS where
import KVS.Types

get    : (f k v: U) -> f -> k -> IO (Maybe v)
put    : (r: U) -> r -> IO StoreResult
delete : (f k: U) -> f -> k -> StoreResult
index  : (f p v r: U) -> f -> Atom -> v -> List r

module KVS.Stream where
import ETF.Types

data Reader = Reader Integer Binary ETF String Integer
data Writer = Writer Integer Binary ETF String Integer
data StoreResult = Ok Integer String Binary
                 | Error Integer String Binary

next : Reader -> IO Reader
prev : Reader -> IO Reader
take : Reader -> IO Reader
drop : Reader -> IO Reader
save : Reader -> IO Reader
append : (f r: U) -> f -> r -> IO StoreResult
remove : (f r: U) -> f -> r -> IO StoreResult
```

4.3.5 Бізнес-процеси BPE

Сервіси системи управління бізнес-процесами представлені додатком BPE: BPE, Event, Action, Process, Hist, Flow.

```
module BPE where
import BPE.Types

data ProcId = String
data Proc = Proc ProcId String
data ProcRes = Ok Integer String Binary
             | Error Integer String Binary

start  : Proc -> IO Sup
stop   : String -> IO Sup
next   : ProcId -> IO ProcRes
amend  : (k: U) -> ProcId -> k -> IO ProcRes
discard : (k: U) -> ProcId -> k -> IO ProcRes
modify : (k: U) -> ProcId -> k -> Atom -> IO ProcRes
event  : ProcId -> String -> IO ProcRes
head   : ProcId -> IO Hist
hist   : ProcId -> IO (List Hist)
```

4.3.6 Контрольні елементи протоколу NITRO

Сервіси веб-фреймворка, представлені додатком NITRO: NITRO, Combo, Edit, Form, Input, Table, Actions, Render.

Система вищих мов

Присвячується автору MLTT

Перу Мартіну-Льофу

Четвертий розділ описує розвиток концептуальної моделі системи доведення теорем як сукупності: послідовності формальних мов програмування, кожна наступна з яких, складніша за попередню, має свою операційну семантику, та наслідуює усі властивості попередніх мов послідовності.

Вступне слово

Батьком всіх сучасних теорій типів, зокрема HoTT, в яких працюють сучасні формальні математики можна вважати Пера Мартіна-Льофа. В його теорії мова ділиться на типи, кожен з яких визначається 4 правилами: конструктори та деконструктори, та рівняння які визначають як відбуваються обчислення та гарантують унікальність. Таке кодування природнім чином відповідає кодуванню ізоморфізмів та відображає глибинну категорну семантику типових систем. Ця робота цілком відповідає моделі типів Мартіна-Льофа та показує те тільки конфігурацію конкретного спектра мов, але і визначає модель для опису цього спектру.

5.1 Чиста система типів PTS[∞]

IEEE¹ стандарт та регуляторні документи ESA² визначають інструменти та підходи до виробничого процесу верифікації та валідації. Найбільш розвинені та потужні засоби вимагають застосування математичних мов та нотацій. Ера верифікованої математики була започаткована верифікатором AUTOMATH [1] (де Брейн) розробленого під керівництвом де Брейна, а також розвиток теорії типів Мартіна-Льофа [2]. Сьогодні ми маємо Lean,

¹IEEE Std 1012-2016 — V&V Software verification and validation

²ESA PSS-05-10 1-1 1995 – Guide to software verification and validation

Coq, F*, Agda мови які використовують числення конструкцій, Calculus of Constructions [3] (CoC) та числення індуктивних типів (Calculus of Inductive Constructions [4] (CiC). Пізніше учень де Брейна, Хенк Барендрехт класифікував послаблені чисті системи типів по трьом осям та візуалізував це за допомогою лямбда-куба [5]. Чисті мови програмування вже були імплементовані раніше (Morte³ Габріеля Гонзалеза, Henk [6] Еріка Мейера). Чисті системи типів це системи з однім Π-типом (або ще і Σ як в ECC [7], Ore), з можливими розширеннями, такими як PTS[∞] зі зліченою кількістю всесвітів [8] (Сохацький), Cedile з self-типами [9] [10] (Стамп, Фу), система з K-правилами [11] (Барте).

Головна мотивація чистих систем – це простота аналізу ядра верифікатора, можливість застосування сильної нормалізації та довірена зовнішня верифікація та сертифікація завдяки простоті верифікатора (type checker), це означає, що алгоритм верифікації повинен бути настільки простим, аби можна було просто імплементувати його на будь-якій мові програмування. Приклади застосування тут можуть бути: 1) формальна мова блокчейн контрактів (Pluto⁴); 2) сертифіковані обчислення для інтерпретаторів; 3) платіжні системи.

5.1.1 Генерація сертифікованих програм

Згідно ізоморфізму Каррі-Говарда-Ламбека або інтерпретації Брауера-Гейтінга-Колмогорова існує взаємноозначна відповідність між доведеннями теорем (або пруфтермами) та лямбда-функціями в теорії типів Мартіна-Льофа [2]. Так як специфікація та доведення її відповідності для певної програми відбувається за допомогою мови з залежними типами, ми можемо екстрагувати цільову імплементацію (зі стертою інформацією про типи) сертифікованої програми в довільну мову програмування. У якості такої цільової мови підходять майже усі інтерпретатор безтипового лямбда-числення, такі як JavaScript, Erlang, PyPy, LuaJIT, K.

Більш розвинені практики та підходи до кодогенерації та екстрагування сертифікованих програм полягає у генерації C++ чи Rust програм, або програм для нижчих систем лямбда-куба, таких як System F або System F_ω. У цій роботі представлений екстракт в мову Erlang у якості цільового інтерпретатору.

PTS синтаксиси. Мінімальне ядро з однією аксіомою сприймає декілька лямбда-ситаксисів. Перший синтаксис сумісний з системою програмування morte⁵, та походить від неї. Інший син-

³Gabriel Gonzalez. Haskell Morte Library <https://github.com/Gabriel439/Haskell-Morte-Library>

⁴Rebecca Valentine. Formal Specification of the Plutus Core Language. 2017. <https://iohk.io/research/papers/#JT5XKNBP>

⁵<http://github.com/Gabriel439/Haskell-Morte-Library>

таксис сумісний з синтаксисом `cubical`⁶. Планувалося також підтримати синтаксис `caramel`⁷.

$$(5.1) \quad \begin{cases} \text{Sorts} = U.\{i\}, i : \text{Nat} \\ \text{Axioms} = U.\{i\} : U.\{\text{inc } i\} \\ \text{Rules} = U.\{i\} \rightsquigarrow U.\{j\} : U.\{\max i j\} \end{cases}$$

Мова програмування Ом – це мова з залежними типами, яка є розширенням числення конструкцій (Calculus of Constructions, CoC) Тері Кокана. Саме з числення конструкцій починається сучасна обчислювальна математика. В додаток до CoC, наша мова Ом має предикативну ієрархію індексованих всесвітів. В цій мові немає аксіоми рекурсії для безпосереднього визначення рекурсивних типів. Однак в цій мові вцілому, рекурсивні дерева та корекурсія може бути визначена, або як кажуть, закодована. Така система аксіом називається системою з однією аксіомою (або чистою системою), тому що в ній існує тільки Пі-тип, а для кожного типу в теорії типів Мартіна Льюфа існує п'ять конструкцій: формація, інтро, елімінатор, бета та ета правила.

Усі терми підчиняються системі аксіом **Axioms** всередині послідовності всесвітів **Sorts** та складність залежного терму відповідає максимальній складності домена та кодомена (правила **Rules**). Таким чином визначається простір всесвітів, та його конфігурація може бути записана згідно нотації Барендрехта для систем з чистими типами:

Проміжна мова чистої системи типів Ом базується на мові Henk [6], вперше описаній Еріком Мейером та Саймоном Пейтоном Джонсом в 1997 році. Пізніше Габріель Гонзалез імплементував на мові Haskell верифікатор з посиланням на Henk, та використовував кодування Бома для нерекурсивного кодування рекурсивних індуктивних типів. Ця мова базується лише на Пі-типі, λ -функції, її елімінатора аплікації, β -редукції та η -експансії. Дизайн мови Ом нагадує дизайн мов Henk та Morte. Ця мова призначена бути максимально простою (повна імплементация займає 300 рядків), формально верифікованою, здатною продукувати сертифіковані програми та розповсюджувати їх за межі комп'ютера по мережах та недовірених каналах зв'язку, та компілювати (верифікувати та екстрагувати) на цільових платформах за допомогою тієї ж мови Ом, можливо імплементованої на іншій мові програмування та вбудованої в основну систему.

⁶<http://github.com/mortberg/cubicaltt>

⁷<https://github.com/MaiaVictor/caramel>

Таблиця 5.1 : Перелік мов, інтерпретаторів та платформ для ці-
льової компіляції

| Ціль | Джерело | Система типів | Застосування |
|------------|------------|---------------------------|------------------------------|
| CPS | ITS-F | $\pi+\lambda+\mu$ calculi | середовище виконання |
| BEAM | Hamler | System F | системна бібліотека N2O.TECH |
| BEAM | PTS | CoC [∞] | фундаментальна мова |
| BEAM | HTS | HoTT | гомотопічна система |
| JavaScript | PureScript | System F | дитячі розваги |
| JVM | Java | F-sub ⁸ | реліктова історія |
| JVM | Scala | System F _ω | маргінальна промисловість |
| CLR | F# | System F _ω | маргінальна промисловість |
| GHC | Haskell | System F _ω | avoid success at all costs |
| GHC | Morte | CoC | фундаментальна мова Кокана |
| JavaScript | Kind | Self-Types + IntNet | сучасна фундаментальна мова |
| GHC,OCaml | Coq | CiC | промисловий прuver |

5.1.2 Синтаксис

Синтаксис PTS сумісний з численням конструкцій (CoC) Тері Ко-
кана, та такими мовами як Morte та Henk. Однак в системі PTS
присутній індекс для всесвітів який представлений натуральни-
ми числами. Тут наведений синтаксис у BNF нотації

```
I := #list #nat
U := * + * . #nat
0 := U + I + ( 0 ) + 0 0 + 0 → 0
    + λ ( I : 0 ) → 0
    + ∀ ( I : 0 ) → 0
```

Тут + — сума виразів, '' — конкатенація терміналів без пробі-
лу, := — оператор визначення BNF-правила, #empty, #nat, #list
— вбудовані типи BNF-нотації — синтаксичні елементи BNF но-
тації, а *,., →, (,), λ, ∀ — термінали або синтаксичні елементи мови
програмування. Еквівалентне визначення як ініціальний об'єкт
категорій O_{PTS} або O_Π який може вмістити цей синтаксис містить
всі правила виводу внутрішньої мови категорії.

```
data pts (lang: U)
= star          (n: nat)
| var    (x: name) (l: nat)
| pi     (x: name) (l: nat) (d c: lang)
| remote (n: name) (n: nat)
| lambda (x: name) (l: nat) (d c: lang)
| app                (f a: lang)
```

Всесвіти

Мова PTS[∞] – це лямбда числення з залежними типами вищого порядку, розширення числення конструкцій Кокана, або системи P_ω Барендрехта, з предикативною (імпредикативною) ієрархією індексованих всесвітів. Це розширення мотивоване консистентністю [12] в залежній теорії типів та неможливістю кодування парадоксів Жирара-Хуркенса-Рассела⁹. Також для забезпечення консистентності в мові PTS відсутня аксіома `Fixpoint`, хоча за допомогою рекурсивного трактування конструктора `remote`, така можливість зберігається.

$$U_0 : U_1 : U_2 : U_3 : \dots$$

Де U_0 – імпредикативний всесвіт, U_1 – перший предикативний всесвіт, U_2 – другий предикативний всесвіт, U_3 – третій предикативний всесвіт і т.д.

(S)

$$\frac{o : \text{Nat}}{U_o}$$

Предикативні всесвіти

Всі терми підпорядковуються системі аксіом A для послідовності всесвітів S. Складність R залежності термів дорівнює максимальній складності термів з яких складається формула (або вираз мови). Система всесвітів описується згідно SAR-нотації Барендрехта. Зауважте, що предикативні всесвіти несумісні в Бом кодуванням, але ви можете переключати предикативність.

(A₁)

$$\frac{i : \text{Nat}, j : \text{Nat}, i < j}{U_i : U_j}$$

(R₁)

$$\frac{i : \text{Nat}, j : \text{Nat}}{U_i \rightarrow U_j : U_{\max(i,j)}}$$

Імпредикативні всесвіти

Стягуваний імпредикативний простір внизу ієрархії є єдиним можливим розширенням предикативної ієрархії для того аби вона залишалась консистентною. Однак в чистій системі типів PTS підтримується ієрархія бескінечних імпредикативних всесвітів.

(A₂)

$$\frac{i : \text{Nat}}{U_i : U_{i+1}}$$

(R₂)

$$\frac{i : \text{Nat}, j : \text{Nat}}{U_i \rightarrow U_j : U_j}$$

⁹Так званий парадокс голяра який виникає в системах $U : U$

Контексти

Контексти моделюються словником з іменами змінних в верифікаторі. Він може бути типизований як `list Sigma`. Правило елімінації тут не дається, після використання функції верифікації, словник вивільняється з пам'яті.

$$\frac{}{\Gamma : \text{Ctx}} \quad (\text{Ctx-formation})$$

$$\frac{\Gamma : \text{Ctx}}{\emptyset : \Gamma} \quad (\text{Ctx-intro}_1)$$

$$\frac{A : \mathbb{U}_i, \quad x : A, \quad \Gamma : \text{Ctx}}{(x : A) \vdash \Gamma : \text{Ctx}} \quad (\text{Ctx-intro}_2)$$

5.1.3 Операційна семантика

Операційна семантика — це правила обчислення, або β -, η -правила фьюжену інтро-правила та елімінаторів. для визначення яких необхідно визначити: 1) інтро-правила, їх тип (правило формації), та клас (тип правила формації); 2) правило елімінації та залежної елімінації (індукції). Таким чином будемо вважати, що операційна семантика системи типів OPTS буде складатися з 5 правил: формації, інтро-правило, залежний елімінатор (індукція), β -редукція або правило обчислення, η -експансія або правило унікальності.

$$\frac{A : \mathbb{U}_i, \quad x : A \vdash B : \mathbb{U}_j}{\Pi (x : A) \rightarrow B : \mathbb{U}_{p(i,j)}} \quad (\Pi\text{-formation})$$

$$\frac{x : A \vdash b : B}{\lambda (x : A) \rightarrow b : \Pi (x : A) \rightarrow B} \quad (\lambda\text{-intro})$$

$$\frac{f : (\Pi (x : A) \rightarrow B) \quad a : A}{f a : B [a/x]} \quad (\text{App-elimination})$$

$$\frac{x : A \vdash b : B \quad a : A}{(\lambda (x : A) \rightarrow b) a = b [a/x] : B [a/x]} \quad (\beta\text{-computation})$$

$$\frac{\pi_1 : A \quad u : A \vdash \pi_2 : B}{[\pi_1 / u] \pi_2 : B} \quad (\text{subst})$$

Перелік теорем (специфікації) для чистої системи типів можуть бути прямо вбудовані в теорію типів, таким чином ми отримуємо логічний фреймворк для перевірки імплементації залежної теорії.

```
PTS (A : U) : U
= (Pi_Former : (A -> U) -> U)
* (Pi_Intro : (B : A -> U) -> ((a : A) -> B a) -> (Pi A B))
* (Pi_Elim : (B : A -> U) (a : A) -> (Pi A B) -> B a)
```

```

* (Pi_Comp1: (B: A -> U) (a : A) (f: Pi A B) ->
  Equ (B a) (Pi_Elim B a (Pi_Intro B f)) (f a))
* ((B: A -> U) (a: A) (f: Pi A B) ->
  Equ (Pi A B) f (\(x:A) -> f x))

```

Доведення цих теорем дано в модулі базової бібліотеки розділу 3. Також можна повитися на інші доведення [5]. Рівняння обчислювальної семантики (бета та ета правила) визначаються за допомогою Path-типів, які визначаються $O_{=}$ або O_I мовним синтаксисом.

Ці рівняння обчислювальної семантики представлені тут як Path-тип в вищій мові. В чисту систему типів PTS (з бескінечною кількістю всесвітів) для завантаження файлів з локального довіреного сховища додається `remote` конструктор в синтаксичне дерево. Рекурсія по цьому конструктору заборонена.

Індекси де Брейна діють локально в межах одного імені. При додаванні існуючого імені в контекст збільшується індекс цього імені. Таким чином PTS верифікатор чистої системи типів відрізняється від канонічного приклада алгоритма верифікації CoC [3]. Він включає наступні функції мовної категорії: підстановка, зсув імені, нормалізація термів, рівність за визначенням та верифікація.

Перевірка типів

Для перевірки типів застосовується наступний алгоритм верифікації, який є основою усіх залежних систем. В чистих системах потрібно бути обережним з `remote` конструктором. Він використовується для завантаження типів з локального довіреного сховища. При дозволі рекурсії по `remote` конструктору можливо реалізувати self-типи [10] [9].

```

type (:star,N)      D → (:star,N+1)
(:var,N,I)          D → :true = proplists:is_defined N B, om:keyget N D I
(:remote,N)         D → om:cache (type N D)
(:pi,N,0,I,0)       D → (:star,h(star(type I D)),star(type 0 [(N,norm I)|D]))
(:fn,N,0,I,0)       D → let star (type I D), NI = norm I
                      in (:pi,N,0,NI,type(0,[(N,NI)|D]))
(:app,F,A)          D → let T = type(F,D),
                      (:pi,N,0,I,0) = T, :true = eq I (type A D)
                      in norm (subst 0 N A)

```

Індекси де Брейна

Зсув переіменовує змінну N в контексті P, тобто додає одиницю для лічильника цієї змінної.

```

sh (:star,X)        N P → (:star,X)
(:var,N,I)          N P → (:var,N,I+1) when I >= P
                      → (:var,N,I)

```

```

(:remote,X)    N P → (:remote,X)
(:pi,N,0,I,0) N P → (:pi,N,0,sh I N P,sh 0 N P+1)
(:fn,N,0,I,0) N P → (:fn,N,0,sh I N P,sh 0 N P+1)
(:app,L,R)     N P → (:app,L,R)

```

Підстановка, нормалізація, рівність

Підстановка заміняє змінну у виразі на певний терм.

```

sub (:star,X)      N V L → (:star,X)
(:var,N,L)        N V L → V
(:var,N,I)        N V L → (:var,N,I-1) when I > L
(:remote,X)       N V L → (:remote,X)
(:pi,N,0,I,0)     N V L → (:pi,N,0,sub I N V L,sub 0 N (sh V N 0) L+1)
(:pi,F,X,I,0)     N V L → (:pi,F,X,sub I N V L,sub 0 N (sh V F 0) L)
(:fn,N,0,I,0)     N V L → (:fn,N,0,sub I N V L,sub 0 N (sh V N 0) L+1)
(:fn,F,X,I,0)     N V L → (:fn,F,X,sub I N V L,sub 0 N (sh V F 0) L)
(:app,F,A)        N V L → (:app,sub F N V L,sub A N V L)

```

Нормалізація виконує підстановку при аплікаціях до функцій (бета-редукція) за допомогою рекурсивного спуску по конструкторам синтаксичного дерева.

