ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ

Công Nghĩa Hiếu

XÂY DỰNG CÔNG CỤ PHÂN TÍCH MÃ NGUỒN CHO NGÔN NGỮ RUST

KHOÁ LUẬN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC HỆ CHÍNH QUY

Ngành: Công nghệ thông tin

HÀ NỘI - 2024

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ

Công Nghĩa Hiếu

XÂY DỰNG CÔNG CỤ PHÂN TÍCH MÃ NGUỒN CHO NGÔN NGỮ RUST

KHOÁ LUẬN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC HỆ CHÍNH QUY

Ngành: Công nghệ thông tin

Cán bộ hướng dẫn: PGS. TS. Võ Đình Hiếu

HÀ NỘI - 2024

VIETNAM NATIONAL UNIVERSITY, HANOI
UNIVERSITY OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY

Cong Nghia Hieu

DEVELOPING A SOURCE CODE ANALYSIS TOOL FOR THE RUST PROGRAMMING LANGUAGE

BACHELOR'S THESIS

Major: Information technology

Supervisor: Assoc. Prof., Dr. Vo Dinh Hieu

HANOI - 2024

Lời cảm ơn

Lời đầu tiên, tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới thầy Võ Đình Hiếu, người đã tận tình chỉ bảo tôi trong suốt quá trình học tập tại trường và đặc biệt là thời gian thực hiện khóa luận tốt nghiệp. Thầy đã không chỉ cung cấp những chỉ dẫn chuyên môn mà còn động viên và hỗ trợ tôi vượt qua những khó khăn để thực hiện đề tài tốt nghiệp một cách tốt nhất .

Tôi cũng xin cảm ơn thầy Trần Mạnh Cường cũng như toàn thể anh chị, và các bạn trong phòng thí nghiệm ISE (Khoa Công nghệ thông tin, Trường Đại học Công nghệ, ĐHQGHN) đã ủng hộ động viên tôi trong quá trình hoàn thành khóa luận. Sự hỗ trợ nhiệt tình của mọi người đã giúp tôi có thêm tự tin trong việc mở rộng kiến thức và kỹ năng thực hành.

Chúc mọi người luôn luôn vui vẻ và gặt hái được nhiều thành công trong cuộc sống.

Lời cam đoan

Tôi là Công Nghĩa Hiếu, sinh viên lớp QH-2021-I/CQ-I-IT2 khóa K66 theo học ngành Công nghệ thông tin tại trường Đại học Công Nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội. Tôi xin cam đoan khoá luận "Xây dựng công cụ phân tích mã nguồn cho ngôn ngữ Rust" là công trình nghiên cứu do bản thân tôi thực hiện. Các nội dung nghiên cứu, kết quả trong khoá luận là xác thực.

Các thông tin sử dụng trong khoá luận là có cơ sở và không có nội dung nào sao chép từ các tài liệu mà không ghi rõ trích dẫn tham khảo. Tôi xin chịu trách nhiệm về lời cam đoan này.

Hà Nội, ngày 16 tháng 12 năm 2024

Sinh viên

Công Nghĩa Hiếu

Tóm tắt

Tóm tắt:

Rust đang trở thành một ngôn ngữ lập trình vô cùng nổi bật và được sử dụng rộng rãi trong vài năm gần đây. Nhờ vào các tính năng nổi bật về đảm bảo an toàn bộ nhớ và hiệu suất vượt trội, mã nguồn của hàng ngàn dự án trên thế giới đã được viết lại hoặc viết mới bằng Rust, từ các hệ thống nhúng cho đến các ứng dụng web hiện đại. Rust đã được chọn làm ngôn ngữ phát triển của các dự án cấp độ doanh nghiệp như Servo - web engine của trình duyệt Mozilla, 1 phần của hệ điều hành Windows 11, và nhiều dự án khác.

Những dự án này cho thấy Rust không chỉ là một xu hướng mà còn là một ngôn ngữ có tiềm năng phát triển lâu dài. Với sự phổ biến của Rust, nhu cầu về các công cụ phân tích mã nguồn, kiểm thử và bảo mật cũng ngày càng tăng. Khi các dự án lớn chuyển sang sử dụng Rust, việc đảm bảo mã nguồn an toàn và không có lỗi trở thành một thách thức. Tuy nhiên hệ sinh thái và các công cụ cho phân tích mã nguồn Rust hiện tại vẫn chưa đáp ứng đủ. Rust chỉ mới được sử dụng phổ biến trong vài năm gần đây, vì vậy việc phát triển các công cụ phân tích vẫn còn trong giai đoạn đầu. Nhằm nâng cao độ tin cậy của mã nguồn, các phương pháp kiểm thử phần mềm tự động đang nhận được đông đảo sự quan tâm và đang được áp dụng rộng rãi trong cả cộng đồng nghiên cứu lẫn các công ty phần mềm. Một trong những phương pháp sử dụng trong kiểm thử là phân tích mã nguồn hay phân tích tĩnh. Quá trình này là việc phân tích, đánh giá chất lượng mã nguồn và tìm ra các lỗi lập trình, lỗ hổng bảo mật mà không cần phải thực thi chương trình.

Khóa luận này trình bày phương pháp xây dựng công cụ phân tích mã nguồn dành cho ngôn ngữ Rust. Đầu vào của công cụ là các tệp mã nguồn Rust và đầu ra là đồ thị thuộc tính mã nguồn (CPG). Công cụ sử dụng đồ thị thuộc tính mã nguồn tuân theo chuẩn đặc tả và nền tảng có sẵn của Joern. Đầu ra có thể được lưu trữ trong cơ sở dữ liệu đồ thị, trực quan hóa, truy vấn, phân tích thủ công hoặc tự động nhằm phục vụ cho mục đích phân tích mã nguồn khác nhau. Ngoài ra CPG này có thể được áp dụng cho các kĩ thuật học máy để phát hiện lỗ hổng bảo mật như graph neural networks (GNN).

Từ khóa: Phân tích mã nguồn, phân tích tĩnh, ngôn ngữ lập trình Rust

Abstract

Abstract:

Rust has become an incredibly prominent and widely-used programming language in recent years. Thanks to its outstanding features of ensuring memory safety and superior performance, the source code of thousands of projects worldwide has been rewritten or newly developed using Rust, from embedded systems to modern web applications. Rust has been chosen as the development language for enterprise-level projects such as Servo, the web engine of the Mozilla browser, part of the Windows 11 operating system, and many other projects.

These projects demonstrate that Rust is not just a trend but a language with long-term potential for development. As Rust becomes more popular, the demand for source code analysis, testing, and security tools is also increasing. When major projects switch to using Rust, ensuring that the source code is safe and error-free becomes a challenge. However, the current ecosystem and tools for Rust source code analysis are still insufficient. Since Rust has only become widely used in recent years, the development of analysis tools is still in its early stages. To enhance the reliability of source code, automated software testing methods are receiving widespread attention and are being widely applied in both the research community and software companies. One of the methods used in testing is source code analysis or static analysis. This process involves analyzing, evaluating the quality of the source code, and identifying programming errors and security vulnerabilities without needing to execute the program.

This thesis presents a method for building a source code analysis tool for the Rust language. The tool's input is Rust source code files, and the output is a Code Property Graph (CPG). The tool utilizes the Code Property Graph following the specification and existing platform of Joern. The output can be stored in a graph database, visualized, queried, manually or automatically analyzed to serve various source code analysis purposes. Additionally, this CPG can be applied to machine learning techniques to detect security vulnerabilities such as graph neural networks (GNN).

Keywords: Source code analysis, static analysis, Rust programming language

Mục lục

Danh sách hình vẽ

Danh sách bảng

Danh sách đoạn mã

Danh mục các từ viết tắt

Từ viết tắt	**Cụm từ đầy đủ**	**Cụm từ tiếng Việt**
AST	Abstract Syntax Tree	Cây cú pháp trừu tượng
CFG	Control Flow Graph	Đồ thị dòng điều khiển
PDG	Program Dependence Graph	Đồ thị phụ thuộc chương trình
CDG	Control Dependence Graph	Đồ thị phụ thuộc điều khiển
CPG	Code Property Graph	Đồ thị thuộc tính mã nguồn
IDE	Integrated Development Environment	Môi trường phát triển tích hợp

Chương 1

Đặt vấn đề

- Viết về sự phát triển của Rust trong những năm gần đây, được nhiều công ty lớn sử dụng, có mặt trong nhiều dự án lớn, nhiệm vụ quan trọng (space, web browser, OS, ...)

- Rust là một ngôn ngữ lập trình an toàn nên được các công ty lớn ưu tiên sử dụng. Rust cung cấp nhiều cơ chế an toàn như ownership, borrowing, lifetime, type system, ...

- Rust là ngôn ngữ lập trình an toàn, tuy nhiên sự an toàn này là không đảm bảo chắc chắn. Rust là ngôn ngữ lập trình nhắm tới system level, và với các cơ chế an toàn của mình, rust có thể giúp tránh được các lỗi về memory safety như buffer overflow, use after free, double free, null pointer dereference, pointer dangling hay các lỗi về đa luồng như data race, deadlock, ...