```

norm (:star,X)      → (:star,X)
(:var,X)            → (:var,X)
(:remote,N)         → cache (norm N [])
(:pi,N,0,I,0)       → (:pi,N,0,norm I,norm 0)
(:fn,N,0,I,0)       → (:fn,N,0,norm I,norm 0)
(:app,F,A)          → case norm F of
                        (:fn,N,0,I,0) → norm (subst 0 N A)
                        NF → (:app,NF,norm A) end

```

Рівність за визначенням перевіряє рівність Erlang термів.

```

eq (:star,N)        (:star,N)      → true
(:var,N,I)          (:var,(N,I))    → true
(:remote,N)         (:remote,N)     → true
(:pi,N1,0,I1,01)   (:pi,N2,0,I2,02) →
  let :true = eq I1 I2
  in eq 01 (subst (shift 02 N1 0) N2 (:var,N1,0) 0)
(:fn,N1,0,I1,01)   (:fn,N2,0,I2,02) →
  let :true = eq I1 I2
  in eq 01 (subst (shift 02 N1 0) N2 (:var,N1,0) 0)
(:app,F1,A1)        (:app,F2,A2)    → let :true = eq F1 F2 in eq A1 A2
(A,B)               → (:error,(:eq,A,B))

```

5.1.4 Використання мови

Тут буде показано використання мови PTS.

```

$ ./om help me
[{:a,[expr],"to parse. Returns {_,_} or {error,_}.",
{:type,[term],"typechecks and returns type."},
{:erase,[term],"to untyped term. Returns {_,_}.",
{:norm,[term],"normalize term. Returns term's normal form."},
{:file,[name],"load file as binary."},

```

```

{str,[binary],"lexical tokenizer."},
{parse,[tokens],"parse given tokens into {_,_} term."},
{fst,[{x,y}],"returns first element of a pair."},
{snd,[{x,y}],"returns second element of a pair."},
{debug,[bool],"enable/disable debug output."},
{mode,[name],"select metaverse folder."},
{modes,[],"list all metaverses."}]

$ ./om print fst erase norm a "#List/Cons"
  \ Head
-> \ Tail
-> \ Cons
-> \ Nil
-> Cons Head (Tail Cons Nil)
ok

```

Обмеження

Обмеження: 1) неможливість визначити рекурсію та індукцію без фіксованої аксіоми; 2) кодування Бом повинно бути позитивно-рекурсивним; 3) неможливість побудови великого елімінатора, вивести тип з даних; 4) неефективність сім'ї лямбда кодувань вцілому (Парігот, Скотт, Бом).

Екстракти

Мова PTS_∞ передбачає автоматичну генерацію сертифікованих програм в цільові платформи. Сертифікація полягає у візуальному доведенню однієї стрілки ізоморфізму λ-функції в залежній теорії типів та λ-функції в нетипизованому лямбда численні.

```

ext (: var, X, N, F)      → (: var, X)
  (: app, A, B, N, F)    → (: call, N, ext (F, A, N), [ext (F, B, N)])
  (: fn, S, _, I, O, N, F) → (: fun, N, (: clauses, [{: clause, N,
                                                    [(: var, N, S)], [], [ext (F, O, N)]}]))
_ → []

```

Так працює функція екстракту в Erlang з системи типів PTS[∞]. Erlang-версія Ом повинна бути зручна для використання для віртуальних машин LING та BEAM. Оскільки цей екстракт генерує AST дерево Erlang (подібно до Elixir), результуючий код подається повністю на весь стек оптимізаційного компілятора Erlang. включаючи Erlang Core, тому весь модуль екстракта займає 30 рядків.

5.1.4.1 Інтерпретатори

З практичної точки зору мова Ом є способом використання залежних типів та специфікації, побудовані за їх допомоги на мові Erlang. Завдяки глибокій інтеграції з Erlang вдалося мінімувати імплементацію системи до 300 рядків. Екстракт в інтерпретатор


```

data ind (lang: U)
  = datum (n: name) (t: tele lang) (labels: list (label lang))
  | case (n: name) (t: lang) (branches: list (branch lang))
  | ctor (n: name) (args: list lang)

```

5.2.2 Поліноміальні функтори

Існує два види формальної рекурсії: 1) перша з найменшою нерухомою точкою (як $F_A(X) = 1 + A \times X$ або $F_A(X) = A + X \times X$), іншими словами рекурсія з базою (термінується 1 або A). Списки та дерева є прикладами таких рекурсивних структур з `nil` та `leaf` термінальними конструкторами (або рекурсивні суми). 2) друга з найбільшою нерухомою точкою, або рекурсія без бази (як $F_A(X) = A \times X$) — така рекурсія не термінована на рівні типів, та моделює нетерміновані послідовності, процеси тощо (або рекурсивні добутки). Кодування найменшою нерухомою точкою ще називається кодуванням добре-визначеними деревами або кодування поліноміальними функторами.

Натуральні числа: $\mu X \rightarrow 1 + X$

Списки елементів A: $\mu X \rightarrow 1 + A \times X$

Лямбда числення: $\mu X \rightarrow 1 + X \times X + X$

Потоки: $\nu X \rightarrow A \times X$

Потенційно нескінченний список елементів A: $\nu X \rightarrow 1 + A \times X$

Кінцеве дерево: $\mu X \rightarrow \mu Y \rightarrow 1 + X \times Y = \mu X = \text{List } X$

Для цих кодувань існує аналог кодування Чорча, який розповсюджує кодування чистими функціями з нетипизованого лямбда числення до Π -типу. Таке кодування називається кодуванням Боме-Беррардуччі, а просто кодування Боме. Воно дозволяє кодувати індуктивні типи даних Π -типами чистими функціями. Проте як було показано Жеверсом [13] неможливо побудувати принцип індукції в чистих системах без використання в явному чи прихованому вигляді `Fixpoint` аксіоми. Також неможливо побудувати J елімінатор `Id` типу закодованого в Бом кодуванні, а також елімінатори гомотопічних примітивів, наприклад елімінатори гомотопічного відрізка як `funExt`, `homotopy`.

5.2.3 Кодування Боме

Тип даних `List` над даним типом A, може бути представлений як ініціальні алгебра $(\mu L_A, \text{in})$ функтору $L_A(X) = 1 + (A \times X)$. Позначається $\mu L_A = \text{List}(A)$. Функції-конструктори `nil` : $1 \rightarrow \text{List}(A)$ та `cons` : $A \times \text{List}(A) \rightarrow \text{List}(A)$ визначені як `nil` = `in` \circ `inl` та `cons` = `in` \circ `inr`, таким чином `in` = `[nil, cons]`. Для кожних двох функцій `c` : $1 \rightarrow C$ та `h` : $A \times C \rightarrow C$, катаморфізм `f` = `[c, h]` : `List(A)` $\rightarrow C$ є

унікальним розв'язком системи рівнянь:

$$\begin{cases} f \circ \text{nil} = c \\ f \circ \text{cons} = h \circ (\text{id} \times f) \end{cases}$$

де $f = \text{foldr}(c, h)$. Маючи це, ініціальна алгебра представлена функтором $\mu(1 + A \times X)$ та сумою морфізмів $[1 \rightarrow \text{List}(A), A \times \text{List}(A) \rightarrow \text{List}(A)]$ як катаморфізму. Використовуючи це кодування, List-тип в базовій бібліотеці мови O_{PTS} буде мати наступну форму:

$$\begin{cases} \text{foldr} = \langle [f \circ \text{nil}, h] \rangle, f \circ \text{cons} = h \circ (\text{id} \times f) \\ \text{len} = \langle [\text{zero}, \lambda a n \rightarrow \text{succ } n] \rangle \\ (++) = \lambda xs \ ys \rightarrow \langle [\lambda (x) \rightarrow ys, \text{cons}] \rangle (xs) \\ \text{map} = \lambda f \rightarrow \langle [\text{nil}, \text{cons} \circ (f \times \text{id})] \rangle \end{cases}$$

```
data list (A : U) = cons (x : A) (cs : list A) | nil
```

$$\begin{cases} \text{list} = \lambda \text{ctor} \rightarrow \lambda \text{cons} \rightarrow \lambda \text{nil} \rightarrow \text{ctor} \\ \text{cons} = \lambda x \rightarrow \lambda xs \rightarrow \lambda \text{list} \rightarrow \lambda \text{cons} \rightarrow \lambda \text{nil} \rightarrow \text{cons } x \ (\text{xs } \text{list } \text{cons } \text{nil}) \\ \text{nil} = \lambda \text{list} \rightarrow \lambda \text{cons} \rightarrow \lambda \text{nil} \rightarrow \text{nil} \end{cases}$$

```
module list where
```

```
map (A B : U) (f : A -> B) : list A -> list B
length (A : U) : list A -> nat
append (A : U) : list A -> list A -> list A
foldl1 (A B : U) (f : B -> A -> B) (Z : B) : list A -> B
filter (A : U) (p : A -> bool) : list A -> list A
```

$$\begin{cases} \text{len} = \text{foldr } (\lambda x n \rightarrow \text{succ } n) 0 \\ (++) = \lambda ys \rightarrow \text{foldr } \text{cons } ys \\ \text{map} = \lambda f \rightarrow \text{foldr } (\lambda x xs \rightarrow \text{cons } (f x) xs) \text{nil} \\ \text{filter} = \lambda p \rightarrow \text{foldr } (\lambda x xs \rightarrow \text{if } p x \text{ then } \text{cons } x xs \text{ else } xs) \text{nil} \\ \text{foldl} = \lambda f v xs = \text{foldr } (\lambda xg \rightarrow (\lambda \rightarrow g (f a x))) \text{id } xs v \end{cases}$$

5.3 Гомотопічна система типів HTS

5.3.1 Синтаксис

```
sys := [ sides ]           side := (id=0)→exp+(id=1)→exp
form := form\ / f1+f1+f2   sides := #empty+cos+side
cos := side,side+side,cos  mod := module id whereimps dec
f1 := f1\ / f2            f2 := -f2+id+0+1
imp := import id          brs := #empty+cobrs
app := exp exp            tel := #empty+cotel
imps := #list imp         cotel := (exp:exp) tel
id := #list #nat          dec := #empty+codec
u2 := glue+unglue+Glue    u1 := fill+comp
ids := #list id           br := ids→exp+ids@ids→exp
```

```

codec := def dec
cobrs := | br brs
sum := #empty+id tel+id tel|sum+id tel<ids>sys
def := data id tel=sum+id tel:exp=exp+id tel:exp where def
exp := cotel*exp+cotel→exp+exp→exp+(exp)+id
      (exp,exp)+\cotele→exp+split cobrs+exp.1+exp.2+
      (ids)exp+exp@form+app+u2 exp exp sys+u1 exp sys

```

Тут термінали := (визначення), + (сума типів), #empty (пустий тип), #nat (тип натуральних чисел), #list (тип списків) — є частинами BNF мови. Термінали |, :, *, <, >, (,), =, \, /, -, →, 0, 1, @, [,], module, import, data, split, where, comp, fill, Glue, glue, unglue, .1, .2, а також термінал , є терміналами мови верифікатора гомотопічної системи типів. Ця мова включає в себе: індуктивні типи, вищі індуктивні типи, оператори склеювання для всесвітів та типів з відповідними елімінаторами. Усі ці концепції, та їх моделі більш формально та детально описані у наступному розділі 3.

Система не повинна бути обмежена мовами та синтаксисами, ми покажемо як приклад, підтримку гомотопічної мови з інтервалом [0,1] сумісної з cubical та з підтримкою індуктивних синтаксисів та кодувань попереднього рівня.

```

data alg
= zero
| one
| max (a b: alg)
| min (a b: alg)

data hts
= path (t a b: lang)
| plam (n: name) (a: alg) (b: lang)
| papp (f: name) (a: lang) (p: alg)
| comp_ (a b: lang)
| fill_ (a b c: lang)
| glue_ (a b c: lang)
| glue_elem (a b: lang)
| unglue_elem (a b: lang)

```

5.4 Висновки

Як апогей, система HTS є фінальною категорією, куди сходяться всі стрілки категорії мов. Кожна мова та її категорія мають певний набір стрілок ендоморфізмів, які обчислюють, верифікують, нормалізують, оптимізують програми своїх мов. Стрілки виду $e_i : O_{n+1} \rightarrow O_n$ є екстракторами, які понижають систему типів, при чому $O_{CPS} = O_0$.

Базова бібліотека мови Ерланг у яку проводиться основний естракт, поставляється з дистрибутивом Erlang/OTP. Базова біб-

ліотека `Orts` наведена в репозиторії Github¹⁰. Гомотопічна база-ва бібліотека відповідає термінальній мові `OSSNM`, та теж відкрита на Github¹¹. Останні два розділи присвячені математичному моделюванню математики на цій мові.

¹⁰<https://github.com/groupoid/om>

¹¹<https://github.com/groupoid/cubical>

Бібліотека вищих мов

Присвячується вчителям
американської школи
формальної філософії та
авторам HoTT

В третьому розділі дається опис гомотопічної мови програмування, реалізація якої вперше була представлена ССНМ в 2017 році, та для якої написана гомотопічна базова бібліотека представлена у цьому та наступному розділах.

Вступне слово

Опис гомотопічної мови дається у розрізі індуктивних типів, та показується, що вищі індуктивні типи з вищою рівністю є аналогом CW-комплексів, та розширюють гомотопічну теорію типів (без UIP) так само, як індуктивні типи є аналогом поліноміальних функторів та розширюють теорію типів Мартіна-Льофа. Усі ці чотири частини, а також секція Модальності складають основу гомотопічної мови програмування, та не містить складної математики (окрім опису інтерпретацій, які є матаметичними ізморізмами).

6.1 Інтерналізація теорії типів

Each language implementation needs to be checked. The one of possible test cases for type checkers is the direct embedding of type theory model into the language of type checker. As types in Martin-Löf Type Theory (MLTT) are formulated using 5 types of rules (formation, introduction, elimination, computation, uniqueness), we construct aliases for host language primitives and use type checker to prove that it is MLTT. This could be seen as ultimate test sample for type checker as intro-elimination fusion

Таблиця 6.1 : Interpretations correspond to mathematical theories

| Теорія типів | Logic | Category Theory | Homotopy Theory |
|---------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------|
| A type | class | object | space |
| isProp A | proposition | (-1)-truncated object | space |
| a:A program | proof | generalized element | point |
| $B(x)$ | predicate | indexed object | fibration |
| $b(x) : B(x)$ | conditional proof | indexed elements | section |
| \emptyset | \perp false | terminal object | empty space |
| 1 | \top true | initial object | singleton |
| $A + B$ | $A \vee B$ disjunction | coproduct | coproduct space |
| $A \times B$ | $A \wedge B$ conjunction | product | product space |
| $A \rightarrow B$ | $A \Rightarrow B$ | internal hom | function space |
| $\sum x : A, B(x)$ | $\exists_{x:A} B(x)$ | dependent sum | total space |
| $\prod x : A, B(x)$ | $\forall_{x:A} B(x)$ | dependent product | space of sections |
| Path_A | equivalence $=_A$ | path space object | path space A^I |
| quotient | equivalence class | quotient | quotient |
| W-type | induction | colimit | complex |
| type of types | universe | object classifier | universe |
| quantum circuit | proof net | string diagram | |

resides in beta-eta rules, so by proving them we prove properties of the host type checker.

Also this issue opens a series of articles dedicated to formalization in cubical type theory the foundations of mathematics. This issue is dedicated to MLTT modeling and its verification. Also as many may not be familiar with Π and Σ types, this issue presents different interpretation of MLTT types.

6.1.0.1 Теорія типів

MLTT could be reduced to Π , Σ , Path types, as W-types could be modeled through Σ and Fin/Nat/List/Maybe types could be modeled on W. In this issue Π , Σ , Path are given as a core MLTT and W-types are given as exercise. List, Nat, Fin types are defined in next section.

Any new type in MLTT presented with set of 5 rules: i) formation rules, the signature of type; ii) the set of constructors which produce the elements of formation rule signature; iii) the dependent eliminator or induction principle for this type; iv) the beta-equality or computational rule; v) the eta-equality or uniqueness principle. Π , Σ , and Path types will be given shortly. This interpretation or rather way of modeling is MLTT specific.

The most interesting are Id types. Id types were added in ¹1984

¹P. Martin-Löf, G. Sambin. Intuitionistic type theory. 1984.

while original MLTT was introduced in ²1972. Predicative Universe Hierarchy was added in ³1975. While original MLTT contains Id types that preserve uniqueness of identity proofs (UIP) or eta-rule of Id type, HoTT refutes UIP (eta rule doesn't hold) and introduces univalent heterogeneous Path equality (⁴ ∞ -Groupoid interpretation). Path types are essential to prove computation and uniqueness rules for all types (needed for building signature and terms), so we will be able to prove all the MLTT rules as a whole.

6.1.0.2 Інтерпретації

In contexts you can bind to variables (through de Bruijn indexes or string names): i) indexed universes; ii) built-in types; iii) user constructed types, and ask questions about type derivability, type checking and code extraction. This system defines the core type checker within its language.

By using this languages it is possible to encode different interpretations of type theory itself and its syntax by construction. Usually the issues will refer to following interpretations: i) type-theoretical; ii) categorical; iii) set-theoretical; iv) homotopical; v) fibrational or geometrical.

Логічна або теоретико-типова інтерпретація

According to type theoretical interpretation for any type should be provided 5 formal inference rules: i) formation; ii) introduction; iii) dependent elimination principle; iv) beta rule or computational rule; v) eta rule or uniqueness rule. The last one could be exceptional for Path types. The formal representation of all rules of MLTT are given according to type-theoretical interpretation as a final result in this Issue I. It was proven that classical Logic could be embedded into intuitionistic propositional logic (IPL) which is directly embedded into MLTT.

Logical and type-theoretical interpretations could be distinguished. Also set-theoretical interpretation is not presented in Table 1.

Категоріальна або топосо-теоритична інтерпретація

Categorical interpretation is a modeling through categories and functors. First category is defined as objects, morphisms and their properties, then we define functors, etc. In particular, as an example, according to categorical interpretation Π and Σ types of MLTT are presented as adjoint functors, and forms itself a locally closed cartesian category, which will be given a intermediate result

²P. Martin-Löf, G. Sambin. The Theory of Types. 1972.

³P. Martin-Löf. An intuitionistic theory of types: predicative part. 1975.

⁴M. Hofmann, T. Streicher. The groupoid interpretation of type theory. 1996.

in **Issue VII: Topos Theory**. In some sense we include here topos-theoretical interpretations, with presheaf model of type theory as example (in this case fibrations are constructed as functors, categorically).

Теоретико-типова інтерпретація

Set-theoretical interpretations could replace first-order logic, but could not allow higher equalities, as long as inductive types to be embedded directly. Set is modelled in type theory according to homotopical interpretation as n -type.

Гомотопічна інтерпретація

In classical MLTT uniqueness rule of Id type do holds strictly. In Homotopical interpretation of MLTT we need to allow a path space as Path type where uniqueness rule doesn't hold. Groupoid interpretation of Path equality that doesn't hold UIP generally was given in 1996 by Martin Hofmann and Thomas Streicher.

When objects are defined as fibrations, or dependent products, or indexed-objects this leads to fibrational semantics and geometric sheaf interpretation. Several definition of fiber bundles and trivial fiber bundle as direct isomorphisms of Π types is given here as theorem. As fibrations study in homotopical interpretation, geometric interpretation could be treated as homotopical.

6.1.1 Типи Π , Σ , Path

6.1.1.1 Π -тип

Π is a dependent product type, the generalization of functions. As a function it can serve the wide range of mathematical constructions as its domain and codomain, which are in general: objects, types, or spaces; and could have as its instance: sets, functions, polynomial functors, infinitesimals, ∞ -groupoids, topological ∞ -groupoid, CW-complexes, categories, languages, etc.

At this light there could be many interpretation of Π types from different areas of mathematics. We give here three: i) logical interpretation of Π as \forall quantifier from higher order logic that forms a ground of type theory; ii) geometric interpretation of Π as fiber bundle; iii) categorical interpretation of functions as functors.

Теоретико-типова інтерпретація

As a logical system dependent type theory could correspond to higher order logic. However here only type-theoretical model is given completely.

Визначення 30. (Π -Formation).

$$(\lambda x : A) \rightarrow B(x) =_{\text{def}} \prod_{x:A} B(x) : \mathcal{U}.$$

$$\text{Pi } (A : \mathcal{U}) (B : A \rightarrow \mathcal{U}) : \mathcal{U} = (\lambda x : A) \rightarrow B x$$

Визначення 31. (Π -Introduction).

$$\backslash (\lambda x : A) \rightarrow b(x) =_{\text{def}} \prod_{A:\mathcal{U}} \prod_{B:A \rightarrow \mathcal{U}} \prod_{b:\prod_{a:A} B(a)} \lambda x. b(x) : \prod_{y:A} B(y).$$

```

lambda (A B: U) (b: B): A -> B = \ (x: A) -> b
lam (A: U) (B: A -> U) (b: (a: A) -> B a): Pi A B = \ (x: A) -> b x

```

Визначення 32. (Π -Elimination).

$$f \text{ a} =_{\text{def}} \prod_{A:U} \prod_{B:A \rightarrow U} \prod_{a:A} \prod_{f:\prod_{x:A} B(x)} f(a) : B(a).$$

```

apply (A B: U) (f: A -> B) (a: A) : B = f a
app (A: U) (B: A -> U) (a: A) (f: Pi A B): B a = f a

```

Теорема 1. (Π -Computation).

$$f(a) =_{B(a)} (\lambda(x:A) \rightarrow f(x))(a).$$

```

Beta (A:U) (B:A->U) (a: A) (f: Pi A B)
  : Path (B a) (app A B a (lam A B f)) (f a)

```

Теорема 2. (Π -Uniqueness).

$$f =_{(x:A) \rightarrow B(x)} (\lambda(y:A) \rightarrow f(y)).$$

```

Eta (A:U) (B:A->U) (a:A) (f: Pi A B)
  : Path (Pi A B) f (\ (x:A) -> f x)

```

Категоріальна інтерпретація

The adjoints Π and Σ is not the only adjoints could be presented in type system. Axiomatic cohesions could contain a set of adjoint pairs as a core type checker operations.

Визначення 33. (Dependent Product). The dependent product along morphism $g : B \rightarrow A$ in category \mathcal{C} is the right adjoint $\Pi_g : \mathcal{C}_{/B} \rightarrow \mathcal{C}_{/A}$ of the base change functor.

Визначення 34. (Space of Sections). Let \mathbf{H} be a $(\infty, 1)$ -topos, and let $E \rightarrow B : \mathbf{H}_{/B}$ a bundle in \mathbf{H} , object in the slice topos. Then the space of sections $\Gamma_{\Sigma}(E)$ of this bundle is the Dependent Product:

$$\Gamma_{\Sigma}(E) = \Pi_{\Sigma}(E) \in \mathbf{H}.$$

Теорема 3. (HomSet). If codomain is set then space of sections is a set.

```

setFun (A B : U) ( _ : isSet B) : isSet (A -> B)

```

Теорема 4. (Contractability). If domain and codomain is contractible then the space of sections is contractible.

```

piIsContr (A: U) (B: A -> U) (u: isContr A)
  (q: (x: A) -> isContr (B x)) : isContr (Pi A B)

```

Визначення 35. (Section). A section of morphism $f : A \rightarrow B$ in some category is the morphism $g : B \rightarrow A$ such that $f \circ g : B \xrightarrow{g} A \xrightarrow{f} B$ equals the identity morphism on B .

Гомотопічна інтерпретація

Geometrically, Π type is a space of sections, while the dependent codomain is a space of fibrations. Lambda functions are sections or points in these spaces, while the function result is a fibration. Π type also represents the cartesian family of sets, generalizing the cartesian product of sets.

Визначення 36. (Fiber). The fiber of the map $p : E \rightarrow B$ in a point $y : B$ is all points $x : E$ such that $p(x) = y$.

Визначення 37. (Fiber Bundle). The fiber bundle $F \rightarrow E \xrightarrow{p} B$ on a total space E with fiber layer F and base B is a structure (F, E, p, B) where $p : E \rightarrow B$ is a surjective map with following property: for any point $y : B$ exists a neighborhood U_b for which a homeomorphism $f : p^{-1}(U_b) \rightarrow U_b \times F$ making the following diagram commute.

$$\begin{array}{ccc} p^{-1}(U_b) & \xrightarrow{f} & U_b \times F \\ p \downarrow & \swarrow \text{pr}_1 & \\ U_b & & \end{array}$$

Визначення 38. (Cartesian Product of Family over B). Is a set F of sections of the bundle with elimination map $\text{app} : F \times B \rightarrow E$ such that

$$(6.1) \quad F \times B \xrightarrow{\text{app}} E \xrightarrow{\text{pr}_1} B$$

pr_1 is a product projection, so pr_1, app are morphisms of slice category $\text{Set}_{/B}$. The universal mapping property of F : for all A and morphism $A \times B \rightarrow E$ in $\text{Set}_{/B}$ exists unique map $A \rightarrow F$ such that everything commute. So a category with all dependent products is necessarily a category with all pullbacks.

Визначення 39. (Trivial Fiber Bundle). When total space E is cartesian product $\Sigma(B, F)$ and $p = \text{pr}_1$ then such bundle is called trivial $(F, \Sigma(B, F), \text{pr}_1, B)$.

Теорема 5. (Functions Preserve Paths). For a function $f : (x : A) \rightarrow B(x)$ there is an $\text{ap}_f : x =_A y \rightarrow f(x) =_{B(x)} f(y)$. This is called application of f to path or congruence property (for non-dependent case — `cong` function). This property behaves functorially as if paths are groupoid morphisms and types are objects.

Теорема 6. (Trivial Fiber equals Family of Sets). Inverse image (fiber) of fiber bundle $(F, B * F, \text{pr}_1, B)$ in point $y : B$ equals $F(y)$.

```
FiberPi (B : U) (F : B -> U) (y : B)
  : Path U (fiber (Sigma B F) B (pr1 B F) y) (F y)
```

Теорема 7. (Homotopy Equivalence). If fiber space is set for all base, and there are two functions $f, g : (x : A) \rightarrow B(x)$ and two homotopies between them, then these homotopies are equal.

```
setPi (A : U) (B : A -> U) (h : (x : A) -> isSet (B x)) (f g : Pi A B)
  (p q : Path (Pi A B) f g) : Path (Path (Pi A B) f g) p q
```

Note that we will not be able to prove this theorem until **Issue III: Homotopy Type Theory** because bi-invertible iso type will be announced there.

6.1.1.2 Σ -тип

Σ is a dependent sum type, the generalization of products. Σ type is a total space of fibration. Element of total space is formed as a pair of basepoint and fibration.

6.1.1.3 Теоретико-типов інтерпретація

Визначення 40. (Σ -Formation).

```
Sigma (A : U) (B : A -> U) : U = (x : A) * B x
```

Визначення 41. (Σ -Introduction).

```
dpair (A : U) (B : A -> U) (a : A) (b : B a) : Sigma A B = (a, b)
```

Визначення 42. (Σ -Elimination).

```
pr1 (A : U) (B : A -> U)
  (x : Sigma A B) : A = x.1
```

```
pr2 (A : U) (B : A -> U)
  (x : Sigma A B) : B (pr1 A B x) = x.2
```

```
sigInd (A : U) (B : A -> U) (C : Sigma A B -> U)
  (g : (a : A) (b : B a) -> C (a, b))
  (p : Sigma A B) : C p = g p.1 p.2
```

Теорема 8. (Σ -Computation).

```
Beta1 (A : U) (B : A -> U)
  (a : A) (b : B a)
  : Equ A a (pr1 A B (a, b))
```

```
Beta2 (A : U) (B : A -> U)
  (a : A) (b : B a)
  : Equ (B a) b (pr2 A B (a, b))
```

Теорема 9. (Σ -Uniqueness).

```
Eta2 (A : U) (B : A -> U) (p : Sigma A B)
  : Equ (Sigma A B) p (pr1 A B p, pr2 A B p)
```

6.1.1.4 Категоріальна інтерпретація

Визначення 43. (Dependent Sum). The dependent sum along the morphism $f : A \rightarrow B$ in category \mathcal{C} is the left adjoint $\Sigma_f : \mathcal{C}_{/A} \rightarrow \mathcal{C}_{/B}$ of the base change functor.

6.1.1.5 Теоретико-множинна інтерпретація

Теорема 10. (Axiom of Choice). If for all $x : A$ there is $y : B$ such that $R(x, y)$, then there is a function $f : A \rightarrow B$ such that for all $x : A$ there is a witness of $R(x, f(x))$.

```
ac (A B: U) (R: A -> B -> U)
  : (p: (x:A) -> (y:B)*(R x y)) -> (f:A->B) * ((x:A)->R(x)(f x))
```

Теорема 11. (Total). If fiber over base implies another fiber over the same base then we can construct total space of section over that base with another fiber.

```
total (A:U) (B C: A -> U)
  (f: (x:A) -> B x -> C x) (w: Sigma A B)
  : Sigma A C = (w.1, f (w.1) (w.2))
```

Теорема 12. (Σ -Contractability). If the fiber is set then the Σ is set.

```
setSig (A:U) (B: A -> U) (sA: isSet A)
  (sB: (x:A) -> isSet (B x)) : isSet (Sigma A B)
```

Теорема 13. (Path Between Sigmas). Path between two sigmas $t, u : \Sigma(A, B)$ could be decomposed to sigma of two paths $p : t_1 =_A u_1$ and $(t_2 =_{B(p @ i)} u_2)$.

```
pathSig (A:U) (B: A -> U) (t u: Sigma A B)
  : Path U (Path (Sigma A B) t u)
  ((p: Path A t.1 u.1) * PathP (<i>B(p @ i)) t.2 u.2)
```

6.1.1.6 Path-тип

The Path identity type defines a Path space with elements and values. Elements of that space are functions from interval $[0, 1]$ to a values of that path space. This ctt file reflects ⁵CCHM cubicaltt model with connections. For ⁶ABCFHL yacctt model with variables

⁵Cyril Cohen, Thierry Coquand, Simon Huber, Anders Mörtberg. Cubical Type Theory: a constructive interpretation of the univalence axiom. 2015. <https://5ht.co/cubicaltt.pdf>

⁶Carlo Angiuli, Brunerie, Coquand, Kuen-Bang Hou (Favonia), Robert Harper, Dan Licata. Cartesian Cubical Type Theory. 2017. <https://5ht.co/cctt.pdf>

please refer to ytt file. You may also want to read⁷BCH,⁸AFH. There is a⁹PO paper about CCHM axiomatic in a topos.

6.1.1.7 Кубічна інтерпретація

Визначення 44. (Path Formation).

```
Hetero (A B : U) (a : A) (b : B) (P : Path U A B) : U = PathP P a b
Path (A : U) (a b : A) : U = PathP (<i>A) a b
```

Визначення 45. (Path Reflexivity). Returns an element of reflexivity path space for a given value of the type. The inhabitant of that path space is the lambda on the homotopy interval $[0, 1]$ that returns a constant value a . Written in syntax as $\langle i \rangle a$ which equals to $\lambda (i : I) \rightarrow a$.

```
refl (A : U) (a : A) : Path A a a
```

Визначення 46. (Path Application). You can apply face to path.

```
app1 (A : U) (a b : A) (p : Path A a b) : A = p @ 0
app2 (A : U) (a b : A) (p : Path A a b) : A = p @ 1
```

Визначення 47. (Path Composition). Composition operation allows to build a new path by given to paths in a connected point.

$$\begin{array}{ccc}
 & a & \xrightarrow{\text{comp}} c \\
 \lambda(i : I) \rightarrow a \uparrow & & \uparrow q \\
 a & \xrightarrow{p @ i} & b
 \end{array}$$

```
composition (A : U) (a b c : A) (p : Path A a b) (q : Path A b c)
  : Path A a c = comp (<i>Path A a (q @ i)) p []
```

Теорема 14. (Path Inversion).

```
inv (A : U) (a b : A) (p : Path A a b) : Path A b a = <i>p @ -i
```

Визначення 48. (Connections). Connections allows you to build square with given only one element of path: i) $\lambda (i, j : I) \rightarrow p @ \min(i, j)$; ii) $\lambda (i, j : I) \rightarrow p @ \max(i, j)$.

⁷Marc Bezem, Thierry Coquand, Simon Huber. A model of type theory in cubical sets. 2014. <http://www.cse.chalmers.se/~coquand/mod1.pdf>

⁸Carlo Angiuli, Kuen-Bang Hou (Favonia), Robert Harper. Cartesian Cubical Computational Type Theory: Constructive Reasoning with Paths and Equalities. 2018. <https://www.cs.cmu.edu/~cangiuli/papers/ccctt.pdf>

⁹Andrew Pitts, Ian Orton. Axioms for Modelling Cubical Type Theory in a Topos. 2016. <https://arxiv.org/pdf/1712.04864.pdf>

$$\begin{array}{ccc}
 & a & \xrightarrow{p} & b \\
 \lambda(i:I) \rightarrow a \uparrow & & & \uparrow p \\
 a & \xrightarrow{\lambda(i:I) \rightarrow a} & a & \\
 & & & \\
 & a & \xrightarrow{p} & b \\
 p \uparrow & & & \uparrow \lambda(i:I) \rightarrow b \\
 b & \xrightarrow{\lambda(i:I) \rightarrow b} & b &
 \end{array}$$

```

connection1 (A: U) (a b: A) (p: Path A a b)
  : PathP (<x> Path A (p@x) b) p (<i>b)
  = <y x> p @ (x \ / y)

```

```

connection2 (A: U) (a b: A) (p: Path A a b)
  : PathP (<x> Path A a (p@x)) (<i>a) p
  = <x y> p @ (x / \ y)

```

Теорема 15. (Congruence). Is a map between values of one type to path space of another type by an encode function between types. Implemented as lambda defined on $[0, 1]$ that returns application of encode function to path application of the given path to lambda argument $|\lambda(i:I) \rightarrow f(p @ i)|$ for both cases.

```

ap (A B: U) (f: A -> B)
  (a b: A) (p: Path A a b)
  : Path B (f a) (f b)

apd (A: U) (a x:A) (B: A -> U) (f: A -> B a)
  (b: B a) (p: Path A a x)
  : Path (B a) (f a) (f x)

```

Теорема 16. (Transport). Transports a value of the domain type to the value of the codomain type by a given path element of the path space between domain and codomain types. Defined as path composition with $|\square|$ of a over a path $p - |\text{comp } p \text{ a } \square|$.

```

trans (A B: U) (p: Path U A B) (a: A) : B

```

6.1.1.8 Теоретико-типова інтерпретація

Визначення 49. (Singleton).

```

singl (A: U) (a: A): U = (x: A) * Path A a x

```

Теорема 17. (Singleton Instance).

```

eta (A: U) (a: A): singl A a = (a, refl A a)

```

Теорема 18. (Singleton Contractability).

```

contr (A: U) (a b: A) (p: Path A a b)
  : Path (singl A a) (eta A a) (b, p)
  = <i> (p @ i, <j> p @ i / \ j)

```

Теорема 19. (Path Elimination, Diagonal).

```

D (A: U) : U = (x y: A) -> Path A x y -> U
J (A: U) (x y: A) (C: D A)
  (d: C x x (refl A x))
  (p: Path A x y) : C x y p
= subst (singl A x) T (eta A x) (y, p) (contr A x y p) d where
  T (z: singl A x) : U = C x (z.1) (z.2)

```

Теорема 20. (Path Elimination, Paulin-Mohring). J is formulated in a form of Paulin-Mohring and implemented using two facts that singleton are contractible and dependent function transport.

```

J (A: U) (a b: A)
  (P: singl A a -> U)
  (u: P (a, refl A a))
  (p: Path A a b) : P (b, p)

```

Теорема 21. (Path Elimination, HoTT). J from HoTT book.

```

J (A: U) (a b: A)
  (C: (x: A) -> Path A a x -> U)
  (d: C a (refl A a))
  (p: Path A a b) : C b p

```

Теорема 22. (Path Computation).

```

trans_comp (A: U) (a: A)
  : Path A a (trans A A (<_>) a)
  = fill (<i> A) a []
subst_comp (A: U) (P: A -> U) (a: A) (e: P a)
  : Path (P a) e (subst A P a a (refl A a) e)
  = trans_comp (P a) e
J_comp (A: U) (a: A) (C: (x: A) -> Path A a x -> U) (d: C a (refl A a))
  : Path (C a (refl A a)) d (J A a C d a (refl A a))
  = subst_comp (singl A a) T (eta A a) d where T (z: singl A a)
  : U = C a (z.1) (z.2)

```

Note that Path type has no Eta rule due to groupoid interpretation.

6.1.1.9 Групоїдна інтерпретація

The groupoid interpretation of type theory is well known article by Martin Hoffman and Thomas Streicher, more specific interpretation of identity type as infinity groupoid. The groupoid interpretation of Path equality will be given along with category theory library in **Issue VII: Category Theory**.

6.1.2 Всесвіти

This introduction is a bit wild strives to be simple yet precise. As we defined a language BNF we could define a language AST by using inductive types which is yet to be defined in **Issue II: Inductive Types and Models**. This SAR notation is due Barendregt.

Визначення 50. (Terms). Point in initial object of language AST inductive definition is called a term. If type theory or language is defined as an inductive type (AST) then the term is defined as its instance.

Визначення 51. (Sorts). N -indexed set of universes $U_{n \in N}$. Could have any number of elements which defines different type systems. All built-in types as long as user defined types are landed usually by default in U_0 universe. Sorts represented in type checker as a separate constructor.

Визначення 52. (Axioms). The inclusion rules $U_i : U_j, i, j \in N$, that define which universe is element of another given universe. You may attach any rules that joins i, j in some way. Axioms with sorts define universe hierarchy.

Визначення 53. (Rules). The set of landings $U_i \rightarrow U_j : U_{\lambda(i,j)}, i, j \in N$, where $\lambda : N \times N \rightarrow N$. These rules define term dependence or how we land (in which universe) formation rules in definitions.

Визначення 54. (Predicative hierarchy). If λ in Rules is an uncurried function $\max : N \times N \rightarrow N$ then such universe hierarchy is called predicative.

Визначення 55. (Impredicative hierarchy). If λ in Rules is a second projection of a tuple $\text{snd} : N \times N \rightarrow N$ then such universe hierarchy is called impredicative.

Визначення 56. (Definitional Equality). For any $U_i, i \in N$ there is defined an equality between its members and between its instances. For all $x, y \in A$, there is defined a $x=y$. Definitional equality compares normalized term instances.

Визначення 57. (SAR). The universum space is configured with a triple of: i) sorts, a set of universes $U_{n \in N}$ indexed over set N ; ii) axioms, a set of inclusions $U_i : U_j, i, j \in N$; iii) rules of term dependence universe landing, a set of landings $U_i \rightarrow U_j : U_{\lambda(i,j)}, i, j \in N$, where λ could be function \max (predicative) or snd (impredicative).

Приклад 1. (CoC). $\text{SAR} = \{\{\star, \square\}, \{\star : \square\}, \{i \rightarrow j : j; i, j \in \{\star, \square\}\}$. Terms live in universe \star , and types live in universe \square . In CoC $\lambda = \text{snd}$.

Приклад 2. (PTS^∞). $\text{SAR} = \{U_{i \in N}, U_i : U_{j; i < j; i, j \in N}, U_i \rightarrow U_j : U_{\lambda(i,j); i, j \in N}\}$. Where U_i is a universe of i -level or i -category in categorical interpretation. The working prototype of PTS^∞ is given in **Addendum I: Pure Type System for Erlang**¹⁰.

¹⁰M.Sokhatsky, P.Maslianko. The Systems Engineering of Consistent Pure Language with Effect Type System for Certified Applications and Higher Languages. AIP Conference Proceedings. 2018. doi:10.1063/1.5045439

6.1.3 Контексти

Speaking of type checker execution, we introduce context or dictionary with types and terms, from which we can derive typed variables. This chain could be implemented as nested sigma types (due to R.A.G.Seely) or list types (due to Voevodsky). Categorically dependent type theory is built upon categories of contexts.

Визначення 58. (Empty Context).

$$\gamma_0 : \Gamma =_{\text{def}} \star.$$

Визначення 59. (Context Comprehension).

$$\Gamma ; A =_{\text{def}} \sum_{\gamma : \Gamma} A(\gamma).$$

Визначення 60. (Context Derivability).

$$\Gamma \vdash A =_{\text{def}} \prod_{\gamma : \Gamma} A(\gamma).$$

6.1.4 Інтерналізація

Here is given formal model of type-theoretical interpretation of Martin-Löf Type Theory. It combines 4 Path rules (no eta), 5 Π rules, and 6 Σ rules (two elims). The proof is provided by direct embedding (internalizing) the model into the model of type checker which is even more powerful.

Визначення 61. (MLTT). The MLTT as a Type is defined by taking all rules for Π , Σ and Path types into one Σ telescope or context.