- Dù cung cấp các tính năng bảo mật như vậy nhưng mã nguồn Rust vẫn sẽ tiềm tàng những nguy hiểm. Rust code được chia làm 2 phần safe code và unsafe code. Safe rust code là những đoạn code sử dụng tính năng thuần được Rust cung cấp, mặc định những đoạn code này sẽ được compiler kiểm tra bằng borrow checker, các luật an toàn khác. Tuy nhiên trong safe rust code không có nghĩa an toàn tuyệt đối, vẫn có những trường hợp phức tạp lập trình viên tạo ra có thể không bị compiler phát hiện, hoặc những chỉ dẫn (markder, annotation) của lập trình viên làm cho compiler bị đánh lừa (vì compiler tin vào chỉ dẫn của người dùng). Phần thứ 2 của Rust là unsafe Rust code. Số lượng dự án viết lại hoàn toàn bằng Rust không nhiều, chủ yếu là các chương trình vốn đã được viết bằng C/C++, do vậy dùng Rust để tương tác với code C/C++, để migrate dần dần dự án C/C++ sang Rust. Để làm được điều này thì Rust cung cấp các chức năng như FFI, WASM Bindgen, ... để có thể gọi được code C/C++ từ Rust. Tuy nhiên khi sử dụng các chức năng này, lập trình viên phải sử dụng unsafe Rust code. Unsafe Rust code là những đoạn code mà compiler không thể kiểm tra được, do vậy lập trình viên phải chịu

trách nhiệm kiểm tra an toàn của đoạn code này. Khi không có compiler kiểm tra thì đoạn Rust code sẽ trả về không khác gì C/C++. Dù số lượng unsafe code trung bình trong 1 dự án không nhiều (nhớ cite bài thống kê số liệu), nhưng unsafe code hay thậm chí trong safe code tiềm ẩn rất nhiều rủi ro về bảo mật, do vậy cần có công cụ hỗ trợ phân tích mã nguồn Rust để tìm ra các lỗi tiềm ẩn này.

- Rust cung cấp nhiều công cụ hỗ trợ phát triển phần mềm như Cargo, Rustfmt, Clippy, ...
- Đã có rất nhiều nghiên cứu, phát triển của các công cụ phân tích mã nguồn, kiểm thử, check vulnerabilities, code smell cho Rust như Rudra, Miri, Yuga, ...
- Tuy nhiên các công cụ này đang chỉ sử dụng, phân tích các thuật toán trực tiếp trên mã nguồn (text thuần, sử dụng regex), hoặc là chỉ sử dụng cây cú pháp trừu tượng, hoặc là sử dụng 1 cấu trúc dữ liệu đặc biệt riêng của họ trong quá trình phần tích (Ví dụ Miri sử dụng Stacked Borrow).
- Nhấn mạnh thêm nhu cầu kiểm thử của Rust hiện tại là rất lớn. Dù Rust đang trong đà trend trong các năm gần đây, được nhiều dự án lớn adopt nhưng hệ sinh thái (ecosystem) của Rust chưa được lớn mạnh (mature) như các ngôn ngữ C/C++, Java (đã có thâm niên phát triển trong nhiều năm). Hay kể cả đem so sánh với ngôn ngữ Go, cũng là ngôn ngữ trend gần đây (sau Rust) thì ecosystem của Rust vẫn còn quá nhỏ bé. Không chỉ vậy Rust còn muốn được sử dụng cho các chương trình hệ thống, thực hiện các nhiệm vụ khó khăn, nghiêm ngặt hơn như IOT (nhớ cite bài), thậm chí là khám phá vũ trụ (Space) (nhớ cite bài). Do vậy phát triển hệ sinh thái cho Rust nói chung và kiểm thử mã nguồn Rust nói riêng là rất cần thiết (kể cả phân tích tĩnh hay kiểm thử động)
- Thứ 1, Khóa luận này đưa ra 1 giải pháp khác cho việc sử dụng cấu trúc dữ liệu thống nhất cho việc phân tích mã nguồn, đó là sử dụng đồ thị thuộc tính mã nguồn (CPG) để biểu diễn mã nguồn Rust.
- CPG đã có nhiều nghiên cứu, phát triển cho các ngôn ngữ lập trình khác như Java, C/C++, Python, ... và đã được chứng minh hiệu quả trong việc phân tích mã nguồn.

- CPG có rất nhiều implementation khác nhau để phục vụ nhu cầu phân tích mã nguồn khác nhau của các ngôn ngữ
- Các công cụ hiện tại như Rudra, Miri chỉ có thể tìm kiếm 1 tập thể loại lỗi nhất định. Ví dụ Rudra chuyên tìm các loại lỗi ... (phải cần tìm hiểu chung chugn về cơ chế thuật toán của Rudra). Tương tự với Miri, Yuga, ...
- Kết luận lại là cần 1 nền tảng (cấu trúc dữ liệu) thống nhất để phân tích mã nguồn Rust, cùng 1 cấu trúc dữ liệu nền tảng nhưng có thể áp dụng cho nhiều thể loại lỗi khác nhau (khác phục điểm yếu chỉ áp dụng cho 1 loại lỗi nhất định của các công cụ phía trên) và CPG là 1 giải pháp tốt cho việc này (vì đã được sử dụng cho nhiều ngôn ngữ khác nhau và đã chứng minh hiệu quả).
- Thứ 2, gần với Rust nhất thì có CPG cho LLVM-IR. Rust được xây dựng từ LLVM-IR, mã nguồn Rust sẽ được chuyển thành LLVM-IR, do vậy 1 đoạn mã Rust có thể được thay thế bằng 1 đoạn mã LLVM-IR tương ứng. Tuy nhiên đó chỉ là hành vi khi runtime. Thực tế Rust có những tính năng được compiler xây dựng, giúp đảm bảo an toàn khi code (hay compile time) ví dụ như ownership, borrow checker. Có các tính năng hiện tại chỉ có ngôn ngữ Rust có mà ngôn ngữ cùng system level như C/C++ không có. Hay kể cả 1 dạng biểu diễn khác của Rust là LLVM-IR cũng không có. Do vậy xuất hiện nhu cầu phân tích mã nguồn Rust ngay tại tầng source code, chứ không phải ở tần LLVM-IR.

Hiện nay, cùng với sự phát triển của công nghệ và độ phủ sóng của internet, ngành công nghiệp phần mềm đang trải qua giai đoạn phát triển mạnh mẽ và đa dạng hóa không ngừng, đi kèm với đó là hàng tỷ người sử dụng. Các hệ thống phần mềm phải luôn đảm bảo tính sẵn sàng và ổn định bởi vì chỉ một sai xót xảy ra cũng sẽ gây ra những hậu quả khôn lường. Trong quá trình xây dựng phần mềm, các đội ngũ phát triển phần mềm thường dùng là sử dụng các công cụ phân tích mã nguồn cho việc phát triển, kiểm thử và đảm bảo chất lượng phần mềm. Các công cụ phân tích mã nguồn sẽ giúp phát hiện các lỗi lập trình, vấn đề về bảo mật hay việc sử dụng tài nguyên kém hiệu quả mà không cần phải thực thi chương trình. Đồng thời, các công cụ này sẽ giúp cải thiện chất lượng mã nguồn, đảm bảo lập trình viên sẽ tuân thủ các quy tắc và tiêu chuẩn khi viết mã nguồn. Điều này sẽ giúp giảm thiểu thời gian và công sức cho quá trình kiểm thử và đánh giá mã nguồn.

Hiện tại, trên thị trường đã có nhiều công cụ cung cấp khả năng phân tích mã nguồn như SonarQube, ReSharper hay CodeClimate. Những công cụ này cung cấp khả năng phân tích mã nguồn cho nhiều ngôn ngữ lập trình khác nhau như C/C++, Java, Javascript, C... Bên cạnh đó, mỗi ngôn ngữ lập trình lại có thêm nhiều công cụ phân tích mã nguồn khác nhau, nếu xét riêng cho ngôn ngữ lập trình Rust, ta có một số công cụ tiêu biểu như gosec1, staticcheck2 hay govulncheck3. Đây là các công cụ cung cấp khả năng phân tích cú pháp và tìm lỗ hổng trong mã nguồn. Điểm chung của các công cụ này là đều sử dụng dạng cây cú pháp trừu tượng được định nghĩa sẵn của Rust nên chúng chỉ dừng lại ở tìm các lỗi dựa trên cú pháp mã nguồn mà không khai thác sâu hơn về luồng điều khiển hay luồng dữ liệu của mã nguồn. Do vậy, những công cụ này thường cung cấp nhiều cảnh báo giả và bỏ qua nhưng lỗi nghiêm trọng khi phân tích mã nguồn.

Khác với các công cụ vừa nêu, trên thị trường hiện nay còn xuất hiện một công cụ là Joern. Joern là một nền tảng mã nguồn mở cung cấp khả năng phân tích mã nguồn, mã bytecode và mã nhị phân. Một công cụ phân tích mã nguồn sẽ gồm ba thành phần chính: phân tích cú pháp mã nguồn (parser), biểu diễn cấu trúc của mã nguồn và phân tích cấu trúc biểu diễn đó [3]. Joern đóng vai trò là một công cụ giúp xử lý hai bước đầu của quá trình phân tích mã nguồn. Thay vì chỉ sử dụng cây cú pháp trừu tượng, Joern biểu diễn mã nguồn dưới dạng đồ thị thuộc tính mã nguồn và cung cấp chức năng truy vấn khai thác đồ thị này bằng các câu lệnh truy vấn viết bằng ngôn ngữ Scala. Joern được xây dựng với mục tiêu cung cấp chức năng tìm kiếm lỗ hổng trong mã nguồn và cung cấp các công cụ để xây dựng các trình phân tích tĩnh sử dụng dữ liệu phân tích mà Joern cung cấp. Điểm đặc biệt của Joern là nó cung cấp dạng đồ thị biểu diễn duy nhất cho tất cả các ngôn ngữ mà nó hỗ trợ (bao gồm C, C++, Java, Javascript, Python...), điều này đem đến khả năng phân tích đa ngôn ngữ, giúp giảm thiểu việc phải xử lý riêng cho từng ngôn ngữ khi chúng ta tìm kiếm lỗi trong mã nguồn hay khi xây dựng các trình phân tích tĩnh dựa trên Joern.