```
MLTT (A : U) : U
= (Pi_Former : (A -> U) -> U)
* (Pi_Intro : (B : A -> U) -> ((a : A) -> B a) -> (Pi A B))
* (Pi_Elim : (B : A -> U) (a : A) -> (Pi A B) -> B a)
* (Pi_Comp1 : (B : A -> U) (a : A) (f : Pi A B) ->
  Equ (B a) (Pi_Elim B a (Pi_Intro B f)) (f a))
* (Pi_Comp2 : (B : A -> U) (a : A) (f : Pi A B) ->
  Equ (Pi A B) f (\(x : A) -> f x))
* (Sigma_Former : (A -> U) -> U)
* (Sigma_Intro : (B : A -> U) (a : A) -> (b : B a) -> Sigma A B)
* (Sigma_Elim1 : (B : A -> U) (_, Sigma A B) -> A)
* (Sigma_Elim2 : (B : A -> U) (x : Sigma A B) -> B (pr1 A B x))
* (Sigma_Comp1 : (B : A -> U) (a : A) (b : B a) ->
  Path A a (Sigma_Elim1 B (Sigma_Intro B a b)))
* (Sigma_Comp2 : (B : A -> U) (a : A) (b : B a) ->
  Path (B a) b (Sigma_Elim2 B (a,b)))
* (Sigma_Comp3 : (B : A -> U) (p : Sigma A B) ->
  Path (Sigma A B) p (pr1 A B p, pr2 A B p))
* (Id_Former : A -> A -> U)
* (Id_Intro : (a : A) -> Path A a a)
* (Id_Elim : (x : A) (C : D A) (d : C x x (Id_Intro x))
```

```

(y: A) (p: Path A x y) -> C x y p)
* (Id_Comp: (a:A)(C: D A) (d: C a a (Id_Intro a)) ->
  Path (C a a (Id_Intro a)) d (Id_Elim a C d a (Id_Intro a))) * U

```

Теорема 23. (Model Check). There is an instance of MLTT.

```

instance (A: U): MLTT A
= (Pi A, lam A, app A, Beta A, Eta A,
  Sigma A, dpair A, pr1 A, pr2 A, Beta1 A, Beta2 A, Eta2 A,
  Path A, refl A, J A, J_comp A, A)

```

Перевірка в кубічній теорії

The result of the work is a `mltt.ctt` file which can be runned using `cubicaltt`. Note that computation rules take a seconds to type check.

```

\$ time cubical -b mltt.ctt
Checking: MLTT
Checking: instance
File loaded.

real    0m6.308s
user    0m6.278s
sys     0m0.014s

```

6.2 Індуктивні типи

6.2.1 Empty, Unit

empty type lacks both introduction rules and eliminators. However, it has recursor and induction.

```

data empty =
emptyRec (C: U): empty -> C = split {}
emptyInd (C: empty -> U): (z: empty) -> C z = split {}

data unit = star
unitRec (C: U) (x: C): unit -> C = split tt -> x
unitInd (C: unit -> U) (x: C tt): (z: unit) -> C z = split tt -> x

```

6.2.2 Bool, Maybe, Either, Tuple

Визначення 62. (Bool). `bool` is a run-time version of the boolean logic you may use in your general purpose applications. `bool` is isomorphic to `1+1`: either `unit` `unit`.

```

data bool = false | true
b1: U = bool -> bool
b2: U = bool -> bool -> bool
negation: b1 = split { false -> true; true -> false }
or: b2 = split { false -> idfun bool; true -> lambda bool bool true }
and: b2 = split { false -> lambda bool bool false; true -> idfun boo }

```

```

boolEq: b2 = lamb bool (bool -> bool) negation
boolRec (C: U) (f t: C): bool -> C = split { false -> f ; true -> t }
boolInd (C: bool -> U) (f: A false) (t: A true): (n:bool) -> A n
    = split { false -> f ; true -> t }

```

Визначення 63. (Maybe). Maybe has representing functor $M_A(X) = 1 + A$. It is used for wrapping values with optional nothing constructor. In ML-family languages this type is called Option (Miranda, ML). There is an isomorphisms between (fix maybe) and nat.

```

data maybe (A: U) = nothing | just (x: A)
maybeRec (A P: U) (n: P) (j: A -> P): maybe A -> P
    = split { nothing -> n ; just a -> j a }

maybeInd (A: U) (P: maybe A -> U) (n: P nothing)
    (j: (a: A) -> P (just a)): (a: maybe A) -> P a
    = split { nothing -> n ; just x -> j x }

```

either is a representation for sum types or disjunction.

```

data either (A B: U) = left (x: A) | right (y: B)
eitherRec (A B C: U) (b: A -> C) (c: B -> C): either A B -> C
    = split { inl x -> b(x) ; inr y -> c(y) }

eitherInd (A B: U) (C: either A B -> U)
    (x: (a: A) -> C (inl a))
    (y: (b: B) -> C (inr b))
    : (x: either A B) -> C x
    = split { inl i -> x i ; inr j -> y j }

```

tuple is a representation for non-dependent product types or conjunction.

```

data tuple (A B: U) = pair (x: A) (y: B)
prod (A B: U) (x: A) (y: B): ( _: A) * B = (x,y)
tupleRec (A B C: U) (c: (x:A) (y:B) -> C): (x: tuple A B) -> C
    = split pair a b -> c a b
tupleInd (A B: U) (C: tuple A B -> U)
    (c: (x:A)(y:B) -> C (pair x y))
    : (x: tuple A B) -> C x
    = split pair a b -> c a b

```

6.2.3 Nat, List, Stream

Pointed Unary System is a category nat with the terminal object and a carrier nat having morphism [zero: 1nat \rightarrow nat, succ: nat \rightarrow nat]. The initial object of nat is called Natural Number Object and models Peano axiom set.

```

data nat = zero | succ (n: nat)
natEq: nat -> nat -> bool
natCase (C:U) (a b: C): nat -> C
natRec (C:U) (z: C) (s: nat->C->C) : (n:nat) -> C

```

```

natElim (C: nat → U) (z: C zero)
  (s: (n: nat) → C(succ n)): (n: nat) → C(n)
natInd (C: nat → U) (z: C zero)
  (s: (n: nat) → C(n) → C(succ n)): (n: nat) → C(n)

```

Визначення 64. (List). The data type of list L over a given set A can be represented as the initial algebra $(\mu L_A, \text{in})$ of the functor $L_A(X) = 1 + (AX)$. Denote $\mu L_A = \text{List}(A)$. The constructor functions $\text{nil} : 1 \rightarrow \text{List}(A)$ and $\text{cons} : A \times \text{List}(A) \rightarrow \text{List}(A)$ are defined by $\text{nil} = \text{in} \circ \text{inl}$ and $\text{cons} = \text{in} \circ \text{inr}$, so $\text{in} = [\text{nil}, \text{cons}]$.

```

data list (A: U) = nil | cons (x:A) (xs: list A)
listCase (A C:U) (a b: C): list A → C
listRec (A C:U) (z: C) (s: A → list A → C → C): (n: list A) → C
listElim (A: U) (C: list A → U) (z: C nil)
  (s: (x:A)(xs: list A) → C(cons x xs)): (n: list A) → C(n)
listInd (A: U) (C: list A → U) (z: C nil)
  (s: (x:A)(xs: list A) → C(xs) → C(cons x xs)): (n: list A) → C(n)

null (A:U): list A → bool
head (A:U): list A → maybe A
tail (A:U): list A → maybe (list A)
nth (A:U): nat → list A → maybe A
append (A: U): list A → list A → list A
reverse (A: U): list A → list A
map (A B: U): (A → B) → list A → list B
zip (AB: U): list A → list B → list (tuple A B)
foldr (AB: U): (A → B → B) → B → list A → B
foldl (AB: U): (B → A → B) → B → list A → B
switch (A: U): (Unit → list A) → bool → list A
filter (A: U): (A → bool) → list A → list A
length (A: U): list A → nat
listEq (A: eq): list A.1 → list A.1 → bool

```

stream is a record form of the list's cons constructor. It models the infinity list that has no terminal element.

```

data stream (A: U) = cons (x: A) (xs: stream A)

```

6.2.4 Fin, Vector, Seq

fin is the inductive definition of set with finite elements.

```

data fin (n: nat)
  = fzero | fsucc (_: fin (pred n))

fz (n: nat): fin (succ n) = fzero
fs (n: nat): fin n → fin (succ n) = \ (x: fin n) → fsucc x

```

vector is the inductive definition of limited length list.

```

data vector (A: U) (n: nat)
  = nil | cons (_: A) ( _: vector A (pred n))

```

seq — abstract compositional sequences.

```
data seq (A: U) (B: A -> A -> U) (X Y: A)
  = seqNil (_: A)
  | seqCons (X Y Z: A) (_: B X Y) (_: Seq A B Y Z)
```

6.2.5 Імпредикативне кодування

You know Church encoding which also has its dependent analogue in CoC, however in Coq it is impossible to derive Inductive Principle as type system lacks fixpoint and functional extensionality. The example of working compiler of PTS languages are Om and Morte. Assume we have Church encoded NAT:

```
nat = (X:U) -> (X -> X) -> X -> X
```

where first parameter $(X \rightarrow X)$ is a succ, the second parameter X is zero, and the result of encoding is landed in X . Even if we encode the parameter

```
list (A: U) = (X:U) -> X -> (A -> X) -> X
```

and parameter A let's say live in 42 universe and X live in 2 universe, then by the signature of encoding the term will be landed in X , thus 2 universe. In other words such dependency is called impredicative displaying that landed term is not a predicate over parameters. This means that Church encoding is incompatible with predicative type checkers with predicative or predicative-cumulative hierarchies.

In HoTT n -types is encoded as n -groupoids, thus we need to add a predicate in which n -type we would like to land the encoding:

```
NAT (A: U) = (X:U) -> isSet X -> X -> (A -> X) -> X
```

Here we added `isSet` predicate. With this motto we can implement propositional truncation by landing term in `isProp` or even HIT by landing in `isGroupoid`:

```
TRUN (A:U) type = (X: U) -> isProp X -> (A -> X) -> X
S1 = (X:U) -> isGroupoid X -> ((x:X) -> Path X x x) -> X
MONOPLE (A:U) = (X:U) -> isSet X -> (A -> X) -> X
NAT = (X:U) -> isSet X -> X -> (A -> X) -> X
```

The main publication on this topic could be found at [14] and [15]. Here we have the implementation of Unit impredicative encoding in HoTT.

```
upPath (X Y:U)(f:X->Y)(a:X->X): X -> Y = o X X Y f a
downPath (X Y:U)(f:X->Y)(b:Y->Y): X -> Y = o X Y Y b f
naturality (X Y:U)(f:X->Y)(a:X->X)(b:Y->Y): U
  = Path (X->Y)(upPath X Y f a)(downPath X Y f b)

unitEnc': U = (X: U) -> isSet X -> X -> X
isUnitEnc (one: unitEnc'): U
  = (X Y:U)(x:isSet X)(y:isSet Y)(f:X->Y) ->
    naturality X Y f (one X x)(one Y y)
```

```

unitEnc: U = (x: unitEnc') * isUnitEnc x
unitEncStar: unitEnc = (\(X:U)(_:isSet X) ->
  idfun X,\(X Y: U)(_:isSet X)(_:isSet Y)->refl(X->Y))
unitEncRec (C: U) (s: isSet C) (c: C): unitEnc -> C
  = \ (z: unitEnc) -> z.1 C s c
unitEncBeta (C: U) (s: isSet C) (c: C)
  : Path C (unitEncRec C s c unitEncStar) c = refl C c
unitEncEta (z: unitEnc): Path unitEnc unitEncStar z = undefined
unitEncInd (P: unitEnc -> U) (a: unitEnc): P unitEncStar -> P a
  = subst unitEnc P unitEncStar a (unitEncEta a)
unitEncCondition (n: unitEnc'): isProp (isUnitEnc n)
  = \ (f g: isUnitEnc n) ->
    <h> \ (x y: U) -> \ (X: isSet x) -> \ (Y: isSet y)
    -> \ (F: x -> y) -> <i> \ (R: x) -> Y (F (n x X R)) (n y Y (F R))
    (<j> f x y X Y F @ j R) (<j> g x y X Y F @ j R) @ h @ i

```

6.3 Гомотопічна теорія типів

Homotopy Type Theory takes its origins in 1996 from groupoid interpretation by Hofmann and Streicher's, and later (in 10 years) was formalized by Awodey, Warren and Voevodsky. Voevodsky constructed Kan simplicial sets interpretation of type theory and discovered the property of this model, that was named univalence. This property allows to identify isomorphic structures in terms of type theory.

Homotopy type theory to classical homotopy theory is like Euclidian syntethic geometry (points, lines, axioms and deduction rules) to analytical geometry with cartesian coordinates on \mathbb{R}^n (geometric and algebraic) ¹¹

In the same way as inductive types extends MLTT for inductive programming, the higher inductive types (HIT) extend homotopy type theory for geometry programming. You can directly encode CW-complexes by using HIT. The definition of HIT syntax will be given in the next **Issue IV: Higher Inductive Types**.

6.3.1 Гомотопії

The first higher equality we meet in homotopy theory is a notion of homotopy, where we compare two functions or two path spaces (which is sort of dependent families). The homotopy interval $I = [0, 1]$ is the perfect foundation for definition of homotopy.

Визначення 65. (Interval). Compact interval.

```

data I = i0
      | i1

```

¹¹We will denote geometric, type theoretical and homotopy constants bold font **R** while analitical will be denoted with double lined letters \mathbb{R} .

| Equality | Homotopy | ∞ -Groupoid |
|--------------|------------------------|--------------------------|
| reflexivity | constant path | identity morphism |
| symmetry | inversion of path | inverse morphism |
| transitivity | concatenation of paths | composition of morphisms |

```

I seg <i> [(i=0) -> i0,
          (i=1) -> i1]

```

You can think of **I** as isomorphism of equality type, disregarding carriers on the edges. By mapping $i0, i1 : \mathbf{I}$ to $x, y : A$ one can obtain identity or equality type from classic type theory.

Визначення 66. (Interval Split). The conversion function from **I** to a type of comparison is a direct eliminator of interval. The interval is also known as one of primitive higher inductive types which will be given in the next **Issue IV: Higher Inductive Types**.

```

pathToHtpy (A: U) (x y: A) (p: Path A x y): I -> A
= split { i0 -> x; i1 -> y; seg @ i -> p @ i }

```

Визначення 67. (Homotopy). The homotopy between two function $f, g : X \rightarrow Y$ is a continuous map of cylinder $H : X \times \mathbf{I} \rightarrow Y$ such that

$$\begin{cases} H(x, 0) = f(x), \\ H(x, 1) = g(x). \end{cases}$$

```

homotopy (X Y: U) (f g: X -> Y)
(p: (x: X) -> Path Y (f x) (g x))
(x: X): I -> Y = pathToHtpy Y (f x) (g x) (p x)

```

6.3.2 Групоїдна інтерпретація

The first text about groupoid interpretation of type theory can be found in Francois Lamarche: A proposal about Foundations¹². Then Martin Hofmann and Thomas Streicher wrote the initial document on groupoid interpretation of type theory¹³.

There is a deep connection between higher-dimensional groupoids in category theory and spaces in homotopy theory, equipped with some topology. The category or groupoid could be built where the objects are particular spaces or types, and morphisms are path types between these types, composition operation is a path concatenation. We can write this groupoid here recalling that it should be category with inverted morphisms.

¹²<http://www.cse.chalmers.se/~coquand/Proposal.pdf>

¹³Martin Hofmann and Thomas Streicher. The Groupoid Interpretation of Type Theory. 1996.


```

cat: U = (A: U) * (A -> A -> U)
groupoid: U = (X: cat) * isCatGroupoid X
PathCat (X: U): cat = (X, \ (x y: X) -> Path X x y)

isCatGroupoid (C: cat): U
= (id: (x: C.1) -> C.2 x x)
* (c: (x y z: C.1) -> C.2 x y -> C.2 y z -> C.2 x z)
* (inv: (x y: C.1) -> C.2 x y -> C.2 y x)
* (inv_left: (x y: C.1) (p: C.2 x y) ->
  Path (C.2 x x) (c x y x p (inv x y p)) (id x))
* (inv_right: (x y: C.1) (p: C.2 x y) ->
  Path (C.2 y y) (c y x y (inv x y p) p) (id y))
* (left: (x y: C.1) (f: C.2 x y) ->
  Path (C.2 x y) (c x x y (id x) f) f)
* (right: (x y: C.1) (f: C.2 x y) ->
  Path (C.2 x y) (c x y y f (id y)) f)
* ((x y z w: C.1) (f: C.2 x y) (g: C.2 y z) (h: C.2 z w) ->
  Path (C.2 x w) (c x z w (c x y z f g) h)
    (c x y w f (c y z w g h)))

PathGrpd (X: U)
: groupoid
= ((Ob, Hom), id, c, sym X, compPathInv X, compInvPath X, L, R, Q) where
  Ob: U = X
  Hom (A B: Ob): U = Path X A B
  id (A: Ob): Path X A A = refl X A
  c (A B C: Ob) (f: Hom A B) (g: Hom B C): Hom A C
    = comp (<i> Path X A (g @ i)) f []

```

From here should be clear what it meant to be groupoid interpretation of path type in type theory. In the same way we can construct categories of \prod and \sum types. In **Issue VIII: Topos Theory** such categories will be given.

6.3.3 Функціональна екстенціональність

Визначення 68. (funExt-Formation)

```

funext_form (A B: U) (f g: A -> B): U
= Path (A -> B) f g

```

Визначення 69. (funExt-Introduction)

```

funext (A B: U) (f g: A -> B) (p: (x: A) -> Path B (f x) (g x))
: funext_form A B f g
= <i> \ (a: A) -> p a @ i

```

Визначення 70. (funExt-Elimination)

```

happly (A B: U) (f g: A -> B) (p: funext_form A B f g) (x: A)
: Path B (f x) (g x)
= cong (A -> B) B (\ (h: A -> B) -> apply A B h x) f g p

```

Визначення 71. (funExt-Computation)

```
funext_Beta (A B: U) (f g: A → B) (p: (x:A) → Path B (f x) (g x))
  : (x:A) → Path B (f x) (g x)
  = \ (x:A) → happly A B f g (funext A B f g p) x
```

Визначення 72. (funExt-Uniqueness)

```
funext_Eta (A B: U) (f g: A → B) (p: Path (A → B) f g)
  : Path (Path (A → B) f g) (funext A B f g (happly A B f g p)) p
  = refl (Path (A → B) f g) p
```

6.3.4 Пулбеки

Визначення 73. (Пулбек).

```
pullback (A B C: U) (f: A → C) (g: B → C): U
  = (a: A)
  * (b: B)
  * Path C (f a) (g b)

pb1 (A B C: U) (f: A → C) (g: B → C)
  : pullback A B C f g → A
  = \ (x: pullback A B C f g) → x.1

pb2 (A B C: U) (f: A → C) (g: B → C)
  : pullback A B C f g → B
  = \ (x: pullback A B C f g) → x.2.1

pb3 (A B C: U) (f: A → C) (g: B → C)
  : (x: pullback A B C f g) → Path C (f x.1) (g x.2.1)
  = \ (x: pullback A B C f g) → x.2.2
```

Визначення 74. (Ядро).

```
kernel (A B: U) (f: A → B): U
  = pullback A A B f f
```

Визначення 75. (Гомотопічне розшарування).

```
hofiber (A B: U) (f: A → B) (y: B): U
  = pullback A unit B f (\ (x: unit) → y)
```

Визначення 76. (Пулбек Квадрат).

```
pullbackSq (Z A B C: U) (f: A → C) (g: B → C) (z1: Z → A) (z2: Z → B): U
  = (h: (z: Z) → Path C ((o Z A C f z1) z) (((o Z B C g z2)) z))
  * isEquiv Z (pullback A B C f g) (induced Z A B C f g z1 z2 h)
```

Теорема 24. (Існування пулбеку).

```
completePullback (A B C: U) (f: A → C) (g: B → C)
  : pullbackSq (pullback A B C f g) A B C f g (pb1 A B C f g) (pb2 A B C f g)
```

6.3.5 Пушаути та фібрації

Визначення 77. (Pushout). One of the notable examples is pushout as it's used to define the cell attachment formally, as others cofibrant objects.

```
data pushout (A B C: U) (f: C -> A) (g: C -> B)
  = po1 (_: A)
  | po2 (_: B)
  | po3 (c: C) <i> [ (i = 0) -> po1 (f c) ,
                    (i = 1) -> po2 (g c) ]
```

Визначення 78. (Fibration-1) Dependent fiber bundle derived from Path contractability.

```
isFBundle1 (B: U) (p: B -> U) (F: U): U
  = (_: (b: B) -> isContr (Path U (p b) F))
  * ((x: Sigma B p) -> B)
```

Визначення 79. (Fibration-2). Dependent fiber bundle derived from surjective function.

```
isFBundle2 (B: U) (p: B -> U) (F: U): U
  = (V: U)
  * (v: surjective V B)
  * ((x: V) -> Path U (p (v.1 x)) F)
```

Визначення 80. (Fibration-3). Non-dependent fiber bundle derived from fiber truncation.

```
im1 (A B: U) (f: A -> B): U = (b: B) * pTrunc ((a:A) * Path B (f a) b)
BAut (F: U): U = im1 unit U (\(x: unit) -> F)
unitIm1 (A B: U) (f: A -> B): im1 A B f -> B = \(x: im1 A B f) -> x.1
unitBAut (F: U): BAut F -> U = unitIm1 unit U (\(x: unit) -> F)
```

```
isFBundle3 (E B: U) (p: E -> B) (F: U): U
  = (X: B -> BAut F)
  * (classify B (BAut F) (\(b: B) -> fiber E B p b) (unitBAut F) X) where
  classify (A' A: U) (E': A' -> U) (E: A -> U) (f: A' -> A): U
    = (x: A') -> Path U (E'(x)) (E(f(x)))
```

Визначення 81. (Fibration-4). Non-dependent fiber bundle derived as pullback square.

```
isFBundle4 (E B: U) (p: E -> B) (F: U): U
  = (V: U)
  * (v: surjective V B)
  * (v': prod V F -> E)
  * pullbackSq (prod V F) E V B p v.1 v' (\(x: prod V F) -> x.1)
```

6.3.6 Еквівалентність, Ізоморфізм, Унівалентність

Визначення 82. (Equivalence).

```

fiber (A B: U) (f: A -> B) (y: B): U = (x: A) * Path B y (f x)
isSingleton (X:U): U = (c:X) * ((x:X) -> Path X c x)
isEquiv (A B: U) (f: A -> B): U = (y: B) -> isContr (fiber A B f y)
equiv (A B: U): U = (f: A -> B) * isEquiv A B f

```

Визначення 83. (Surjective).

```

isSurjective (A B: U) (f: A -> B): U
  = (b: B) * pTrunc (fiber A B f b)

surjective (A B: U): U
  = (f: A -> B)
  * isSurjective A B f

```

Визначення 84. (Injective).

```

isInjective' (A B: U) (f: A -> B): U
  = (b: B) -> isProp (fiber A B f b)

injective (A B: U): U
  = (f: A -> B)
  * isInjective A B f

```

Визначення 85. (Embedding).

```

isEmbedding (A B: U) (f: A -> B) : U
  = (x y: A) -> isEquiv (Path A x y) (Path B (f x) (f y)) (cong A B f x y)

embedding (A B: U): U
  = (f: A -> B)
  * isEmbedding A B f

```

Визначення 86. (Half-adjoint Equivalence).

```

isHae (A B: U) (f: A -> B): U
  = (g: B -> A)
  * (eta_: Path (id A) (o A B A g f) (idfun A))
  * (eps_: Path (id B) (o B A B f g) (idfun B))
  * ((x: A) -> Path B (f ((eta_ @ 0) x)) ((eps_ @ 0) (f x)))

hae (A B: U): U
  = (f: A -> B)
  * isHae A B f

```

Ізоморфізм.

Визначення 87. (iso-Formation)

```

iso_Form (A B: U): U = isIso A B -> Path U A B

```

Визначення 88. (iso-Introduction)

```

iso_Intro (A B: U): iso_Form A B

```

Визначення 89. (iso-Elimination)

```
iso_Elim (A B : U) : Path U A B -> isIso A B
```

Визначення 90. (iso-Computation)

```
iso_Comp (A B : U) (p : Path U A B)
  : Path (Path U A B) (iso_Intro A B (iso_Elim A B p)) p
```

Визначення 91. (iso-Uniqueness)

```
iso_Uniq (A B : U) (p : isIso A B)
  : Path (isIso A B) (iso_Elim A B (iso_Intro A B p)) p
```

Унівалентність.

Визначення 92. (uni-Formation)

```
univ_Formation (A B : U) : U = equiv A B -> Path U A B
```

Визначення 93. (uni-Introduction)

```
equivToPath (A B : U) : univ_Formation A B
  = \ (p : equiv A B) -> <i> Glue B [(i=0) -> (A,p),
    (i=1) -> (B, subst U (equiv B) B B (<_>B) (idEquiv B))] ]
```

Визначення 94. (uni-Elimination)

```
pathToEquiv (A B : U) (p : Path U A B) : equiv A B
  = subst U (equiv A) A B p (idEquiv A)
```

Визначення 95. (uni-Computation)

```
eqToEq (A B : U) (p : Path U A B)
  : Path (Path U A B) (equivToPath A B (pathToEquiv A B p)) p
  = <j i> let Ai : U = p@i in Glue B
    [ (i=0) -> (A, pathToEquiv A B p),
      (i=1) -> (B, pathToEquiv B B (<k> B)),
      (j=1) -> (p@i, pathToEquiv Ai B (<k> p @ (i \ k))) ]
```

Визначення 96. (uni-Uniqueness)

```
transPathFun (A B : U) (w : equiv A B)
  : Path (A -> B) w.1 (pathToEquiv A B (equivToPath A B w)).1
```

6.4 Вищі індуктивні типи

CW-complexes are fundamental objects in homotopy type theory and even included inside cubical type checker in a form of higher (co)-inductive types (HITs). Just like regular (co)-inductive types could be described as recursive terminating (well-founded) or non-terminating trees, higher inductive types could be described as CW-complexes. Defining HIT means to define some CW-complex directly using cubical homogeneous composition structure as an element of initial algebra inside cubical model.

6.4.1 Інтервал

Визначення 97. (Interval). Compact interval.

```
data I = i0
      | i1
      | seg <i> [(i=0) -> i0,
                (i=1) -> i1]
```

You can think of I as isomorphism of equality type, disregarding carriers on the edges. By mapping $i0, i1 : I$ to $x, y : A$ one can obtain identity or equality type from classic type theory.

6.4.2 n-Сфера

Визначення 98. (Shperes and Disks). Here are some example of using dimensions to construct spherical shapes.

```
data S1
  = base
  | loop <i> [ (i = 0) -> base,
              (i = 1) -> base ]
```

```
data S2
  = point
  | surf <i j> [ (i = 0) -> point, (i = 1) -> point,
                (j = 0) -> point, (j = 1) -> point ]
              (j = 0) -> point, (j = 1) -> point ]
```

6.4.3 Суспензія та цикли

Визначення 99. (Suspension).

```
data susp (A: U)
  = north
  | south
  | merid (a: A) <i> [ (i = 0) -> north ,
                      (i = 1) -> south ]
```

6.4.4 Транкейшин та факторизація

Визначення 100. (Truncation).

```
data pTrunc (A: U) -- (-1)-trunc, mere proposition truncation
  = pinc (a: A)
  | pline (x y: pTrunc A) <i>
    [ (i = 0) -> x,
      (i = 1) -> y ]
```

```
data sTrunc (A: U) -- (0)-trunc, set truncation
  = sinc (a: A)
  | sline (a b: sTrunc A)
    (p q: Path (sTrunc A) a b) &lt;i j>
```

```

[ (i = 0) -> p @ j,
  (i = 1) -> q @ j,
  (j = 0) -> a,
  (j = 1) -> b ]

data gTrunc (A: U) -- (1)-trunc, groupoid truncation
= ginc (a: A)
| gline (a b: gTrunc A)
  (p q: Path (gTrunc A) a b)
  (r s: Path (Path (gTrunc A) a b) p q) &lt;i j k>;
[ (i = 0) -> r @ j @ k,
  (i = 1) -> s @ j @ k,
  (j = 0) -> p @ k,
  (j = 1) -> q @ k,
  (k = 0) -> a,
  (k = 1) -> b ]

```

Факторизація.

Визначення 101. (Quotient).

```

data quot (A: U) (R: A -> A -> U)
= inj (a: A)
| quoteq (a b: A) (r: R a b) &lt;i>;
[ (i = 0) -> inj a,
  (i = 1) -> inj b ]

data setquot (A: U) (R: A -> A -> U)
= quotient (a: A)
| identification (a b: A) (r: R a b) &lt;i>;
[ (i = 0) -> quotient a,
  (i = 1) -> quotient b ]
| setTruncation (a b: setquot A R)
  (p q: Path (setquot A R) a b) &lt;i j>;
[ (i = 0) -> p @ j,
  (i = 1) -> q @ j,
  (j = 0) -> a,
  (j = 1) -> b ]

```

6.5 Модальності

6.5.1 Процеси

Process Calculus defines formal business process engine that could be mapped onto Synrc/BPE Erlang/OTP application or OCaml Lwt library with Coq.io front-end. Here we will describe an Erlang approach for modeling processes. We will describe process calculus as a formal model of two types: 1) the general abstract MLTT interface of process modality that can be used as a formal binding to low-level programming or as a top-level interface; 2) the low-level formal model of Erlang/OTP generic server.

Визначення 102. (Storage). The secure storage based on verified cryptography. NOTE: For simplicity let it be a compatible list.

```
storage: U -> U = list
```

Визначення 103. (Process). The type formation rule of the process is a Σ telescope that contains: i) protocol type; ii) state type; iii) in-memory current state of process in the form of cartesian product of protocol and state which is called signature of the process; iv) monoidal action on signature; v) persistent storage for process trace.

```
process : U
= (protocol state: U)
* (current: prod protocol state)
* (act: id (prod protocol state))
* (storage (prod protocol state))
```

Визначення 104. (Spawn). The sole introduction rule, process constructor is a tuple with filled process type information. Spawn is a modal arrow representing the fact that process instance is created at some scheduler of CPU core.

```
spawn (protocol state: U) (init: prod protocol state)
  (action: id (prod protocol state)) : process
= (protocol, state, init, action, nil)
```

Визначення 105. (Accessors). Process type defines following accessors (projections, this eliminators) to its structure: i) protocol type; ii) state type; iii) signature of the process; iv) current state of the process; v) action projection; vi) trace projection.

```
protocol (p: process): U = p.1
state    (p: process): U = p.2.1
signature (p: process): U = prod p.1 p.2.1
current  (p: process):      signature p = p.2.2.1
action   (p: process):      id (signature p) = p.2.2.2.1
trace    (p: process):      storage (signature p) = p.2.2.2.2
```

NOTE: there are two kinds of approaches to process design: 1) Semigroup: $P \times S \rightarrow S$; and 2) Monoidal: $P \times S \rightarrow P \times S$, where P is protocol and S is state of the process.

Визначення 106. (Receive). The modal arrow that represents sleep of the process until protocol message arrived.

```
receive (p: process) : protocol p = axiom
```

Визначення 107. (Send). The response free function that represents sending a message to a particular process in the run-time. The Send nature is async and invisible but is a part of process modality as it's effectfull.

```
send (p: process) (message: protocol p) : unit = axiom
```


Визначення 108. (Execute). The Execute function is an eliminator of process stream performing addition of a single entry to the secured storage of the process. Execute is a transactional or synchronized version of asynchronous Send.

```
execute (p: process) (message: protocol p) : process
  = let step: signature p = (action p) (message, (current p).2)
    in (protocol p, state p, step, action p, cons step (trace p))
```

1) Run-time formal model of Erlang/OTP compatible generic server with extraction to Erlang. This is an example of low-level process modality usage. The run-time formal model can be seen here¹⁴.

2) Formal model of Business Process Engine application that runs on top of Erlang/OTP extracted model. The Synrc/BPE model can be seen here¹⁵.

3) Formal model of Synrc/N2O application and n2o_async¹⁶ in particular.

¹⁴<https://n2o.space/articles/streams.htm>

¹⁵<https://n2o.space/articles/bpe.htm>

¹⁶https://mqtt.n2o.space/man/n2o_async.htm

Математичні компоненти

Присвячується вчителям
французької школи

Александрю Гротендіку
та групі Бурбакі

Четвертий розділ надає приклади математичного моделювання та складних теорем теорії категорій, теорій топосів, теорії гомотопій, тощо.

Вступне слово

7.1 Теорія категорій

7.1.1 Категорія

Визначення 109. (Category Signature). The signature of category is a $\Sigma_A: \mathcal{U}A \rightarrow A \rightarrow \mathcal{U}$ where \mathcal{U} could be any universe. The pr_1 projection is called Ob and pr_2 projection is called $\text{Hom}(a, b)$, where $a, b : \text{Ob}$.

$\text{cat} : \mathcal{U} = (A : \mathcal{U}) * (A \rightarrow A \rightarrow \mathcal{U})$

Precategory C defined as set of $\text{Hom}_C(a, b)$ where $a, b : \text{Ob}_C$ are objects defined by its id arrows $\text{Hom}_C(x, x)$. Properfies of left and right units included with composition c and its associativity.

Визначення 110. (Precategory). More formal, precategory C consists of the following. (i) A type Ob_C , whose elements are called objects; (ii) for each $a, b : \text{Ob}_C$, a set $\text{Hom}_C(a, b)$, whose elements are called arrows or morphisms. (iii) For each $a : \text{Ob}_C$, a morphism $1_a : \text{Hom}_C(a, a)$, called the identity morphism. (iv) For each $a, b, c : \text{Ob}_C$, a function $\text{Hom}_C(b, c) \rightarrow \text{Hom}_C(a, b) \rightarrow \text{Hom}_C(a, c)$ called composition, and denoted $g \circ f$. (v) For each $a, b : \text{Ob}_C$ and $f : \text{Hom}_C(a, b)$, $f = 1_b \circ f$ and $f = f \circ 1_a$. (vi) For each $a, b, c, d : A$ and $f : \text{Hom}_C(a, b)$, $g : \text{Hom}_C(b, c)$, $h : \text{Hom}_C(c, d)$, $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$.

Визначення 111. (Small Category). If for all $a, b : \text{Ob}$ the $\text{Hom}_C(a, b)$ forms a Set, then such category is called small category.

```
isPrecategory (C: cat): U
= (id: (x: C.1) -> C.2 x x)
* (c: (x y z: C.1) -> C.2 x y -> C.2 y z -> C.2 x z)
* (homSet: (x y: C.1) -> isSet (C.2 x y))
* (left: (x y: C.1) -> (f: C.2 x y)
-> Path (C.2 x y) (c x x y (id x) f) f)
* (right: (x y: C.1) -> (f: C.2 x y)
-> Path (C.2 x y) (c x y y f (id y)) f)
* ( (x y z w: C.1) (f: C.2 x y) (g: C.2 y z)
(h: C.2 z w) -> Path (C.2 x w)
(c x z w (c x y z f g) h) (c x y w f (c y z w g h)))
```

precategory: $U = (C: \text{cat}) * \text{isPrecategory } C$

Accessors of the precategory structure. For Ob is carrier and for Hom is hom.

```
carrier (C: precategory): U = C.1.1
hom      (C: precategory) (a b: carrier C): U = C.1.2 a b
path     (C: precategory) (x: carrier C): hom C x x = C.2.1 x
compose  (C: precategory) (x y z: carrier C)
(f: hom C x y) (g: hom C y z): hom C x z = C.2.2.1 x y z f g
```

7.1.2 (Ко)термінал

Визначення 112. (Initial Object). Is such object Ob_C , that $\prod_{x,y:\text{Ob}_C} \text{isContr}(\text{Hom}_C(x,y))$.

Визначення 113. (Terminal Object). Is such object Ob_C , that $\prod_{x,y:\text{Ob}_C} \text{isContr}(\text{Hom}_C(y,x))$.

```
isInitial (C: precategory) (x: carrier C): U
= (y: carrier C) -> isContr (hom C x y)
isTerminal (C: precategory) (y: carrier C): U
= (x: carrier C) -> isContr (hom C x y)
initial (C: precategory): U
= (x: carrier C) * isInitial C x
terminal(C: precategory): U
= (y: carrier C) * isTerminal C y
```

7.1.3 Функтор

Визначення 114. (Category Functor). Let A and B be precategories. A functor $F : A \rightarrow B$ consists of: (i) A function $F_{\text{Ob}} : \text{Ob}_A \rightarrow \text{Ob}_B$; (ii) for each $a, b : \text{Ob}_A$, a function $F_{\text{Hom}} : \text{Hom}_A(a, b) \rightarrow \text{Hom}_B(F_{\text{Ob}}(a), F_{\text{Ob}}(b))$; (iii) for each $a : \text{Ob}_A$, $F_{\text{Ob}}(1_a) = 1_{F_{\text{Ob}}(a)}$; (iv) for $a, b, c : \text{Ob}_A$ and $f : \text{Hom}_A(a, b)$ and $g : \text{Hom}_A(b, c)$, $F(g \circ f) = F_{\text{Hom}}(g) \circ F_{\text{Hom}}(f)$.