Mặc dù Joern đã cung cấp khả năng phân tích mã nguồn đối với ngôn ngữ Rust tuy nhiên vẫn còn rất hạn chế do chưa xử lý hết toàn bộ các thành phần mã nguồn có trong Rust và thiếu các thông tin về kiểu dữ liệu. Vì vậy khóa luận này xây dựng một công cụ phân tích mã nguồn dành cho ngôn ngữ lập trình Rust dựa trên mã nguồn của Joern. Công cụ này sẽ xử lý các thành mã nguồn mà Rust cung cấp

một cách chi tiết và đầy đủ hơn, đồng thời cũng xử lý triệt để kiểu dữ liệu để cung cấp đồ thị mã nguồn chi tiết nhất có thể.

Khóa luận sẽ được trình bày theo cấu trúc như sau. Đầu tiên, Chương 2 thảo luận một số kiến thức cơ sở liên quan đến phân tích mã nguồn, cụ thể cho ngôn ngữ lập trình Rust. Chương 3 trình bày chi tiết quy trình xây dụng công cụ phân tích. Tiếp theo, Chương 4 sẽ trình bày kiến trúc, cài đặt công cụ và một số kết quả thực nghiệm đánh giá. Cuối cùng, tóm tắt những kết quả và kết luận sau quá trình phát triển công cụ sẽ được trình bày ở Chương 5.

Chương 2

Kiến thức cơ sở

Chương này sẽ trình bày các kiến thức cơ sở về ngôn ngữ lập trình Rust, cơ chế quản lý bộ nhớ hiệu quả tạo nên đặc trưng của Rust và tính hướng hàm được đan xen vào trong cú pháp. Chương cũng sẽ trình bày về các dạng biểu diễn đồ thị của mã nguồn bao gồm cây cú pháp trừu tượng, đồ thị dòng điều khiển, đồ thị phụ thuộc chương trình và đồ thị thuộc tính mã nguồn. Bộ công cụ Joern, 1 bộ công cụ phân tích mã nguồn tĩnh, và những ưu điểm mà nó mang lại sẽ được nhắc tới ở phần cuối của chương.

2.1 Ngôn ngữ lập trình Rust

2.1.1 Giới thiệu tổng quan

Rust lần đầu tiên được giới thiệu vào năm 2006 bởi Mozilla, với phiên bản 1.0 được công bố vào năm 2015 và nhanh chóng được đem vào sử dụng trong nhiều dự án. Với điểm mạnh tập trung vào sự an toàn và hiệu suất cao, có thể so sánh với C/C++, là những lý do chính cho sự thành công của Rust [8, 19]. Rust là ngôn ngữ định kiểu mạnh tương tự như C/C++ hay Java và áp đặt các cơ chế đảm bảo về an toàn bộ nhớ [15]. Một số tính năng an toàn có thể kể đến như đảm bảo chỉ có một tham chiếu có thể ghi (mutable) tới một đối tượng hoặc nhiều tham chiếu chỉ đọc, nhưng không thể cỏ ghi và đọc cùng 1 lúc. Cơ chế quản lý bộ nhớ *ownership* được áp dụng vào thời điểm biên dịch, do đó loại bỏ được một lớp lớn các lỗi bộ nhớ mà C/C++ gặp phải. Các lỗi về an toàn bộ nhớ cổ điển có thể được tránh bởi việc sử dụng Rust bao gồm tràn bộ đệm (stack-overflow), sử dụng sau khi giải phóng bộ nhớ (use-after-free) và tham chiếu null [5]. Ngoài các cơ chế đảm bảo an toàn được sử dụng mặc định trong ngôn ngữ, Rust vẫn cho phép viết những đoạn mã code có tiềm năng mất an toàn bằng từ khóa *unsafe* [15]. Tổng quan, Rust cung cấp cho sự an toàn và quyền kiểm soát khi cần thiết, làm cho nó rất phù hợp cho lập trình hệ thống [10], lập trình nhúng [18], hay các chương trình du hành ngoài không gian yêu cầu sự an toàn tuyệt đối [17].

2.1.2 Cơ chế an toàn của Rust

```rust
fn ownership_and_borrowing() -> &u32 {
  // creates a `Vec`, a heap allocated buffer
  let vec = vec![1, 2, 3];

  // creates a reference to the first value with borrowing
  let first_val = &vec[0];

  // Ownership: `Vec` is automatically reclaimed
  // when its owner `vec` goes out of the scope.
  //
  // Borrowing: compile error; Rust prevents `first_val`
  // to outlive `vec` by tracking variable lifetimes.
  return first_val;
}

fn aliasing_xor_mutability() {
  let mut vec = vec![1, 2, 3];

  // exclusive mutable borrowing
  let mut_ref = &mut vec;

  // shared read-only borrowing
  let shared_ref1 = &vec;
  let shared_ref2 = &vec;
  println!("{}", shared_ref1[0]);
  println!("{}", shared_ref2[0]);

  // Exclusive mutability: compile error;
  // Rust invalidates `mut_ref` when `shared_ref1` is
  // used since they cannot coexist at the same time.
  mut_ref.push(4);
}
```

Đoạn mã 2.1: Ví dụ các khái niệm an toàn trong Rust: (1) ownership, (2) borrowing, (3) Exclusive mutability, (4) Lifetime, (5) Thread safe.

Rust là một ngôn ngữ an toàn về kiểu, được thiết kế cho phát triển phần mềm mức hệ thống, mang lại cho lập trình viên quyền kiểm soát tối đa với tài nguyên nhưng đảm bảo an toàn bộ nhớ và đa luồng bằng một tập các cơ chế nghiêm ngặt.

Trình biên dịch của Rust sẽ kiểm tra các cơ chế này để loại bỏ các vấn đề nguy hiểm tiềm tàng. Các cơ chế an toàn bao gồm các khái niệm cơ bản:

Ownership: Cơ chế *ownership* giúp Rust có sự điều khiển vừa đủ với bộ nhớ, không cần sử dụng bộ thu gom rác (garbage collector) hoặc để người dùng tự xử lý như C/C++. Theo cơ chế *ownership* của Rust, một giá trị (vị trí bộ nhớ) chỉ có một chủ sở hữu độc quyền (biến). Khi chủ sở hữu của giá trị ra khỏi phạm vi cụ thể, giá trị trong bộ nhớ sẽ bị giải phóng. Gán biến cho 1 biến khác dẫn đến chuyển quyền sở hữu. Khi một biến mất quyền sở hữu một giá trị, biến đó sẽ không còn sử dụng được. Trình biên dịch Rust theo dõi tuổi thọ của mỗi giá trị thông qua cơ chế *ownership* và thực hiện thu hồi bộ nhớ cần thiết. Cơ chế *ownership* tương tự như mẫu Resource-Acquisition-Is -Initialization (RAII) [3] thường được sử dụng trong ngôn ngữ C++.

Borrowing: Rust cho phép mượn giá trị (tức là tạo tham chiếu đến nó) trong suốt thời gian sống của biến chủ sở hữu. Với cơ chế mượn, một giá trị có thể được đọc hoặc cập nhật mà không thay đổi quyền sở hữu của giá trị. Hệ thống kiểu của Rust đảm bảo rằng các vấn đề an toàn bộ nhớ truyền thống như sử dụng sau khi giải phóng (use-after-free) hoặc con trỏ treo không thể xảy ra bằng cách không cho phép các tham chiếu tồn tại lâu hơn biến chủ sở hữu.

Exclusive mutability: Có hai loại mượn: 1) mượn chia sẻ để đọc và 2) mượn độc quyền để ghi. Trình biên dịch Rust đảm bảo rằng cả tham chiếu đọc và tham chiếu ghi không bao giờ xuất hiện cùng một lúc. Điều này có nghĩa là các thao tác đọc và ghi đồng thời là không thể trong Rust, loại bỏ khả năng xảy ra tương tranh với dữ liệu và các lỗi an toàn bộ nhớ như truy cập các tham chiếu không hợp lệ (null-pointer dereferencing).

Lifetime: Lifetime giải thích các phạm vi mà tham chiếu trong chương trình Rust có hiệu lực. Tính năng lifetime trong Rust bao gồm một loạt các generic cho biết cách các tham chiếu liên quan đến nhau. Cụ thể, để xác định khi nào các tham chiếu ra khỏi phạm vi, trình biên dịch liên kết mỗi tham chiếu mượn với một lifetime và theo dõi các ràng buộc giữa các tham chiếu. Lifetime inference đảm bảo rằng thời gian sống của quyền sở hữu mượn sẽ đủ dài để sử dụng.

Thread safe: Lập trình đa luồng trong Rust được đảm bảo an toàn nhờ mô hình *ownership* và *borrowing*, ngăn chặn tương tranh dữ liệu ngay từ khi biên dịch.

Send và Sync Traits: Rust sử dụng các đặc điểm Send và Sync để đảm bảo an toàn đa luồng ở mức kiểu. Một kiểu là Send nếu nó có thể được chuyển an toàn giữa các luồng, và Sync nếu nó có thể được chia sẻ an toàn giữa các luồng. Trình biên dịch Rust sử dụng các đặc điểm này để kiểm tra tại thời điểm biên dịch xem dữ liệu có thể được chia sẻ hoặc di chuyển giữa các luồng một cách an toàn hay không.

Mutex và Arc: Đối với trạng thái có thể thay đổi được chia sẻ, Rust cung cấp các nguyên thủy đồng bộ hóa như Mutex (loại trừ lẫn nhau) và Arc (đếm tham chiếu nguyên tử). Mutex đảm bảo rằng chỉ có một luồng có thể truy cập dữ liệu tại một thời điểm, ngăn chặn các điều kiện đua. Arc được sử dụng để đếm tham chiếu an toàn giữa các luồng, cho phép nhiều luồng chia sẻ quyền sở hữu dữ liệu.

Ownership Transfer in Threads: Rust khuyến khích chuyển quyền sở hữu dữ liệu vào các luồng, điều này ngăn chặn trạng thái có thể thay đổi được chia sẻ giữa các luồng. Khi một luồng được tạo ra, dữ liệu có thể được chuyển vào luồng đó, đảm bảo rằng luồng cha không còn quyền truy cập vào nó, do đó tránh được các điều kiện đua tiềm ẩn.

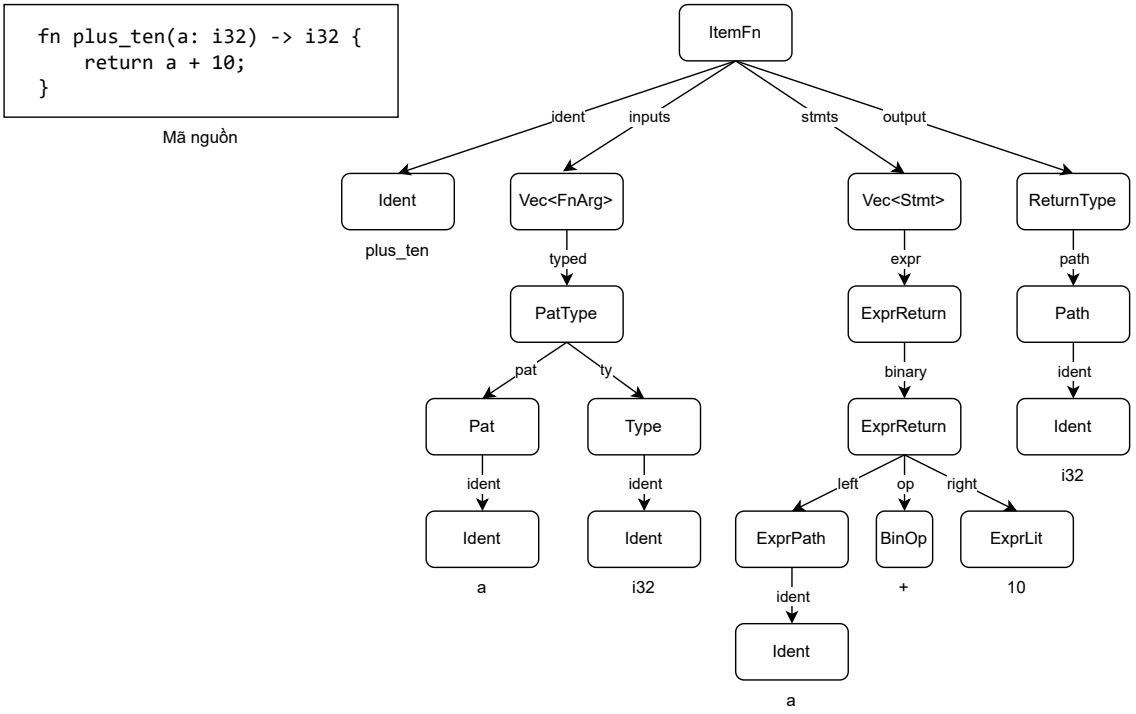
2.2 Các cách biểu diễn mã nguồn

Đối với các kỹ thuật phân tích chương trình, mã nguồn thường được thể hiện dưới dạng cấu trúc dữ liệu cây và đồ thị. Khóa luận sử dụng hai dạng dữ liệu là cây cú pháp trừu tượng và đồ thị thuộc tính mã nguồn, trong đó đồ thị thuộc tính mã nguồn là dạng đồ thị được hợp thành từ cây cú pháp trừu tượng, đồ thị dòng điều khiển và đồ thị phụ thuộc chương trình.

2.2.1 Cây cú pháp trừu tượng

Cây cú pháp trừu tượng (Abstract Syntax Tree) [26] là một cấu trúc dữ liệu quan trọng trong ngôn ngữ lập trình Rust, biểu diễn cấu trúc mã nguồn của chương trình. Khi trình biên dịch Rust phân tích mã nguồn, nó tạo ra một AST để hiểu và xử lý cú pháp của chương trình. AST trong Rust giúp trừu tượng hóa các phần chi tiết của mã nguồn và chỉ giữ lại những thông tin cần thiết để trình biên dịch hiểu cấu trúc của chương trình. Điều này bao gồm các thông tin về khai báo biến, hàm, khối lệnh, biểu thức và mệnh đề. AST trong Rust được sử dụng rộng rãi

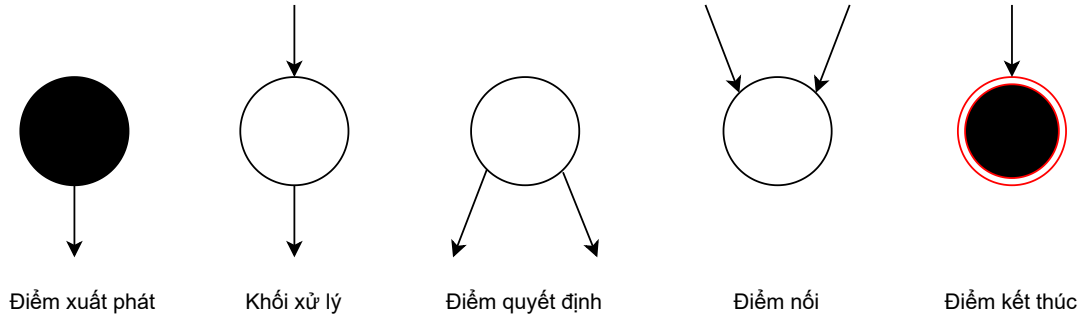
trong nhiều công cụ và ứng dụng khác nhau, bao gồm trình biên dịch (compiler), trình dịch ngược (decompiler), và các công cụ phân tích mã nguồn (Source Code Analysis Tool). Trong Rust, AST không chỉ giúp trình biên dịch hiểu cấu trúc của mã nguồn mà còn hỗ trợ quá trình tối ưu hóa và kiểm tra lỗi. Ví dụ, khi Rust kiểm tra các quy tắc về an toàn bộ nhớ, nó sử dụng AST để xác minh rằng các biến được sử dụng đúng cách và không gây ra các lỗi bộ nhớ như tràn bộ đệm hay truy cập ngoài giới hạn. AST cũng hỗ trợ việc thực hiện các thao tác như refactoring, giúp thay đổi cấu trúc mã nguồn một cách tự động mà không làm thay đổi hành vi của chương trình. Ngoài ra, AST còn đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra các công cụ kiểm thử tự động và phân tích bảo mật, giúp phát hiện sớm các lỗi và lỗ hổng tiềm ẩn trong mã nguồn. Cấu trúc của AST trong Rust có thể khác nhau tùy thuộc vào cách triển khai của trình biên dịch. Mỗi nút trong AST đại diện cho một phần tử cụ thể của mã nguồn, chẳng hạn như một khai báo biến hay một biểu thức điều kiện. Các nút này có thể có các thuộc tính và con trỏ đến các nút con, tạo thành một cây cấu trúc phân cấp. Một trong những ưu điểm lớn của AST trong Rust là khả năng tích hợp với các công cụ xử lý ngôn ngữ tự nhiên (NLP) và các công cụ mã nguồn khác. Bằng cách sử dụng AST, các nhà phát triển có thể tạo ra các công cụ phân tích mã nguồn mạnh mẽ và hiệu quả, giúp cải thiện chất lượng và an toàn của mã nguồn Rust. Hình 2.1 biểu diễn một cây cú pháp trừu tượng tương ứng với mã nguồn trong Rust.



Hình 2.1: Ví dụ về cây cú pháp trừu tượng cho mã nguồn Rust.

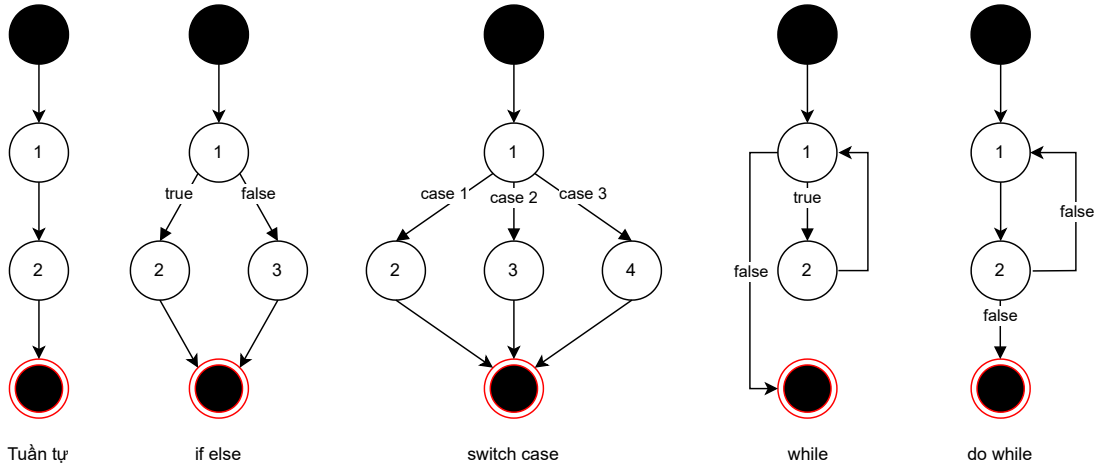
2.2.2 Đồ thị dòng điều khiển

Đồ thị dòng điều khiển (Control Flow Graph) [25] là đồ thị có hướng, biểu diễn kịch bản thực thi của chương trình/đơn vị chương trình. Đồ thị này được xây dựng từ mã nguồn của chương trình, trong đó các nút là các câu lệnh/nhóm câu lệnh và các cạnh là các dòng điều khiển, thể hiện thứ tự thực hiện của câu lệnh/nhóm câu lệnh. Tất cả các đồ thị dòng điều khiển đều có điểm xuất phát và điểm kết thúc đại diện cho trạng thái bắt đầu và trạng thái kết thúc của chương trình. CFG bao gồm các thành phần chính là điểm xuất phát, khối xử lý, điểm quyết định, điểm nối và điểm kết thúc.