```

catfunctor (A B: precategory): U
= (ob: carrier A -> carrier B)
* (mor: (x y: carrier A) -> hom A x y -> hom B (ob x) (ob y))
* (id: (x: carrier A) -> Path (hom B (ob x) (ob x))
  (mor x x (path A x)) (path B (ob x)))
* ((x y z: carrier A) -> (f: hom A x y) -> (g: hom A y z) ->
  Path (hom B (ob x) (ob z)) (mor x z (compose A x y z f g))
  (compose B (ob x) (ob y) (ob z) (mor x y f) (mor y z g)))

```

7.1.4 Натуральні перетворення

Визначення 115. (Natural Transformation). For functors $F, G : C \rightarrow D$, a natural transformation $\gamma : F \rightarrow G$ consists of: (i) for each $x : C$, a morphism $\gamma_x : \text{Hom}_D(F(x), G(x))$; (ii) for each $x, y : C$ and $f : \text{Hom}_C(x, y)$, $G(f) \circ \gamma_x = \gamma_y \circ F(f)$.

```

isNaturalTrans (C D: precategory)
  (F G: catfunctor C D)
  (eta: (x: carrier C) -> hom D (F.1 x) (G.1 x)): U
= (x y: carrier C) (h: hom C x y) ->
  Path (hom D (F.1 x) (G.1 y))
  (compose D (F.1 x) (F.1 y) (G.1 y) (F.2.1 x y h) (eta y))
  (compose D (F.1 x) (G.1 x) (G.1 y) (eta x) (G.2.1 x y h))

ntrans (C D: precategory) (F G: catfunctor C D): U
= (eta: (x: carrier C) -> hom D (F.1 x) (G.1 x))
* (isNaturalTrans C D F G eta)

```

7.1.5 Розширення Кана

Визначення 116. (Kan Extension).

```

extension (C C' D: precategory)
  (K: catfunctor C C') (G: catfunctor C D) : U
= (F: catfunctor C' D)
* (ntrans C D (compFunctor C C' D K F) G)

```

7.1.6 Ізоморфізм категорій

Визначення 117. (Category Isomorphism). A morphism $f : \text{Hom}_A(a, b)$ is an iso if there is a morphism $g : \text{Hom}_A(b, a)$ such that $1_a = \eta_1 g \circ f$ and $f \circ g = \eta_2 1_b$. "f is iso" is a mere proposition. If A is a precategory and $a, b : A$, then $a = b \rightarrow \text{iso}_A(a, b)$ (idtoiso).

```

iso (C: precategory) (A B: carrier C): U
= (f: hom C A B)
* (g: hom C B A)
* (eta: Path (hom C A A) (compose C A B A f g) (path C A))
* (Path (hom C B B) (compose C B A B g f) (path C B))

```

7.1.7 Резк-поповнення

Визначення 118. (Category). A category is a precategory such that for all $a : \text{Ob}_C$, the $\prod_{A:\text{Ob}_C} \text{isContr} \Sigma_{B:\text{Ob}_C} \text{iso}_C(A, B)$.

```
isCategory (C: precategory): U
= (A: carrier C) -> isContr ((B: carrier C) * iso C A B)
category: U = (C: precategory) * isCategory C
```

7.1.8 Конструкції

7.1.8.1 (Ко)продукти категорій

Визначення 119. (Category Product).

```
Product (X Y: precategory) : precategory
Coproduct (X Y: precategory) : precategory
```

7.1.8.2 Обернена категорія

Визначення 120. (Opposite Category). The opposite category to category C is a category C^{op} with same structure, except all arrows are inverted.

```
opCat (P: precategory): precategory
```

7.1.8.3 (Ко)слайс категорія

Визначення 121. (Slice Category).

Визначення 122. (Coslice Category).

```
sliceCat (C D: precategory)
(a: carrier (opCat C))
(F: catfunctor D (opCat C))
: precategory
= cosliceCat (opCat C) D a F

cosliceCat (C D: precategory)
(a: carrier C)
(F: catfunctor D C) : precategory
```

7.1.8.4 Універсальна властивість

Визначення 123. (Universal Mapping Property).

```
initArr (C D: precategory)
(a: carrier C)
(F: catfunctor D C): U = initial (cosliceCat C D a F)

termArr (C D: precategory)
(a: carrier (opCat C))
(F: catfunctor D (opCat C)): U = terminal (sliceCat C D a F)
```

7.1.8.5 Одиначна категорія

Визначення 124. (Unit Category). In unit category both $Ob = \top$ and $Hom = \top$.

```
unitCat: precategory
```

7.1.9 Приклади

7.1.9.1 Категорія множин

Визначення 125. (Category of Sets).

```
Set: precategory = ((Ob, Hom), id, c, HomSet, L, R, Q) where
  Ob: U = SET
  Hom (A B: Ob): U = A.1 -> B.1
  id (A: Ob): Hom A A = idfun A.1
  c (A B C: Ob) (f: Hom A B) (g: Hom B C): Hom A C
    = o A.1 B.1 C.1 g f
  HomSet (A B: Ob): isSet (Hom A B) = setFun A.1 B.1 B.2
  L (A B: Ob) (f: Hom A B): Path (Hom A B) (c A A B (id A) f) f
    = refl (Hom A B) f
  R (A B: Ob) (f: Hom A B): Path (Hom A B) (c A B B f (id B)) f
    = refl (Hom A B) f
  Q (A B C D: Ob) (f: Hom A B) (g: Hom B C) (h: Hom C D)
    : Path (Hom A D) (c A C D (c A B C f g) h) (c A B D f (c B C D g h))
    = refl (Hom A D) (c A B D f (c B C D g h))
```

7.1.9.2 Категорія функцій

Визначення 126. (Category of Functions over Sets).

```
Functions (X Y: U) (Z: isSet Y): precategory
  = ((Ob, Hom), id, c, HomSet, L, R, Q) where
  Ob: U = X -> Y
  Hom (A B: Ob): U = id (X -> Y)
  id (A: Ob): Hom A A = idfun (X -> Y)
  c (A B C: Ob) (f: Hom A B) (g: Hom B C): Hom A C = idfun (X -> Y)
  HomSet (A B: Ob): isSet (Hom A B) = setFun Ob Ob (setFun X Y Z)
  L (A B: Ob) (f: Hom A B): Path (Hom A B) (c A A B (id A) f) f = axiom
  R (A B: Ob) (f: Hom A B): Path (Hom A B) (c A B B f (id B)) f = axiom
  Q (A B C D: Ob) (f: Hom A B) (g: Hom B C) (h: Hom C D)
    : Path (Hom A D) (c A C D (c A B C f g) h)
      (c A B D f (c B C D g h)) = axiom
```

7.1.9.3 Категорія категорій

Визначення 127. (Category of Categories).

```
Cat: precategory = ((Ob, Hom), id, c, HomSet, L, R, Q) where
  Ob: U = precategory
  Hom (A B: Ob): U = catfunctor A B
  id (A: Ob): catfunctor A A = idFunctor A
  c (A B C: Ob) (f: Hom A B) (g: Hom B C): Hom A C
    = compFunctor A B C f g
```

```

HomSet (A B: Ob): isSet (Hom A B) = axiom
L (A B: Ob) (f: Hom A B): Path (Hom A B) (c A A B (id A) f) f = axiom
R (A B: Ob) (f: Hom A B): Path (Hom A B) (c A B B f (id B)) f = axiom
Q (A B C D: Ob) (f: Hom A B) (g: Hom B C) (h: Hom C D)
  : Path (Hom A D) (c A C D (c A B C f g) h)
    (c A B D f (c B C D g h)) = axiom

```

7.1.9.4 Категорія функторів

Визначення 128. (Category of Functors).

```

Func (X Y: precategory): precategory
  = ((Ob, Hom), id, c, HomSet, L, R, Q) where
Ob: U = catfunctor X Y
Hom (A B: Ob): U = ntrans X Y A B
id (A: Ob): ntrans X Y A A = axiom
c (A B C: Ob) (f: Hom A B) (g: Hom B C): Hom A C = axiom
HomSet (A B: Ob): isSet (Hom A B) = axiom
L (A B: Ob) (f: Hom A B): Path (Hom A B) (c A A B (id A) f) f = axiom
R (A B: Ob) (f: Hom A B): Path (Hom A B) (c A B B f (id B)) f = axiom
Q (A B C D: Ob) (f: Hom A B) (g: Hom B C) (h: Hom C D)
  : Path (Hom A D) (c A C D (c A B C f g) h)
    (c A B D f (c B C D g h)) = axiom

```

7.1.10 k-морфізми

Визначення 129. (k-Morphism). The k-morphism is defined as morphism between $(k - 1)$ -morphism. The base of induction, the 0-morphism is defined as object of 1-category, which is precategory.

```

equiv: U
functor (C D: cat): U
ntrans (C D: cat) (F G: functor C D): U
modification (C D: cat) (F G: functor C D) (I J: ntrans C D F G): U

```

І так далі.

7.1.11 2-категорія

Визначення 130. (2-Category).

```

Cat2 : U
  = (Ob: U)
  * (Hom: (A B: Ob) -> U)
  * (Hom2: (A B: Ob) -> (C F: Hom A B) -> U)
  * (id: (A: Ob) -> Hom A A)
  * (id2: (A: Ob) -> (B: Hom A A) -> Hom2 A A B B)
  * (c: (A B C: Ob) (f: Hom A B) (g: Hom B C) -> Hom A C)
  * (c2: (A B: Ob) (X Y Z: Hom A B)
    (f: Hom2 A B X Y) (g: Hom2 A B Y Z) -> Hom2 A B X Z)

```


7.1.12 Аддитивна категорія**7.1.13 Група Гротендіка****7.1.14 Категорія Гротендіка****7.2 Теорія топосів**

One can admit two topos theory lineages. One lineage takes its roots from published by Jean Leray in 1945 initial work on sheaves and spectral sequences. Later this lineage was developed by Henri Paul Cartan, André Weil. The peak of lineage was settled with works by Jean-Pierre Serre, Alexander Grothendieck, and Roger Godement.

Second remarkable lineage take its root from William Lawvere and Myles Tierney. The main contribution is the reformulation of Grothendieck topology by using subobject classifier.

Визначення 131. (Categorical Pullback). The pullback of the cospan $A \xrightarrow{f} C \xleftarrow{g} B$ is a object $A \times_C B$ with morphisms $pb_1 : \times_C \rightarrow A$, $pb_2 : \times_C \rightarrow B$, such that diagram commutes:

$$\begin{array}{ccc} A \times_C B & \xrightarrow{pb_2} & B \\ \downarrow f & \searrow & \downarrow pb_1 \\ A & \xrightarrow{g} & C \end{array}$$

Pullback (\times_C, pb_1, pb_2) must be universal, means for any (D, q_1, q_2) for which diagram also commutes there must exists a unique $u : D \rightarrow \times_C$, such that $pb_1 \circ u = q_1$ and $pb_2 \circ u = q_2$.

```

homTo (C: precategory) (X: carrier C): U
  = (Y: carrier C) * hom C Y X
cospan (C: precategory): U
  = (X: carrier C) * ( _: homTo C X) * homTo C X
cospanCone (C: precategory) (D: cospan C): U
  = (W: carrier C) * hasCospanCone C D W
cospanConeHom (C: precategory) (D: cospan C)
  (E1 E2: cospanCone C D) : U
  = (h: hom C E1.1 E2.1) * isCospanConeHom C D E1 E2 h
isPullback (C: precategory) (D: cospan C) (E: cospanCone C D) : U
  = (h: cospanCone C D) -> isContr (cospanConeHom C D h E)
hasPullback (C: precategory) (D: cospan C) : U
  = (E: cospanCone C D) * isPullback C D E

```

Визначення 132. (Category Functor). Let A and B be precategories. A functor $F : A \rightarrow B$ consists of: (i) A function $F_{Ob} : Ob_A \rightarrow Ob_B$; (ii) for each $a, b : Ob_A$, a function $F_{Hom} : Hom_A(a, b) \rightarrow Hom_B(F_{Ob}(a), F_{Ob}(b))$; (iii) for each $a : Ob_A$, $F_{Ob}(1_a) = 1_{F_{Ob}(a)}$; (iv)

for $a, b, c : \text{Ob}_A$ and $f : \text{Hom}_A(a, b)$ and $g : \text{Hom}_A(b, c)$, $F(g \circ f) = F_{\text{Hom}}(g) \circ F_{\text{Hom}}(f)$.

```
catfunctor (A B: precategory): U
= (ob: carrier A -> carrier B)
* (mor: (x y: carrier A) -> hom A x y -> hom B (ob x) (ob y))
* (id: (x: carrier A) -> Path (hom B (ob x) (ob x))
  (mor x x (path A x)) (path B (ob x)))
* ((x y z: carrier A) -> (f: hom A x y) -> (g: hom A y z) ->
  Path (hom B (ob x) (ob z)) (mor x z (compose A x y z f g))
  (compose B (ob x) (ob y) (ob z) (mor x y f) (mor y z g)))
```

Визначення 133. (Terminal Object). Is such object Ob_C , that

$$\prod_{x, y: \text{Ob}_C} \text{isContr}(\text{Hom}_C(y, x)).$$

```
isTerminal (C: precategory) (y: carrier C): U
= (x: carrier C) -> isContr (hom C x y)
terminal (C: precategory): U
= (y: carrier C) * isTerminal C y
```

7.2.1 Теорія множин

Here is given the ∞ -groupoid model of sets.

Визначення 134. (Mere proposition, PROP). A type P is a mere proposition if for all $x, y : P$ we have $x = y$:

$$\text{isProp}(P) = \prod_{x, y: P} (x = y).$$

Визначення 135. (0-type). A type A is a 0-type is for all $x, y : A$ and $p, q : x =_A y$ we have $p = q$.

Визначення 136. (1-type). A type A is a 1-type if for all $x, y : A$ and $p, q : x =_A y$ and $r, s : p =_{=A} q$, we have $r = s$.

Визначення 137. (A set of elements, SET). A type A is a SET if for all $x, y : A$ and $p, q : x = y$, we have $p = q$:

$$\text{isSet}(A) = \prod_{x, y: A} \prod_{p, q: x=y} (p = q).$$

Визначення 138. `data N = Z | S (n: N)`

```
n_grpd (A: U) (n: N): U = (a b: A) -> rec A a b n where
  rec (A: U) (a b: A) : (k: N) -> U
    = split { Z -> Path A a b ; S n -> n_grpd (Path A a b) n }
```

```
isContr (A: U): U = (x: A) * ((y: A) -> Path A x y)
isProp (A: U): U = n_grpd A Z
isSet (A: U): U = n_grpd A (S Z)
PROP : U = (X:U) * isProp X
SET : U = (X:U) * isSet X
```

Визначення 139. (Π -Contractability). If fiber is set then path space between any sections is contractible.

```
setPi (A: U) (B: A -> U) (h: (x: A) -> isSet (B x)) (f g: Pi A B)
  (p q: Path (Pi A B) f g)
  : Path (Path (Pi A B) f g) p q
```

Визначення 140. (Σ -Contractability). If fiber is set then Σ is set.

```
setSig (A:U) (B: A -> U) (base: isSet A)
  (fiber: (x:A) -> isSet (B x)) : isSet (Sigma A B)
```

Визначення 141. (Unit type, 1). The unit 1 is a type with one element.

```
data unit = tt
unitRec (C: U) (x: C): unit -> C = split tt -> x
unitInd (C: unit -> U) (x: C tt): (z:unit) -> C z
  = split tt -> x
```

Теорема 25. (Category of Sets, **Set**). Sets forms a Category. All compositional theorems proved by using reflection rule of internal language. The proof that Hom forms a set is taken through Π -contractability.

```
Set: precategory = ((Ob, Hom), id, c, HomSet, L, R, Q) where
  Ob: U = SET
  Hom (A B: Ob): U = A.1 -> B.1
  id (A: Ob): Hom A A = idfun A.1
  c (A B C: Ob) (f: Hom A B) (g: Hom B C): Hom A C
    = o A.1 B.1 C.1 g f
  HomSet (A B: Ob): isSet (Hom A B) = setFun A.1 B.1 B.2
  L (A B: Ob) (f: Hom A B): Path (Hom A B) (c A A B (id A) f) f
    = refl (Hom A B) f
  R (A B: Ob) (f: Hom A B): Path (Hom A B) (c A B B f (id B)) f
    = refl (Hom A B) f
  Q (A B C D: Ob) (f: Hom A B) (g: Hom B C) (h: Hom C D)
    : Path (Hom A D) (c A C D (c A B C f g) h)
      (c A B D f (c B C D g h))
    = refl (Hom A D) (c A B D f (c B C D g h))
```

Topos theory extends category theory with notion of topological structure but reformulated in a categorical way as a category of sheaves on a site or as one that has cartesian closure and subobject classifier. We give here two definitions.

7.2.2 Топологічна структура

Визначення 142. (Topology). The topological structure on A (or topology) is a subset $S \in A$ with following properties: i) any finite union of subsets of S is belong to S ; ii) any finite intersection of subsets of S is belong to S . Subsets of S are called open sets of family S .