Hình 2.2: Các thành phần cơ bản trong đồ thị dòng điều khiển.

Trong hình 2.2, **điểm xuất phát** và **điểm kết thúc** biểu thị điểm bắt đầu và kết thúc của chương trình, lần lượt được thể hiện bằng hình tròn đặc và hình tròn đặc viền. **Khối xử lý** tượng trưng cho các câu lệnh gán, khai báo và khởi tạo, được thể hiện bằng hình tròn rỗng. **Điểm quyết định** biểu thị các câu lệnh điều kiện trong các khối lệnh rẽ nhánh, được thể hiện bằng hình tròn rỗng với nhiều nhánh đi ra. **Điểm nối** biểu thị các câu lệnh thực hiện ngay sau các lệnh rẽ nhánh, có nhiều hơn một điểm trỏ đến, được thể hiện bằng hình tròn rỗng.

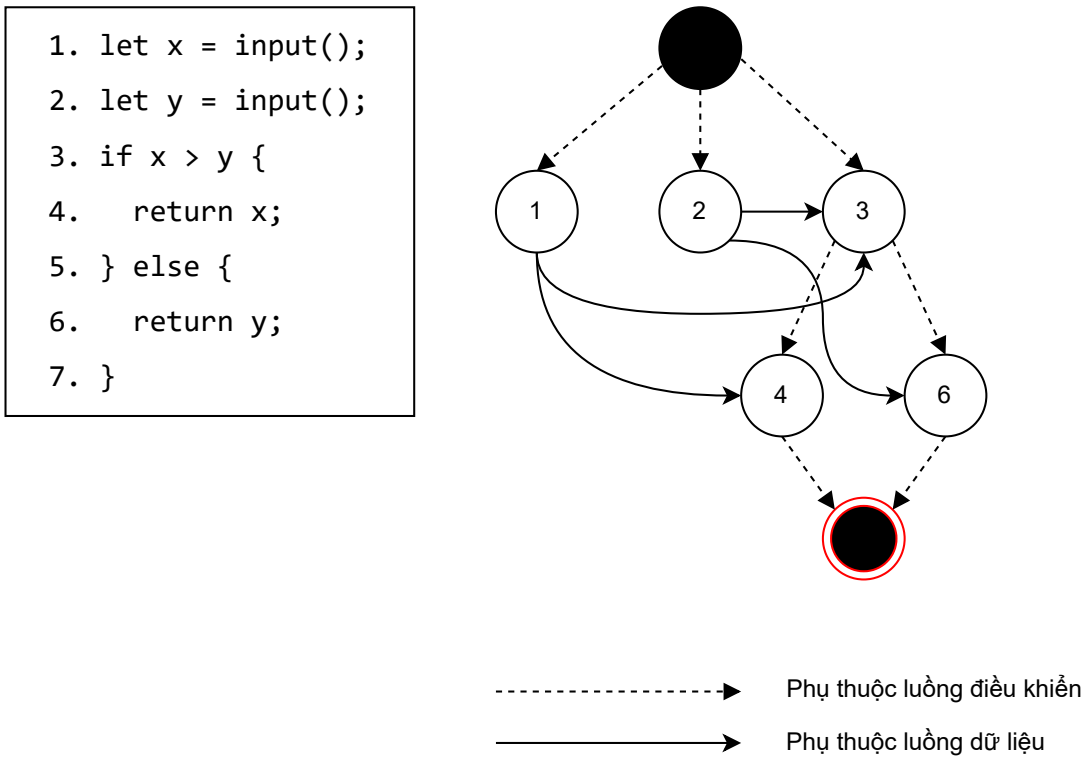


Hình 2.3: Các cấu trúc điều khiển phổ biến trong các ngôn ngữ lập trình.

Hình 2.3 mô tả các cấu trúc điều khiển phổ biến có trong các ngôn ngữ lập trình được biểu diễn dưới dạng đồ thị CFG, bao gồm có cấu trúc điều khiển tuần tự, *if else*, *switch case*, *while* và *do while*.

2.2.3 Đồ thị phụ thuộc chương trình

Đồ thị phụ thuộc chương trình (Program Dependence Graph) [4, 7] là đồ thị có hướng thể hiện cả 2 khía cạnh phụ thuộc điều khiển và phụ thuộc dữ liệu của chương trình. Một nút đại diện cho một câu lệnh / nhóm câu lệnh, một cạnh thể hiện mối quan hệ phụ thuộc điều khiển hoặc phụ thuộc dữ liệu giữa các nút. Câu lệnh / nhóm câu lệnh mà một nút đại diện có được thực hiện hay không phụ thuộc vào các cạnh điều kiện điều khiển và điều kiện dữ liệu trỏ tới nút đó.



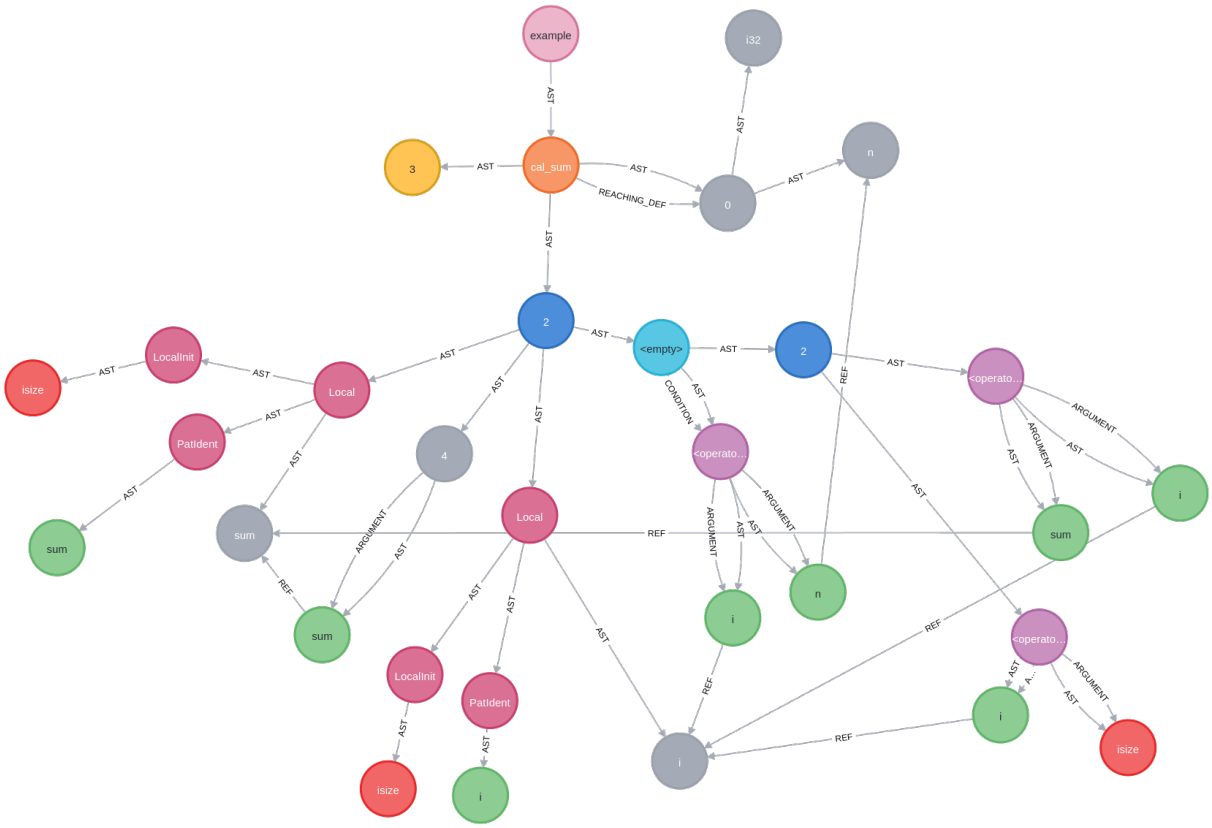
Hình 2.4: Ví dụ về đồ thị phụ thuộc chương trình.

Hình 2.4 biểu diễn ví dụ về một đồ thị phụ thuộc chương trình với cấu trúc điều kiện *if else* trong ngôn ngữ Rust, các cạnh nét đứt biểu diễn phụ thuộc điều khiển và các cạnh nét liền biểu diễn phụ thuộc dữ liệu.

2.2.4 Đồ thị thuộc tính mã nguồn

Đồ thị thuộc tính mã nguồn (Code Property Graph) [24] là một dạng đồ thị biểu diễn mã nguồn mới, được hợp thành cây cú pháp trừu tượng, đồ thị dòng điều

khiển và đồ thị phụ thuộc chương trình. Đồ thị chứa các thông tin về cấu trúc cú pháp, luồng điều khiển và phụ thuộc dữ liệu trong chương trình. Các nút đại diện cho các thành phần như hàm, biến, lớp, gói và các cạnh đại diện cho mối quan hệ giữa chúng như lời gọi hàm, sự gán giá trị, quan hệ cha con hay tham chiếu. CPG được sử dụng để tìm kiếm lỗ hổng trong mã nguồn, phát hiện sao chép mã nguồn, đo lường khả năng kiểm thử mã nguồn và sinh mã khai thác [6, 12, 23].



Hình 2.5: Ví dụ đồ thị thuộc tính mã nguồn.

```
fn cal_sum(n: i32) {
  let mut sum = 0;
  let mut i = 1;
  while i <= n {
      sum += i;
      i += 1;
  }
  return sum;
}
```

Đoạn mã 2.2: Mã nguồn đầy đủ cho đồ thị thuộc tính mã nguồn hình 2.5.

2.3 Công cụ Joern

2.3.1 Đặc tả đồ thị thuộc tính mã nguồn của Joern

Đồ thị thuộc tính mã nguồn đã được nghiên cứu rộng rãi, có rất nhiều phiên bản cài đặt được xây dựng dành cho các mục đích khác nhau [1, 2, 9, 11, 12, 13, 21, 22, 23, 24]. Tuy nhiên có một phiên bản mã nguồn mở được do chính tác giả của đồ thị thuộc tính mã nguồn, Fabian Yamaguchi, đích thân phát triển và duy trì có tên Joern [9].

Dự án CPG [6, 8] cho phép biểu diễn mã nguồn của các ngôn ngữ lập trình khác nhau dưới dạng đồ thị. Cho đến nay, trọng tâm là Java và C/C++ nhưng hỗ trợ thử nghiệm cho Python, Go và TypeScript cũng có sẵn. Mục tiêu của dự án là cung cấp một cách biểu diễn mã nguồn không phụ thuộc vào ngôn ngữ. Điều này cho phép chuyên gia bảo mật xác định các lỗ hổng hoặc lỗi. Hơn nữa, thư viện CPG bao gồm một cách để lưu trữ đồ thị trong neo4j2 và làm cho đồ thị có thể truy cập qua giao diện dòng lệnh. Trong một số trường hợp, thư viện cũng có thể đánh giá giá trị mà một nút có thể giữ. Tất cả những điều này cho phép chuyên gia bảo mật viết các truy vấn tùy chỉnh cho cơ sở dữ liệu đồ thị hoặc cách biểu diễn CPG trong bộ nhớ. Thư viện CPG được thiết kế để cho phép tái sử dụng các truy vấn này giữa tất cả các ngôn ngữ lập trình được hỗ trợ. Để đạt được mục tiêu này, thư viện CPG thực hiện một hệ thống phân cấp lớp đầy đủ, bao gồm các loại câu lệnh và biểu thức khác nhau. CPG mã hóa thông tin như hệ thống phân cấp lớp của mã đang được phân tích, đồ thị luồng điều khiển và đồ thị cuộc gọi trong một đồ thị duy nhất. Thiết kế hiện tại chủ yếu nhắm vào các ngôn ngữ lập trình hướng đối tượng. Để đối phó với khả năng thiếu một số đoạn mã hoặc lỗi trong mã, thư viện có khả năng chịu lỗi với mã không đầy đủ, không biên dịch được và thậm chí ở mức độ nào đó còn không chính xác.

Các thành phần cấu thành đồ thị thuộc tính mã nguồn bao gồm:

- **Các nút và loại của chúng:** Các nút đại diện cho các thành phần của chương trình. Điều này bao gồm các cấu trúc ngôn ngữ cấp thấp như phương thức, biến, và cấu trúc điều khiển, cũng như các cấu trúc cấp cao hơn như điểm cuối HTTP hoặc các kết quả phân tích. Mỗi nút có một loại, loại này chỉ ra loại thành phần chương trình mà nút đó đại diện, ví dụ, một nút với loại

METHOD đại diện cho một phương thức, trong khi một nút với loại LOCAL đại diện cho khai báo của một biến cục bộ.

- **Cạnh có nhãn:** Quan hệ giữa các thành phần chương trình được biểu diễn thông qua các cạnh giữa các nút tương ứng của chúng. Ví dụ, để biểu thị rằng một phương thức chứa một biến cục bộ, chúng ta có thể tạo một cạnh với nhãn CONTAINS từ nút của phương thức đến nút của biến cục bộ. Bằng cách sử dụng các cạnh có nhãn, chúng ta có thể biểu diễn nhiều loại quan hệ khác nhau trong cùng một đồ thị. Hơn nữa, các cạnh có hướng để biểu thị, ví dụ, rằng phương thức chứa biến cục bộ nhưng không phải ngược lại. Nhiều cạnh có thể tồn tại giữa cùng hai nút.

- **Cặp khóa-giá trị:** Các nút mang các cặp khóa-giá trị (thuộc tính), trong đó các khóa hợp lệ phụ thuộc vào loại nút. Ví dụ, một phương thức có ít nhất tên và chữ ký, trong khi một khai báo biến cục bộ có ít nhất tên và loại của biến được khai báo.

Tóm lại, đồ thị thuộc tính mã nguồn là các đồ thị có hướng, được gán nhãn cạnh, và chứa các thuộc tính, và chúng tôi khẳng định rằng mỗi nút mang ít nhất một thuộc tính chỉ ra loại của nó. Điều này giúp cho việc phân tích mã nguồn trở nên dễ dàng và hiệu quả hơn, đồng thời mở ra nhiều khả năng cho việc tìm kiếm và phát hiện các mẫu lập trình trong các cơ sở mã nguồn lớn.

- Đặc tả CPG của Joern được thiết kết chủ yếu cho ngôn ngữ C/C++ và Java, đưa ra các chuẩn chung như (if else, swtich case, while, for, ...) mà nhiều ngôn ngữ khác có điểm tương đồng như Python, Go, TypeScript, ... có thể tuân thủ.

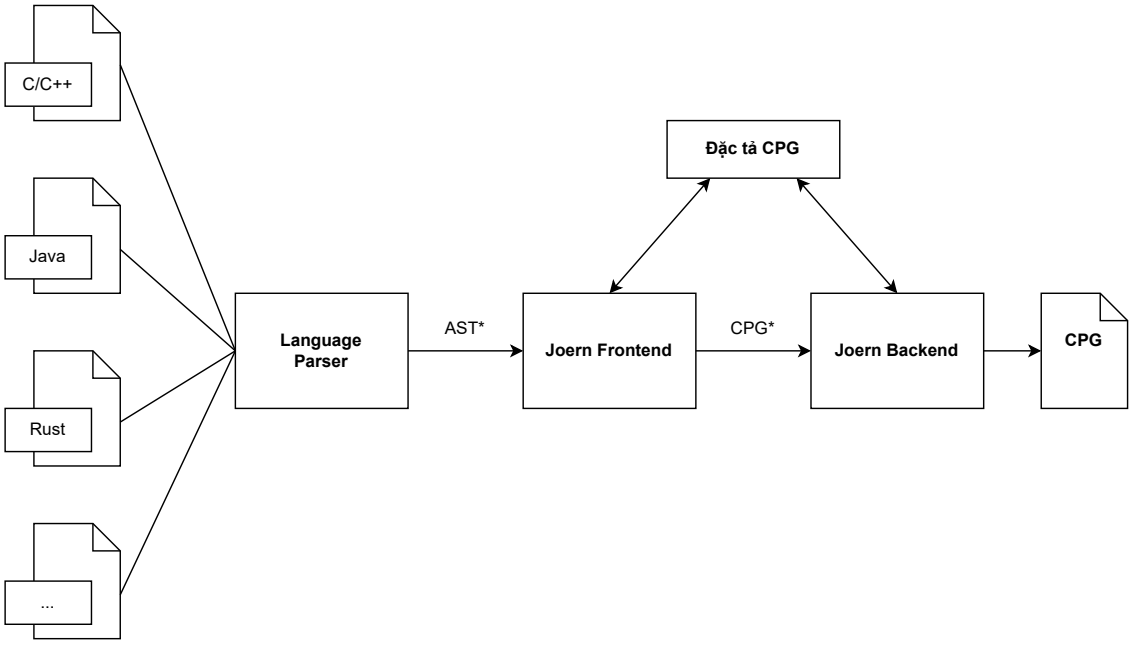
- Tuy nhiên chuẩn chung này không thể đáp ứng được nhu cầu của tất cả các ngôn ngữ. Joern tập trung cho 2 ngôn ngữ lớn là C/C++ và Java do vậy sẽ đặc tả có sẵn (hiện có) sẽ phù hợp với các ngôn ngữ có cú pháp C-like và hướng đối tượng (OOP)

- Trong khi đó Rust là một ngôn ngữ lập trình mới, có cú pháp dựa trên C-Like nhưng vẫn có đôi chút sự khác biệt vì đây là ngôn ngữ hiện đại, hỗ trợ đan xen cả hướng đối tượng và hướng hàm. Đặc biệt với tính hướng hàm, Rust có

nhiều cú pháp mới mà Joern chưa hỗ trợ, hay những biểu thức, mệnh đề trong C/C++ hay Java là không hợp lệ nhưng trong Rust thì hoàn toàn có thể

- Nhìn chung bản đặc tả CPG của Joern cung cấp 1 baseline bao phủ các tính năng phổ biến mà ngôn ngữ lập trình nào cũng có (cùng ý nghĩa nhưng có thể sử dụng cú pháp, keyword khác nhau) như *if else*, ... nhưng không thể đáp ứng được tất cả các ngôn ngữ lập trình hiện đại. Do vậy đối với từng ngôn ngữ riêng biệt vẫn phải bổ sung thêm các đặc tả mới cho phù hợp với từng ngôn ngữ, đặc biệt là Rust có cơ chế quản lý bộ nhớ an toàn thể hiện qua các tính năng *ownership*, *borrowing*, $lifetime$ mà Joern chưa hỗ trợ, và cả tính năng hướng hàm

Joern Backend, Joern Frontend



Hình 2.6: Cách hoạt động của công cụ Joern.