```

Structure topology (A : Type) := {
  open  := (A -> Prop) -> Prop;
  empty_open: open (empty _);
  full_open:  open (full _);
  inter_open: forall u,
    open u -> forall v, open v
      -> open (inter A u v) ;
  union_open: forall s, (subset _ s open)
      -> open (union A s) }.

```

For fully functional general topology theorems and Zorn lemma you can refer to the Coq library ¹topology by Daniel Schepler.

7.2.3 Топос Гротендіка

Grothendieck Topology is a calculus of coverings which generalizes the algebra of open covers of a topological space, and can exist on much more general categories. There are three variants of Grothendieck topology definition: i) sieves; ii) coverage; iii) covering families. A category have one of these three is called a Grothendieck site.

Examples: Zariski, flat, étale, Nisnevich topologies.

A sheaf is a presheaf (functor from opposite category to category of sets) which satisfies patching conditions arising from Grothendieck topology, and applying the associated sheaf functor to presheaf forces compliance with these conditions.

The notion of Grothendieck topos is a geometric flavour of topos theory, where topos is defined as category of sheaves on a Grothendieck site with geometric morphisms as adjoint pairs of functors between topoi, that satisfy exactness properties. [16]

As this flavour of topos theory uses category of sets as a prerequisite, the formal construction of set topos is crucial in doing sheaf topos theory.

Визначення 143. (Sieves). Sieves are a family of subfunctors

$$R \subset \text{Hom}_C(_, U), U \in C,$$

such that following axioms hold: i) (base change) If $R \subset \text{Hom}_C(_, U)$ is covering and $\phi : V \rightarrow U$ is a morphism of C , then the subfunctor

$$\phi^{-1}(R) = \{\gamma : W \rightarrow V \mid \phi \cdot \gamma \in R\}$$

is covering for V ; ii) (local character) Suppose that $R, R' \subset \text{Hom}_C(_, U)$ are subfunctors and R is covering. If $\phi^{-1}(R')$ is covering for all $\phi : V \rightarrow U$ in R , then R' is covering; iii) $\text{Hom}_C(_, U)$ is covering for all $U \in C$.

¹<https://github.com/verimath/topology>

Визначення 144. (Coverage). A coverage is a function assigning to each Ob_C the family of morphisms $\{f_i : U_i \rightarrow U\}_{i \in I}$ called covering families, such that for any $g : V \rightarrow U$ exist a covering family $\{h : V_j \rightarrow V\}_{j \in J}$ such that each composite $h_j \circ g$ factors some f_i :

$$\begin{array}{ccc} V_j & \xrightarrow{k} & U_i \\ \downarrow h & & \downarrow f_i \\ V & \xrightarrow{g} & U \end{array}$$

```
Co (C: precategory) (cod: carrier C) : U
= (dom: carrier C)
* (hom C dom cod)

Delta (C: precategory) (d: carrier C) : U
= (index: U)
* (index -> Co C d)

Coverage (C: precategory): U
= (cod: carrier C)
* (fam: Delta C cod)
* (coverings: carrier C -> Delta C cod -> U)
* (coverings cod fam)
```

Визначення 145. (Grothendieck Topology). Suppose category C has all pullbacks. Since C is small, a pretopology on C consists of families of sets of morphisms

$$\{\phi_\alpha : U_\alpha \rightarrow U\}, U \in C,$$

called covering families, such that following axioms hold: i) suppose that $\phi_\alpha : U_\alpha \rightarrow U$ is a covering family and that $\psi : V \rightarrow U$ is a morphism of C . Then the collection $V \times_U U_\alpha \rightarrow V$ is a cvering family for V . ii) If $\{\phi_\alpha : U_\alpha \rightarrow U\}$ is covering, and $\{\gamma_{\alpha,\beta} : W_{\alpha,\beta} \rightarrow U_\alpha\}$ is covering for all α , then the family of composites

$$W_{\alpha,\beta} \xrightarrow{\gamma_{\alpha,\beta}} U_\alpha \xrightarrow{\phi_\alpha} U$$

is covering; iii) The family $\{1 : U \rightarrow U\}$ is covering for all $U \in C$.

Визначення 146. (Site). Site is a category having either a coverage, grothendieck topology, or sieves.

```
site (C: precategory): U
= (C: precategory) * Coverage C
```

Визначення 147. (Presheaf). Presheaf of a category C is a functor from opposite category to category of sets: $C^{\text{op}} \rightarrow \text{Set}$.

```
presheaf (C: precategory): U
= catfunctor (opCat C) Set
```

Визначення 148. (Presheaf Category, **PSh**). Presheaf category **PSh** for a site C is category where objects are presheaves and morphisms are natural transformations of presheaf functors.

Визначення 149. (Sheaf). Sheaf is a presheaf on a site. In other words a presheaf $F : C^{op} \rightarrow \mathbf{Set}$ such that the canonical map of inverse limit

$$F(U) \rightarrow \varprojlim_{V \rightarrow U \in R} F(V)$$

is an isomorphism for each covering sieve $R \subset \text{Hom}_C(_, U)$. Equivalently, all induced functions

$$\text{Hom}_C(\text{Hom}_C(_, U), F) \rightarrow \text{Hom}_C(R, F)$$

should be bijections.

```
sheaf (C: precategory): U
= (S: site C)
  * presheaf S.1
```

Визначення 150. (Sheaf Category, **Sh**). Sheaf category **Sh** is a category where objects are sheaves and morphisms are natural transformation of sheaves. Sheaf category is a full subcategory of category of presheaves **PSh**.

Визначення 151. (Grothendieck Topos). Topos is the category of sheaves **Sh**(C, J) on a site C with topology J .

Теорема 26. (Giraud). A category C is a Grothendieck topos iff it has following properties: i) has all finite limits; ii) has small disjoint coproducts stable under pullbacks; iii) any epimorphism is coequalizer; iv) any equivalence relation $R \rightarrow E$ is a kernel pair and has a quotient; v) any coequalizer $R \rightarrow E \rightarrow Q$ is stably exact; vi) there is a set of objects that generates C .

Визначення 152. (Geometric Morphism). Suppose that C and D are Grothendieck sites. A geometric morphism

$$f : \mathbf{Sh}(C) \rightarrow \mathbf{Sh}(D)$$

consist of functors $f_* : \mathbf{Sh}(C) \rightarrow \mathbf{Sh}(D)$ and $f^* : \mathbf{Sh}(D) \rightarrow \mathbf{Sh}(C)$ such that f^* is left adjoint to f_* and f^* preserves finite limits. The left adjoint f^* is called the inverse image functor, while f_* is called the direct image. The inverse image functor f^* is left and right exact in the sense that it preserves all finite colimits and limits, respectively.

Визначення 153. (Cohesive Topos). A topos E is a cohesive topos over a base topos S , if there is a geometric morphism $(p^*, p_*) : E \rightarrow S$, such that: i) exists adjunction $p^! \vdash p_*$ and $p^! \dashv p^*$; ii) p^* and $p^!$ are full faithful; iii) $p_!$ preserves finite products. This quadruple defines adjoint triple:

$$\int \dashv \vdash \dashv \#$$

7.2.4 Елементарний топос

Giraud theorem was a synonymical topos definition involved only topos properties but not a site properties. That was step forward on predicative definition. The other step was made by Lawvere and Tierney, by removing explicit dependance on categorical model of set theory (as category of set is used in definition of presheaf). This information was hidden into subobject classifier which was well defined through categorical pullback and property of being cartesian closed (having lambda calculus as internal language).

Elementary topos doesn't involve 2-categorical modeling, so we can construct set topos without using functors and natural transformations (what we need in geometrical topos theory flavour). This flavour of topos theory more suited for logic needs rather than geometry, as its set properties are hidden under the predicative predicative pullback definition of subobject classifier rather than functorial notation of presheaf functor. So we can simplify proofs at the homotopy levels, not to lift everything to 2-categorical model.

Визначення 154. (Monomorphism). An morphism $f : Y \rightarrow Z$ is a monic or mono if for any object X and every pair of parallel morphisms $g_1, g_2 : X \rightarrow Y$ the

$$f \circ g_1 = f \circ g_2 \rightarrow g_1 = g_2.$$

More abstractly, f is mono if for any X the $\text{Hom}(X, _)$ takes it to an injective function between hom sets $\text{Hom}(X, Y) \rightarrow \text{Hom}(X, Z)$.

```
mono (P: precategory) (Y Z: carrier P) (f: hom P Y Z): U
  = (X: carrier P) (g1 g2: hom P X Y)
  -> Path (hom P X Z) (compose P X Y Z g1 f)
              (compose P X Y Z g2 f)
  -> Path (hom P X Y) g1 g2
```

Визначення 155. (Subobject Classifier [17]). In category C with finite limits, a subobject classifier is a monomorphism $\text{true} : 1 \rightarrow \Omega$ out of terminal object 1 , such that for any mono $U \rightarrow X$ there is a unique morphism $\chi_U : X \rightarrow \Omega$ and pullback diagram:

$$\begin{array}{ccc} U & \xrightarrow{k} & 1 \\ \downarrow & & \downarrow \text{true} \\ X \times U & \xrightarrow{\chi_U} & \Omega \end{array}$$

```
subobjectClassifier (C: precategory): U
  = (omega: carrier C)
  * (end: terminal C)
  * (trueHom: hom C end.1 omega)
  * (chi: (V X: carrier C) (j: hom C V X) -> hom C X omega)
  * (square: (V X: carrier C) (j: hom C V X) -> mono C V X j
    -> hasPullback C (omega, (end.1, trueHom), (X, chi V X j)))
  * ((V X: carrier C) (j: hom C V X) (k: hom C X omega)
```

```

-> mono C V X j
-> hasPullback C (omega,(end.1,trueHom),(X,k))
-> Path (hom C X omega) (chi V X j) k

```

Теорема 27. (Category of Sets has Subobject Classifier).

Визначення 156. (Cartesian Closed Categories). The category C is called cartesian closed if exists all: i) terminals; ii) products; iii) exponentials. Note that this definition lacks beta and eta rules which could be found in embedding **MLTT**.

```

isCCC (C: precategory): U
= (Exp: (A B: carrier C) -> carrier C)
* (Prod: (A B: carrier C) -> carrier C)
* (Apply: (A B: carrier C) -> hom C (Prod (Exp A B) A) B)
* (P1: (A B: carrier C) -> hom C (Prod A B) A)
* (P2: (A B: carrier C) -> hom C (Prod A B) B)
* (Term: terminal C)
* unit

```

Теорема 28. (Category of Sets is cartesian closed). As you can see from exp and pro we internalize Π and Σ types as SET instances, the isSet predicates are provided with contractability. Existence of terminals is proved by propPi. The same technique you can find in **MLTT** embedding.

```

cartesianClosure : isCCC Set
= (expo,prod,appli,proj1,proj2,term,tt) where
  exp (A B: SET): SET = (A.1 -> B.1, setFun A.1 B.1 B.2)
  pro (A B: SET): SET = (prod A.1 B.1, setSig A.1 (\(_ : A.1)
    -> B.1) A.2 (\(_ : A.1) -> B.2))
  expo: (A B: SET) -> SET = \ (A B: SET) -> exp A B
  prod: (A B: SET) -> SET = \ (A B: SET) -> pro A B
  appli: (A B: SET) -> hom Set (pro (exp A B) A) B
    = \ (A B: SET) -> \ (x: (pro (exp A B) A).1) -> x.1 x.2
  proj1: (A B: SET) -> hom Set (pro A B) A
    = \ (A B: SET) (x: (pro A B).1) -> x.1
  proj2: (A B: SET) -> hom Set (pro A B) B
    = \ (A B: SET) (x: (pro A B).1) -> x.2
  unitContr (x: SET) (f: x.1 -> unit) : isContr (x.1 -> unit)
    = (f, \ (z: x.1 -> unit) -> propPi x.1 (\ (_:x.1) -> unit)
      (\ (x:x.1) -> propUnit) f z)
  term: terminal Set = ((unit,setUnit),
    \ (x: SET) -> unitContr x (\ (z: x.1) -> tt))

```

Note that rules of cartesian closure forms a type theoretical language called lambda calculus.

Визначення 157. (Elementary Topos). Topos is a precategory which is cartesian closed and has subobject classifier.

```

Topos (cat: precategory) : U
= (cartesianClosure: isCCC cat)
* subobjectClassifier cat

```


Теорема 29. (Topos Definitions). Any Grothendieck topos is an elementary topos too. The proof is slightly based on results of Giraud theorem.

Теорема 30. (Category of Sets forms a Topos). There is a cartesian closure and subobject classifier for a category of sets.

```
internal : Topos Set
        = (cartesianClosure, hasSubobject)
```

Теорема 31. (Freyd). Main theorem of topos theory [18]. For any topos C and any $b : \text{Ob}_C$ relative category $C \downarrow b$ is also a topos. And for any arrow $f : a \rightarrow b$ inverse image functor $f^* : C \downarrow b \rightarrow C \downarrow a$ has left adjoint \sum_f and right adjoint \prod_f .

7.2.5 Висновки

We gave here constructive definition of topology as finite unions and intersections of open subsets. Then make this definition categorically compatible by introducing Grothendieck topology in three different forms: sieves, coverage, and covering families. Then we defined an elementary topos and introduce category of sets, and proved that **Set** is cartesian closed, has object classifier and thus a topos.

This intro could be considered as a formal introduction to topos theory (at least of the level of first chapter) and you may evolve this library to your needs or ask to help porting or developing your application of topos theory to a particular formal construction.

7.3 Алгебраїчна топологія

7.3.1 Теорія груп

7.3.2 Простори

7.3.2.1 Сімпліціальні

7.3.2.2 CW-комплекси

The definition of homotopy groups, a special role is played by the inclusions $S^{n-1} \hookrightarrow D^n$. We study spaces obtained iterated attachments of D^n along S^{n-1} .

Визначення 158. (Attachment). Attaching n -cell to a space X along a map $f : S^{n-1} \rightarrow X$ means taking a pushout figure.

$$\begin{array}{ccc} S^{n-1} & \xrightarrow{k} & X \\ \downarrow & & \downarrow \\ D^n & \xrightarrow{g} & \cup_f D^n \end{array}$$

where the notation $X \cup_f D^n$ means result depends on homotopy class of f .

Визначення 159. (CW-Complex). Inductively. The only CW-complex of dimension -1 is \emptyset . A CW-complex of dimension $\leq n$ on X is a space X obtained by attaching a collection of n -cells to a CW-complex of dimension $n-1$.

A CW-complex is a space X which is the colimit(X_i) of a sequence $X_{-1} = \emptyset \hookrightarrow X_0 \hookrightarrow X_1 \hookrightarrow X_2 \hookrightarrow \dots X$ of CW-complexes X_i of dimension $\leq n$, with X_{i+1} obtained from X_i by i -cell attachments. Thus if X is a CW-complex, it comes with a filtration

$$\emptyset \hookrightarrow X_0 \hookrightarrow X_1 \hookrightarrow X_2 \hookrightarrow \dots X$$

where X_i is a CW-complex of dimension $\leq i$ called the i -skeleton, and hence the filtration is called the skeletal filtration.

7.3.3 Теорія гомотопій

7.3.3.1 Простори петель

Визначення 160. (Pointed Space). A pointed type (A, a) is a type $A : \mathcal{U}$ together with a point $a : A$, called its basepoint.

```
pointed:  $\mathcal{U} = (A : \mathcal{U}) * A$ 
point (A: pointed):  $A.1 = A.2$ 
space (A: pointed):  $\mathcal{U} = A.1$ 
```

Визначення 161. (Loop Space).

$$\Omega(A, a) =_{\text{def}} ((a =_A a), \text{refl}_A(a)).$$

```
omega1 (A: pointed) : pointed
= (Path (space A) (point A) (point A), refl A.1 (point A))
```

Визначення 162. (n -Loop Space).

$$\begin{cases} \Omega^0(A, a) =_{\text{def}} (A, a) \\ \Omega^{n+1}(A, a) =_{\text{def}} \Omega^n(\Omega(A, a)) \end{cases}$$

```
omega : nat -> pointed -> pointed = split
zero -> idfun pointed
succ n -> \ (A: pointed) -> omega n (omega1 A)
```

7.3.3.2 Обчислення гомотопічних груп

Визначення 163. (n -th Homotopy Group of m -Sphere).

$$\pi_n S^m = \|\Omega^n(S^m)\|_0.$$

```

piS (n: nat): (m: nat) -> U = split
  zero  -> sTrunc (space (omega n (bool,false)))
  succ x -> sTrunc (space (omega n (Sn (succ x),north)))

```

Теорема 32. $(\Omega(S^1) = \mathbb{Z})$.

```

data S1 = base
  | loop <i> [ (i=0) -> base ,
              (i=1) -> base ]

loopS1 : U = Path S1 base base

encode (x:S1) (p:Path S1 base x)
  : helix x
  = subst S1 helix base x p zeroZ

decode : (x:S1) -> helix x -> Path S1 base x = split
  base -> loopIt
  loop @ i -> rem @ i where
    p : Path U (Z -> loopS1) (Z -> loopS1)
      = <j> helix (loop1@j) -> Path S1 base (loop1@j)
    rem : PathP p loopIt loopIt
      = corFib1 S1 helix (\(x:S1)->Path S1 base x) base
      loopIt loopIt loop1 (\(n:Z) ->
        comp (<i> Path loopS1 (oneTurn (loopIt n))
              (loopIt (testIsoPath Z Z sucZ predZ
                          sucpredZ predsucZ n @ i)))
              (<i>(lem1It n)@-i) [])

loopS1eqZ : Path U Z loopS1
  = isoPath Z loopS1 (decode base) (encode base)
  sectionZ retractZ

```

7.3.3.3 Розшарування Хопфа

This article defines the Hopf Fibration (HF), the concept of splitting the S^3 sphere onto the twisted cartesian product of spheres S^1 and S^2 . Basic HF applications are: 1) HF is a Fiber Bundle structure of Dirac Monopole; 2) HF is a map from the S^3 in H to the Bloch sphere; 3) If HF is a vector field in R^3 then there exists a solution to compressible non-viscous Navier-Stokes equations. It was figured out that there are only 4 dimensions of fibers with Hopf invariant 1, namely S^0, S^1, S^3, S^7 .

This article consists of two parts: 1) geometric visualization of projection of S^3 to S^2 (frontend); 2) formal topological version of HF in cubical type theory (backend). Consider this a basic intro and a summary of results or companion guide to the chapter 8.5 from HoTT.

Геометрична інтерпретація

Let's imagine S^3 as smooth differentiable manifold and build a projection onto the display as if demoscene is still alive.

Визначення 164. (Sphere S^3). Like a little baby in \mathbb{R}^4 :

$$S^3 = \{(x_0, x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^4 : \sum_{i=0}^3 x_i^2 = 1\};$$

after math classes in quaternions \mathbb{H} :

$$S^3 = \{x \in \mathbb{H} : \|x\| = 1\}.$$

Визначення 165. (Locus). The S^3 is realized as a disjoint union of circular fibers in Hopf coordinates $(\eta, \theta_1, \theta_2)$:

$$\begin{cases} x_0 = \cos(\theta_1)\sin(\eta), \\ x_1 = \sin(\theta_1)\sin(\eta), \\ x_2 = \cos(\theta_2)\cos(\eta), \\ x_3 = \sin(\theta_2)\cos(\eta). \end{cases}$$

Where $\eta \in [0, \frac{\pi}{2}]$ and $\theta_{1,2} \in [0, 2\pi]$.

Визначення 166. (Mapping on S^2). A mapping of the Locus to the S^2 has points on the circles parametrized by θ_2 :

$$\begin{cases} x = \sin(2\eta)\cos(\theta_1), \\ y = \sin(2\eta)\sin(\theta_1), \\ z = \cos(2\eta). \end{cases}$$