- Ngoài phần đặc tả CPG dùng chung cho nhiều ngôn ngữ trên lý thuyết, Joern còn cung cấp 1 kiến trúc cài đặt thực tế có tính mở rộng cao, tương ứng với đặc tả CPG. Joern hiển tại hỗ trợ rất nhiều ngôn ngữ C/C++, Java, Python, Go, TypeScript, ... Để có thể hỗ trợ được nhiều ngôn ngữ như vậy thì Joern sử dụng 2 thành phần chính là Joern Frontend và Joern Backend, đây là 2 thành phần có tính tái sử dụng cao, không phụ thuộc vào ngôn ngữ

- Luồng hoạt động của kiến trúc Joern như sau. Mỗi ngôn ngữ có tập các cú pháp khác nhau, tương ứng cũng sẽ có định nghĩa về cây AST khác nhau, đây là phần người dùng muốn mở rộng Joern cho 1 ngôn ngữ mới cần phải tự đảm nhiệm. Mã nguồn của 1 ngôn ngữ sau được được công cụ Language Parser chuyển thành cây $AST*$. Cây $AST*$ ở đây không nhất thiết chỉ dừng ở đúng mức độ thông tin là 1 cây AST mà có thể bổ sung thêm thông tin khác như kiểu dữ liệu, vị trí trong mã nguồn, ... nhưng tối thiểu đảm bảo đủ thông tin là 1 cây AST tối thiểu. Ví dụ như các ngôn ngữ có sự phát triển lâu dài như C/C++ hay Java sử dụng CDT/ JDT để làm Language Parser. CDT/JDT là công cụ rất mạnh, được dùng trong các IDE nên số lượng thông tin rất đáng kể. Còn những ngôn ngữ hiện đại như Rust, Go thì các công cụ như này chưa được phát triển toàn diện nên thông tin của cây $AST*$ chưa được đầy đủ.

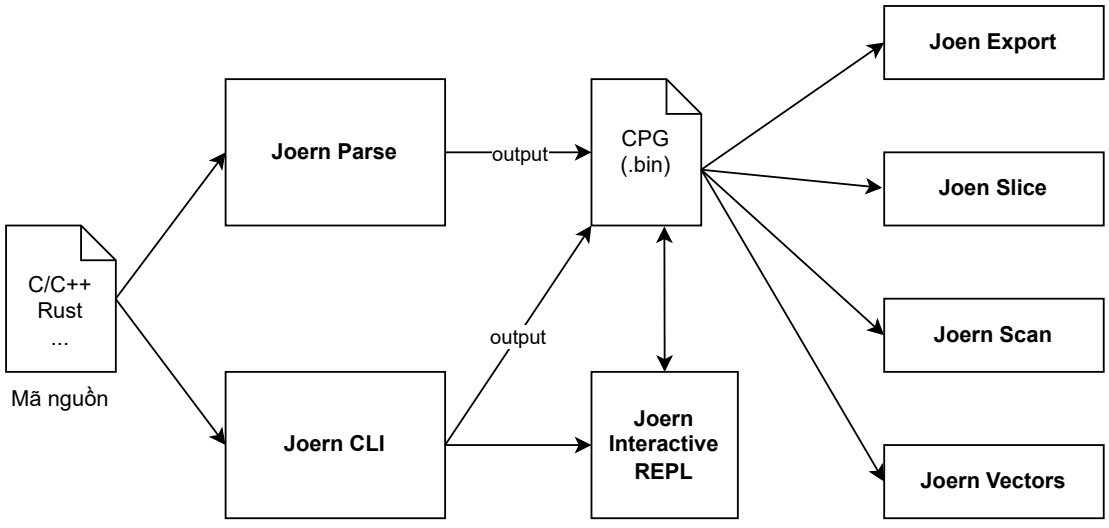
- Sau khi có cây $AST*$, cây này sẽ được biến đổi thành đồ thị thuộc tính mã nguồn (CPG) theo định nghĩa đặc tả CPG. Đây là công việc của Joern Frontend. Joern Frontend sẽ đọc cây $AST*$ và chuyển đổi thành đồ thị thuộc tính mã nguồn (CPG) theo đặc tả CPG. Joern Frontend đối với từng ngôn ngữ cũng là công việc cần thực hiện, do công việc thực tế cần làm là chuyển đổi cấu trúc dữ liệu của cây $AST*$ sang cấu trúc dữ liệu tương ứng của định nghĩa CPG. Joern Frontend đóng vai trò chuyển đổi cây $AST*$ sang cây CPG, CPG bổ sung thông tin thành đồ thị CPG

- Sau khi được Joern Frontend xử lý, ta sẽ có được đồ thị $CPG*$ nhưng đồ thị $CPG*$ này là đồ thị không hoàn chỉnh. Để hoàn thiện được đồ thị CPG thì ta cần phải sử dụng đến Joern Backend. Ở bước Joern Frontend, ta thực hiện bước chuyển đổi 1 node AST thành 1 node CPG, tạo thêm các cạnh để thể hiện các mối quan hệ giữa các node, tuy nhiên các cạnh này chưa thể hiện được đầy đủ đồ thị CPG bao gồm AST, CFG, PDG. Với cấu trúc dữ liệu CPG của Joern, ta chỉ cần định nghĩa 1 phần số cạnh, node cần thiết của đồ thị CPG, phần còn lại sẽ được Joern Backend thực hiện các thuật toán logic để có thể tự động suy diễn các mối quan hệ còn lại. Ví dụ trong cây AST có nút thể hiện vòng lặp for, ta chuyển thành nút for của CPG kèm thêm 1 số thông tin như mệnh đề điều kiện, biến chỉ số vòng lặp (index). Joern Backend nắm được thông tin này thì có thể tự động suy diễn ra các mối quan hệ như $REACHING_DEF$ (du pair), $DOMINATOR$, $POST\ DOMINATOR$,

CONTROL DEPENDENCY, *DATA DEPENDENCY*, *CONTROL FLOW*, *DATA FLOW*, ... từ đó tạo ra đồ thị CPG hoàn chỉnh. Chú ý CPG được cấu tạo từ 3 thành phần AST, CPG, PDG. Trong Joern thông tin của 3 thành phần này được chia thành 3 lớp, 1 đồ thị CPG được cấu tạo từ nhiều lớp trồng lên nhau, có thể sinh ra CPG chỉ có lớp AST, hoặc AST + CPG, hoặc AST + CPG + PDG. Hoàn toàn có thể mở rộng viết thêm các lớp khác nếu cần thiết, ví dụ như bổ sung 1 lớp thông tin về bảo mật, an toàn bộ nhớ, hay cụ thể trong Rust là lớp chứa thông tin *ownership*, *borrowing*, $lifetime$

- Sau khi toàn bộ thông tin của CPG được hoàn chỉnh dựa trên các lớp, dữ liệu CPG được xuất ra thành file binary, cấu trúc dữ liệu đồ thị. Dữ liệu này có thể được sử dụng để truy vấn thông qua các engine cơ sở dữ liệu đồ thị như neo4j, OrientDB, JanusGraph, ... hoặc có thể được sử dụng để phân tích, tìm kiếm thông qua các công cụ khác như Joern CLI, Joern Scan, Joern Slice, Joern Flow, Joern Export, Joern Vectors

2.3.2 Bộ công cụ của Joern



Hình 2.7: Các công cụ xung quanh Joern.

- Không chỉ cung cấp kiến trúc để có thể biến đổi mã nguồn từ một ngôn ngữ sang đồ thị thuộc tính mã nguồn. Joern cần cung cấp 1 loạt các cung cấp để khai thác thông tin từ đồ thị thuộc tính mã nguồn sinh ra. Các công cụ này

bao gồm: Joern Scan, Joern Slice, Joern Flow, Joern Export, Joern Vectors

- **JoernExport**: https://docs.joern.io/export/ Dump intermediate graph representations (or entire graph) of code in a given export format Joern is used in academic research as a source for intermediate graph representations of code, particularly in machine learning and vulnerability discovery applications [e.g., 1,2,3,4,5]. To support this use-case, Joern provides both plotting capabilities in the interactive console as well as the joern-export command line utility. You can also export the entire graph into a neo4j csv format (along with instructions on how to import it into a running neo4j instance), graphml, graphson or graphviz dot:

- **JoernParse**: parse ra output ngay lập tức hoặc lưu vào cơ sở dữ liệu, không traverl

- **JoernSlice**: Extract various slices from the CPG. https://docs.joern.io/cpg-slicing/ joern-slice is the entrypoint for Joern's CPG slicing mechanism and specifies ways to extract useful subsets of information from the CPG. Two modes are available: Data-flow: This is a pretty standard backwards data-flow slicing command that starts at call arguments and slices backwards to create a graph of slices. Usages: This targets locals and parameters and traces what calls they make and in which calls they are used. This is useful for describing how a variable interacts in a procedure.

- **JoernScan**: Creates a code property graph and scans it with queries from installed bundles. QueryDB https://docs.joern.io/scan/ Joern Scan ships with a default set of queries, the Joern Query Database. This set of queries is constantly updated, and contributions are highly encouraged https://github.com/joernio/joe

- **JoernVectors**: Extract vector representations of code from CPG, JoernFlow: Find flows, JoernCLI: REPL for Joern

Joern là một nền tảng mạnh mẽ dành cho việc phân tích mã nguồn, bytecode và mã nhị phân. Công cụ này tạo ra các đồ thị thuộc tính mã nguồn (code property graphs), một cách biểu diễn đồ thị của mã giúp cho việc phân tích mã nguồn đa ngôn ngữ trở nên dễ dàng hơn. Các đồ thị thuộc tính mã nguồn được lưu trữ trong một cơ sở dữ liệu đồ thị tùy chỉnh, cho phép khai thác mã nguồn thông qua các

truy vấn tìm kiếm được xây dựng trong một ngôn ngữ truy vấn đặc thù dựa trên Scala. Joern được phát triển với mục tiêu cung cấp một công cụ hữu ích cho việc khám phá lỗ hổng bảo mật và nghiên cứu phân tích chương trình tĩnh.