```
var fiber = new THREE.Curve(),
    color = sphericalCoords.color;

fiber.getPoint = function(t) {
  var eta = sphericalCoords.eta,
      phi = sphericalCoords.phi,
      theta = 2 * Math.PI * t;
  var x1 = Math.cos(phi+theta) * Math.sin(eta/2),
      x2 = Math.sin(phi+theta) * Math.sin(eta/2),
      x3 = Math.cos(phi-theta) * Math.cos(eta/2),
      x4 = Math.sin(phi-theta) * Math.cos(eta/2);
  var m = mag([x1,x2,x3]),
      r = Math.sqrt((1-x4)/(1+x4));
  return new THREE.Vector3(r*x1/m, r*x2/m, r*x3/m);
};
```

Гомотопічна інтерпретація

Can we reason about spheres without a metric? Yes! But can we do this in a constructive way? Also yes.

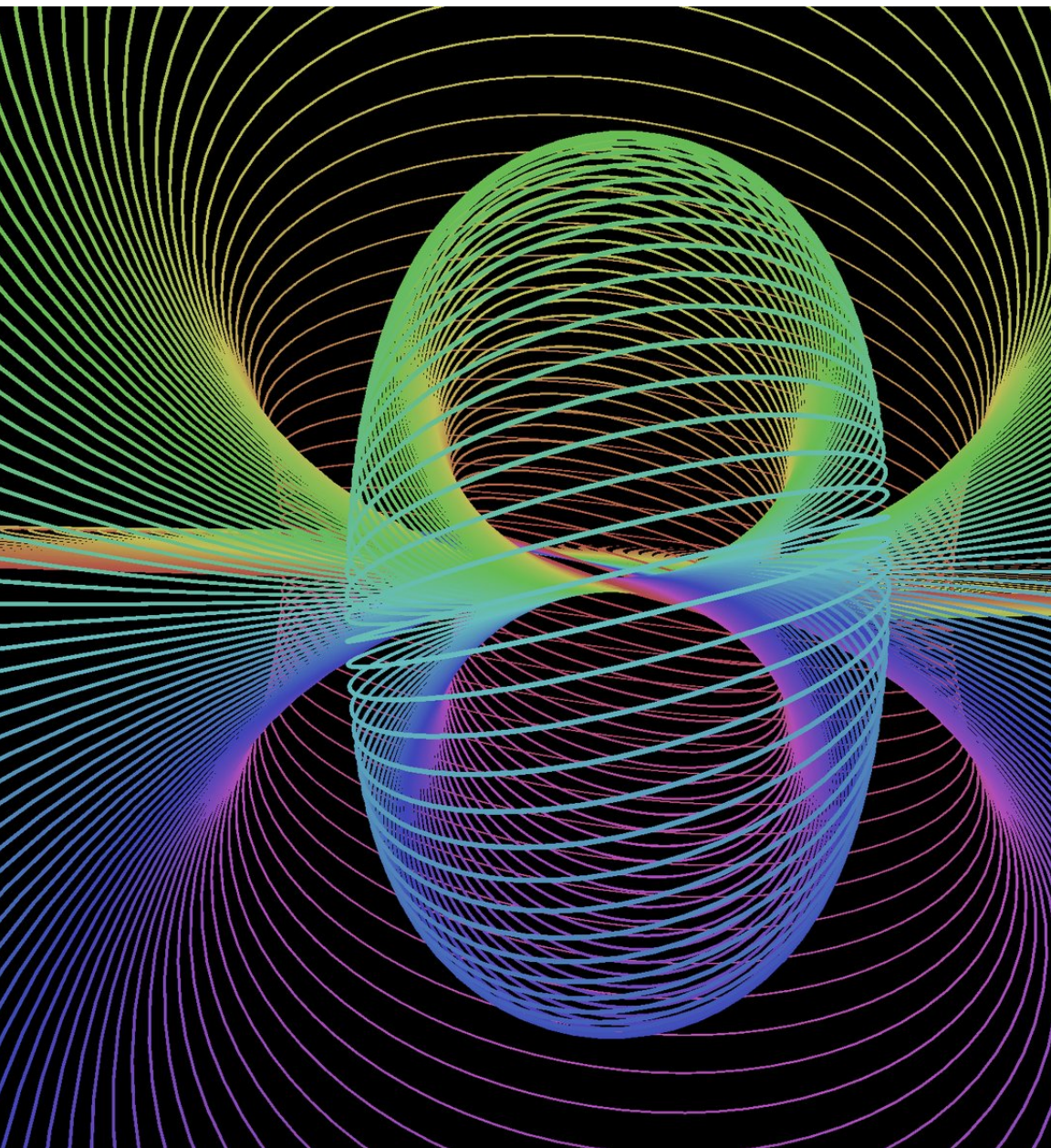


Рис. 7.1

: Розшарування Хопфа

7.3.3.4 Розшарування Хопфа

Приклад 3. (S^3 Hopf Fiber). Вперше розшарування Хопфа трьохвимірної сфери було формалізовано Джильямом Брунері. Тут дається його модифікована версія.

```

rot: (x : S1) -> Path S1 x x = split
  base -> loop1
  loop @ i -> constSquare S1 base loop1 @ i

mu : S1 -> equiv S1 S1 = split
  base -> idEquiv S1
  loop @ i -> equivPath S1 S1 (idEquiv S1)
    (idEquiv S1) (<j> \ (x : S1) -> rot x @ j) @ i

H : S2 -> U = split
  north -> S1
  south -> S1
  merid x @ i -> ua S1 S1 (mu x) @ i

total : U = (c : S2) * H c

```

Визначення 167. (H-space). H-space over a carrier A is a tuple

$$H_A = \begin{cases} A : \mathcal{U} \\ e : A \\ \mu : A \rightarrow A \rightarrow A \\ \beta : (a : A) \rightarrow \Sigma(\mu(e, a) = a)(\mu(a, e) = a) \end{cases}$$

.

Теорема 33. (Hopf Fibrations). There are fiber bundles: (S^0, S^1, p, S^1) , (S^1, S^3, p, S^2) , (S^3, S^7, p, S^4) , (S^7, S^{15}, p, S^8) .

Визначення 168. (Hopf Invariant). Let $\phi : S^{2n-1} \rightarrow S^n$ a continuous map. Then homotopy pushout (cofiber) of ϕ is $\text{cofib}(\phi) = S^n \cup_{\phi} \mathbb{D}^{2n}$ has ordinary cohomology

$$H^k(\text{cofib}(\phi), \mathbb{Z}) = \begin{cases} \mathbb{Z} & \text{for } k = n, 2n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Hence for α, β generators of the cohomology groups in degree n and $2n$, respectively, there exists an integer $h(\phi)$ that expresses the **cup product** square of α as a multiple of β — $\alpha \sqcup \alpha = h(\phi) \cdot \beta$. This integer $h(\phi)$ is called Hopf invariant of ϕ .

Теорема 34. (Adams, Atiyah). Hopf Fibrations are only maps that have Hopf invariant 1.

7.3.4 Теорія гомологій

7.4 Диференціальна геометрія

7.4.1 V-многовиди

7.4.2 G-структури

7.4.3 H-простори

Додаткові матеріали

Присвячується майстрам
тибетського буддизму

Атіша, Нагарджуна, Лонгченпа

У додатках ми використаємо три різних мови, та покаже два застосування формальних мов: 1) формальна філософія (на мові `OnTS`; 2) формальний ввід-вивід для системної інженерії (на двох промислових мовах `Erlang` та `OCaml`).

Вступне слово

8.1 Формалізація мадх'яміки

Сейчас я дам вам почувствовать вкус формальной философии по-настоящему! А то, вам может показаться, что это канал по формальной математике, а не формальной философии. Я же считаю, что если формальная философия не опирается на формальную математику, то грош цена такой формальной философии.

```
module buddhism where
import path
```

Сегодня мы будем формализировать понятие недвойственности в буддизме, которое связано сразу со многими концепциями на уровнях Сутры, Тантры и Дзогчена: понятием взаимозависимого возникновения и понятием пустотности всех феноменов (Сутра Праджняпарамиты). Классический пример с расчленением тела ставит вопрос, когда тело перестает быть человеком-существом, если от него начать отрубывать куски мяса (мы буддисты любим и лиеем такие мысленные образы-эксперименты) или другими словами, чтобы отличить тело от нетела, нам нужен двуместный предикат (семья типов), функция, которая может идентифицировать конкретные два эклемпляры тела. Фактически речь идет об индентификации двух объектов, т.е. обычном типе-равенстве Мартина-Лёфа.

За фреймворк возьмем концепты Готтлоба Фреге, согласно определению, концепт — это предикат над объектом или, другими словами, Пи-тип Мартина-Лёфа, индексированный тип, семья типов, тривиальное расслоение и т.д. Где объект x из o принадлежит концепту, только если сам концепт, параметризованный этим объектом, населен $p(o) : U$ (где $p : \text{concept } o$).

```
concept (o: U): U
= o -> U
```

Концепт p должен предоставлять пример или контрпример в различении, т.е. чтобы определить тело это или не-тело еще, пока мы его расчлняем, нам нужно как минимум два куска: тело и не-тело как примеры идентификации. Таким образом, недвойственность может быть представлена, как равенство между всеми расслоениями (предекатами над объектами).

```
nondual (o: U) (p: concept o): U
= (x y: o) -> Path U (p x) (p y)
```

Итак, недвойственность устраняет различие между примерами и контрпримерами на примордиальном уровне мандалы MLTT, иными словами идентифицирует все концепты. Сама же идентификация классов объектов, которые принадлежат разным концептам — это условие, сжимающее все объекты в точку, или стягиваемое пространство, вершина конуса мандалы MLTT, или, другими словами, пустотность всех феноменов.

```
allpaths (o: U): U
= (x y: o) -> Path o x y
```

Формулировка буддийской теоремы недвойственности которая распространяется для всех типов учеников (тупых, средних и смысленных), может звучать так: недвойственность концепта есть способ идентификации его объектов. Сформулируем эту же теорему в другую сторону: способ идентификации объектов задает предикат недвойственности концептов. Туда — $((p: \text{concept } o) \rightarrow \text{nondual } o \ p) \rightarrow \text{allpaths } o$, Сюда — $\text{allpaths } o \rightarrow ((p: \text{concept } o) \rightarrow \text{nondual } o \ p)$. И докажем ее! Как видно из сигнатур нам всего-лишь надо построить функцию транспорта между двумя пространствами путей: $(p \ x) =_{\perp} (p \ y)$ и $x =_o y$. Воспользуемся приведением пути в стрелку (`coerce`) и конгруэнтностью (`cong`) из базовой библиотеки.

```
encode (o:U): ((p: concept o) -> nondual o p) -> allpaths o
= \nd: (p: concept o) -> nondual o p) (a b: o)
-> coerce(Path o a a)(Path o a b)(nd(\(z:o)->Path o a z)a b)(refl o a)
```

```
decode (o:U): allpaths o -> ((p: concept o) -> nondual o p)
= \all: allpaths o)(p: concept o)(x y: o) -> cong o U p x y (all x y)
```

Как видите, теоремка о пустотности всех феноменов получилась на пару строчек, которые демонстрируют: 1) основы формальной философии и быстрый вкат; 2) хороший пример к первой главе HoTT на пространство путей и модуль `path`.

8.2 Формалізація вводу-виводу для Coq/OCaml

```
CoInductive Co (E : Effect.t) : Type -> Type :=
| Bind : forall (A B : Type), Co E A -> (A -> Co E B) -> Co E B
| Split : forall (A : Type), Co E A -> Co E A -> Co E A
| Join : forall (A B : Type), Co E A -> Co E B -> Co E (A * B).
| Ret : forall (A : Type) (x : A), Co E A
| Call : forall (command : Effect.command E),
      Co E (Effect.answer E command)
```

```
Definition run (argv : list LString.t) : Co effect unit :=
  ido! log (LString.s "What is your name?") in
  ile! name := read_line in
  match name with
  | None => ret tt
  | Some name => log (LString.s "Hello " ++ name ++ LString.s "!\")
  end.
```

Parameter infinity : nat.

```
Definition eval {A} (x : Co effect A) : Lwt.t A := eval_aux infinity x.
```

```
Fixpoint eval_aux {A} (s : nat) (x : Co effect A) : Lwt.t A :=
  match s with
  | 0 => error tt
  | S s =>
    match x with
    | Bind _ _ x f => Lwt.bind (eval_aux s x) (fun v_x => eval_aux s (f v_x))
    | Split _ x y => Lwt.choose (eval_aux s x) (eval_aux s y)
    | Join _ _ x y => Lwt.join (eval_aux s x) (eval_aux s y)
    | Ret _ v => Lwt.ret v
    | Call c => eval_command c
    end
  end.
```

```
CoFixpoint handle_commands : Co effect unit :=
  ile! name := read_line in
  match name with
  | None => ret tt
  | Some command =>
    ile! result := log (LString.s "Input: "
      ++ command ++ LString.s ".")
    in handle_commands
  end.
```

```
Definition launch (m : list LString.t -> Co effect unit) : unit :=
  let argv := List.map String.to_lstring Sys.argv in
  Lwt.launch (eval (m argv)).
```

```
Definition corun (argv : list LString.t) : Co effect unit :=
  handle_commands.
```

```
Definition main := launch corun.
```

8.3 Формалізація вводу-виводу для PTS/BEAM

This work is expected to compile to a limited number of target platforms. For now, Erlang, Haskell, and LLVM are awaiting. Erlang version is expected to be used both on LING and BEAM Erlang virtual machines. This language allows you to define trusted operations in System F and extract this routine to Erlang/OTP platform and plug as trusted resources. As the example, we also provide infinite coinductive process creation and inductive shell that linked to Erlang/OTP IO functions directly.

IO protocol. We can construct in pure type system the state machine based on (co)free monads driven by **IO/IOI** protocols. Assume that **String** is a **List Nat** (as it is in Erlang natively), and three external constructors: `getLine`, `putLine` and `pure`. We need to put correspondent implementations on host platform as parameters to perform the actual IO.

```
String: Type = List Nat
data IO: Type =
  (getLine: (String -> IO) -> IO)
  (putLine: String -> IO)
  (pure: () -> IO)
```

8.3.0.1 Infinity I/O Type

Infinity I/O Type Spec.

```
-- IOI/@: (r: U) [x: U] [[s: U] -> s -> [s -> #IOI/F r s] -> x] x
  \ (r : *)
-> \ / (x : *)
-> (\ / (s : *)
  -> s
  -> (s -> #IOI/F r s)
  -> x)
-> x

-- IOI/F
  \ (a : *)
-> \ (State : *)
-> \ / (IOF : *)
-> \ / (PutLine_ : #IOI/data -> State -> IOF)
-> \ / (GetLine_ : (#IOI/data -> State) -> IOF)
-> \ / (Pure_ : a -> IOF)
-> IOF

-- IOI/MkIO
  \ (r : *)
-> \ (s : *)
-> \ (seed : s)
-> \ (step : s -> #IOI/F r s)
-> \ (x : *)
-> \ (k : forall (s : *) -> s -> (s -> #IOI/F r s) -> x)
-> k s seed step
```

Infinite I/O Sample Program.

```
-- Morte/corecursive
( \ (r: *1)
  -> ( (((#IOI/MkIO r) (#Maybe/@ #IOI/data)) (#Maybe/Nothing #IOI/data))
    ( \ (m: (#Maybe/@ #IOI/data))
      -> (((((#Maybe/maybe #IOI/data) m) ((#IOI/F r) (#Maybe/@ #IOI/data)))
        ( \ (str: #IOI/data)
          -> ((((#IOI/putLine r) (#Maybe/@ #IOI/data)) str)
            (#Maybe/Nothing #IOI/data))))
        (((#IOI/getLine r) (#Maybe/@ #IOI/data))
          (#Maybe/Just #IOI/data))))))
```

Erlang Coinductive Bindings.

```
copure() ->
  fun (_) -> fun (IO) -> IO end end.

cogetLine() ->
  fun (IO) -> fun(_) ->
    L = ch:list(io:get_line("> ")),
    ch:ap(IO,[L]) end end.

coputLine() ->
  fun (S) -> fun(IO) ->
    X = ch:unlist(S),
    io:put_chars(": "++X),
    case X of "0\n" -> list([]);
            _ -> corec() end end end.

corec() ->
  ap('Morte':corecursive(),
    [copure(),cogetLine(),coputLine(),copure(),list([])]).
```

```
> om_extract:extract("priv/normal/IOI").
ok
> Active: module loaded: {reloaded,'IOI'}

> om:corec().
> 1
: 1
> 0
: 0
#Fun<List.3.113171260>
```

8.3.0.2 I/O Type

I/O Type Spec.

```
-- IO/@
  \ (a : *)
-> \/ (IO : *)
-> \/ (GetLine_ : (#IO/data -> IO) -> IO)
-> \/ (PutLine_ : #IO/data -> IO -> IO)
-> \/ (Pure_ : a -> IO)
-> IO
```

```
-- IO/replicateM
  \ (n: #Nat/@)
-> \ (io: #IO/@ #Unit/@)
-> #Nat/fold n (#IO/@ #Unit/@)
      (#IO/[>>] io)
      (#IO/pure #Unit/@ #Unit/Make)
```

Guarded Recursion I/O Sample Program.

```
-- Morte/recursive
((#IO/replicateM #Nat/Five)
 (((#IO/[>>=] #IO/data) #Unit/@) #IO/getLine) #IO/putLine))
```

Erlang Inductive Bindings.

```
pure() ->
    fun(I0) -> I0 end.

getLine() ->
    fun(I0) -> fun(_) ->
        L = ch:list(io:get_line("> ")),
        ch:ap(I0,[L]) end end.

putLine() ->
    fun(S) -> fun(I0) ->
        io:put_chars(": "++ch:unlist(S)),
        ch:ap(I0,[S]) end end.

rec() ->
    ap('Morte':recursive(),
        [getLine(),putLine(),pure(),list([])]).
```

Here is example of Erlang/OTP shell running recursive example.

```
> om:rec().
> 1
: 1
> 2
: 2
> 3
: 3
> 4
: 4
> 5
: 5
#Fun<list.28.113171260>
```


Список використаних джерел

- [1] N. G. de Bruijn, *AUTOMATH, a Language for Mathematics*, pp. 159–200. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1983.
- [2] P. Martin-Löf and G. Sambin, *Intuitionistic type theory*. Studies in proof theory, Bibliopolis, 1984.
- [3] T. Coquand and G. Huet, "The calculus of constructions," in *Information and Computation*, (Duluth, MN, USA), pp. 95–120, Academic Press, Inc., 1988.
- [4] F. Pfenning and C. Paulin-Mohring, "Inductively defined types in the calculus of constructions," in *Mathematical Foundations of Programming Semantics, 5th International Conference, Tulane University, New Orleans, Louisiana, USA, March 29 - April 1, 1989, Proceedings*, pp. 209–228, 1989.
- [5] H. P. Barendregt, "Lambda calculi with types," in *Handbook of Logic in Computer Science (Vol. 2)* (S. Abramsky, D. M. Gabbay, and S. E. Maibaum, eds.), (New York, NY, USA), pp. 117–309, Oxford University Press, Inc., 1992.
- [6] S. P. Jones and E. Meijer, "Henk: A typed intermediate language," in *In Proc. First Int'l Workshop on Types in Compilation*, 1997.
- [7] C.-E. Ore, "The extended calculus of constructions (ecc) with inductive types," in *Information and Computation*, vol. 99, pp. 231 – 264, 1992.
- [8] M. Sokhatskyi and P. Maslianko, "The systems engineering of consistent pure language with effect type system for certified applications and higher languages," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1982, p. 020033, AIP Publishing, 2018.
- [9] P. Fu and A. Stump, "Self types for dependently typed lambda encodings," in *Rewriting and Typed Lambda Calculi - Joint International Conference, RTA-TLCA 2014, Held as Part of the Vienna Summer of Logic, VSL 2014, Vienna, Austria, July 14-17, 2014. Proceedings*, pp. 224–239, 2014.

- [10] A. Stump, "The calculus of dependent lambda eliminations," in *Journal of Functional Programming*, vol. 27, Cambridge University Press, 2017.
- [11] G. Barthe, *Extensions of pure type systems*, pp. 16–31. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995.
- [12] P. Martin-Löf, "An intuitionistic theory of types: Predicative part," in *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics*, vol. 80, pp. 73–118, Elsevier, 1975.
- [13] H. Geuvers, *Induction Is Not Derivable in Second Order Dependent Type Theory*, pp. 166–181. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [14] S. Awodey, "Impredicative encodings in hott," 2017.
- [15] S. Speight, "Impredicative encoding of inductive types in hott," 2017.
- [16] J. Jardine, *Local Homotopy Theory*. Springer Monographs in Mathematics, Springer New York, 2015.
- [17] P. Johnstone, *Topos Theory*. Dover Books on Mathematics, Dover Publications, 2014.
- [18] R. Goldblatt, *Topoi: The Categorical Analysis of Logic*. Studies in Logic and the Foundations of Mathematics, Elsevier Science, 2014.