Joern hỗ trợ các nhà phát triển và nhà nghiên cứu trong việc tìm kiếm và xác định các điểm yếu tiềm ẩn trong mã nguồn, giúp nâng cao chất lượng và bảo mật của phần mềm. Bên cạnh đó, Joern còn có khả năng phân tích mã nguồn đa ngôn ngữ, giúp các nhóm phát triển có thể làm việc với nhiều ngôn ngữ lập trình khác nhau mà không gặp trở ngại về công cụ. Với khả năng truy vấn mạnh mẽ và linh hoạt, Joern đã trở thành một công cụ quan trọng trong việc phân tích mã nguồn và phát hiện các lỗ hổng bảo mật. Bạn có thể tìm hiểu thêm về Joern tại địa chỉ https://joern.io/.

Joern hỗ trợ nhiều ngôn ngữ lập trình khác nhau. Các ngôn ngữ được hỗ trợ bao gồm C/C++, Java, JavaScript, Python, x86/x64, JVM Bytecode, Kotlin, PHP, Rust, Swift, Ruby và C#. Điều này cho thấy Joern có khả năng phân tích mã nguồn đa ngôn ngữ, giúp các nhà phát triển và nhà nghiên cứu có thể làm việc với nhiều ngôn ngữ lập trình khác nhau mà không gặp trở ngại về công cụ. Tuy nhiên, Joern chưa hỗ trợ cho ngôn ngữ Rust.

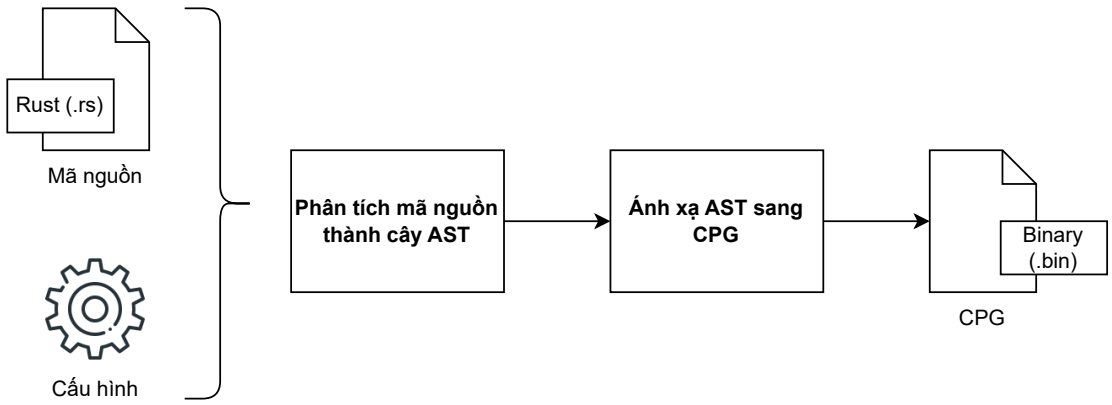
Chương 3

Phân tích mã nguồn Rust

Chương này sẽ trình bày quy trình phân tích mã nguồn cho ngôn ngữ lập trình Rust bao gồm xây dựng cây cú pháp trừu tượng, ánh xạ từ cây cú pháp trừu tượng sang đồ thị thuộc tính mã nguồn. Chương này cũng sẽ nêu ra những điểm đã thực hiện được, khó khăn gặp phải và hướng cải thiện tiếp theo.

3.1 Quy trình tổng quan

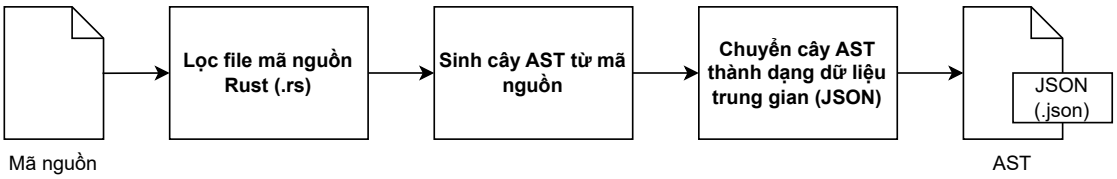
Mục tiêu của công cụ là phân tích mã nguồn Rust và xây dựng đồ thị thuộc tính mã nguồn (CPG) biểu diễn mã nguồn đó. Hình 3.1 thể hiện các bước xây dựng cây CPG từ các tệp mã nguồn Rust.



Hình 3.1: Quy trình phân tích mã nguồn Rust.

Mã nguồn Rust sẽ được trình phân tích và sinh ra cây AST tương ứng với từng tệp mã nguồn. Sau đó, cây cú pháp trừu tượng sẽ được ánh xạ sang đồ thị thuộc tính mã nguồn. Cuối dùng, đồ thị CPG sẽ được lưu dưới dạng cơ sở dữ liệu đồ thị phục vụ mục đích của người dùng.

3.2 Xây dựng cây cú pháp trừu tượng



Hình 3.2: Quy trình xây dựng cây cú pháp trừu tượng.

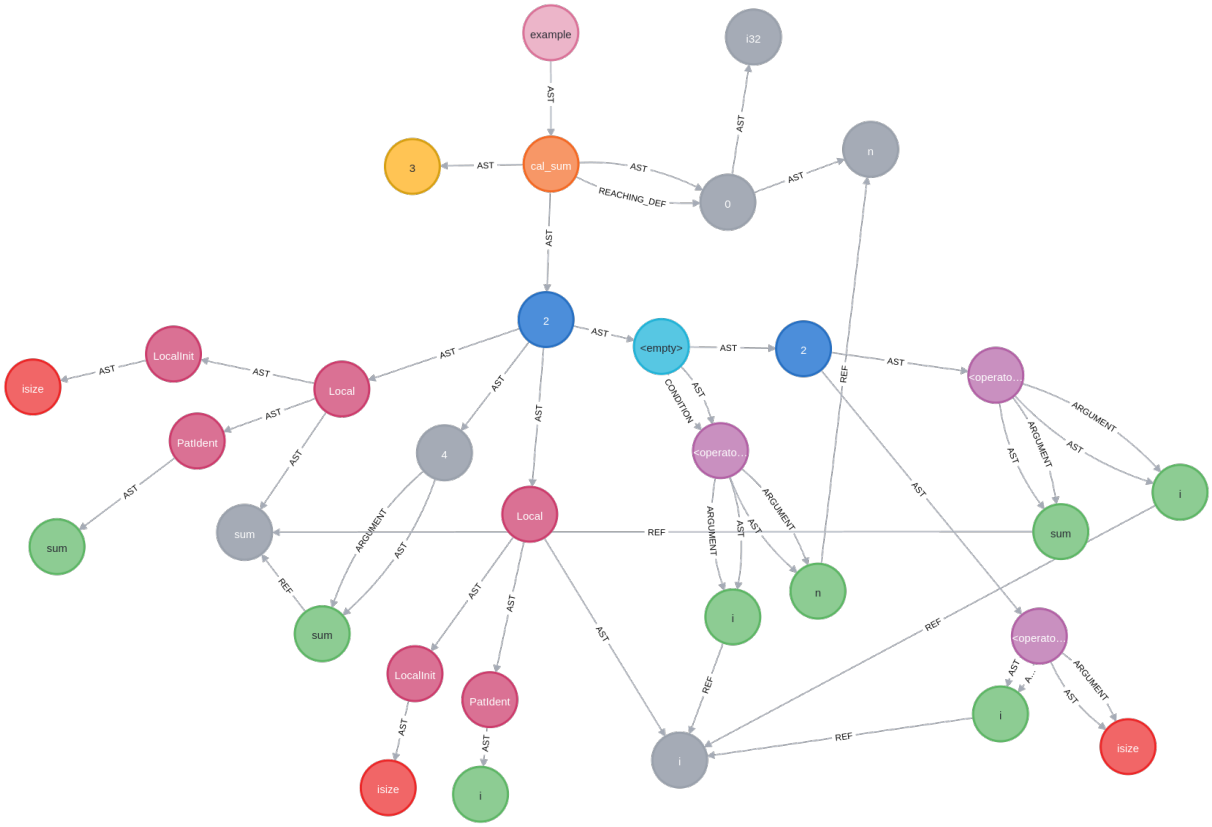
Quy trình xây dựng cây cú pháp trừu tượng bao gồm ba bước được thể hiện trong Hình 3.2, chi tiết các bước được tiến hành như sau.

1. Từ thư mục của dự án, lọc lấy các tệp mã nguồn Rust (các tệp có đuôi là .rs).

2. Với mỗi tệp mã nguồn, sử dụng thư viện *syn* [20] để phân tích thành cây cú pháp trừu tượng (AST) ứng với tệp đó. *syn* là 1 thư viện phân tích mã nguồn thành cây cú pháp được sử dụng trong cộng đồng Rust và kể cả tính năng *procedural macro* [14] của Rust cũng cần thư viện này để cài đặt. Tính tới thời điểm hiện tại Rust không có đặc tả ngôn ngữ chính thức, cộng đồng sang sử dụng *Rust Reference* [16] coi như phiên bản sát nhất so với một đặc tả ngữ chính thức. Thư viện *syn* xây dựng các cây cú pháp trừu tượng dựa trên *Rust Reference*.

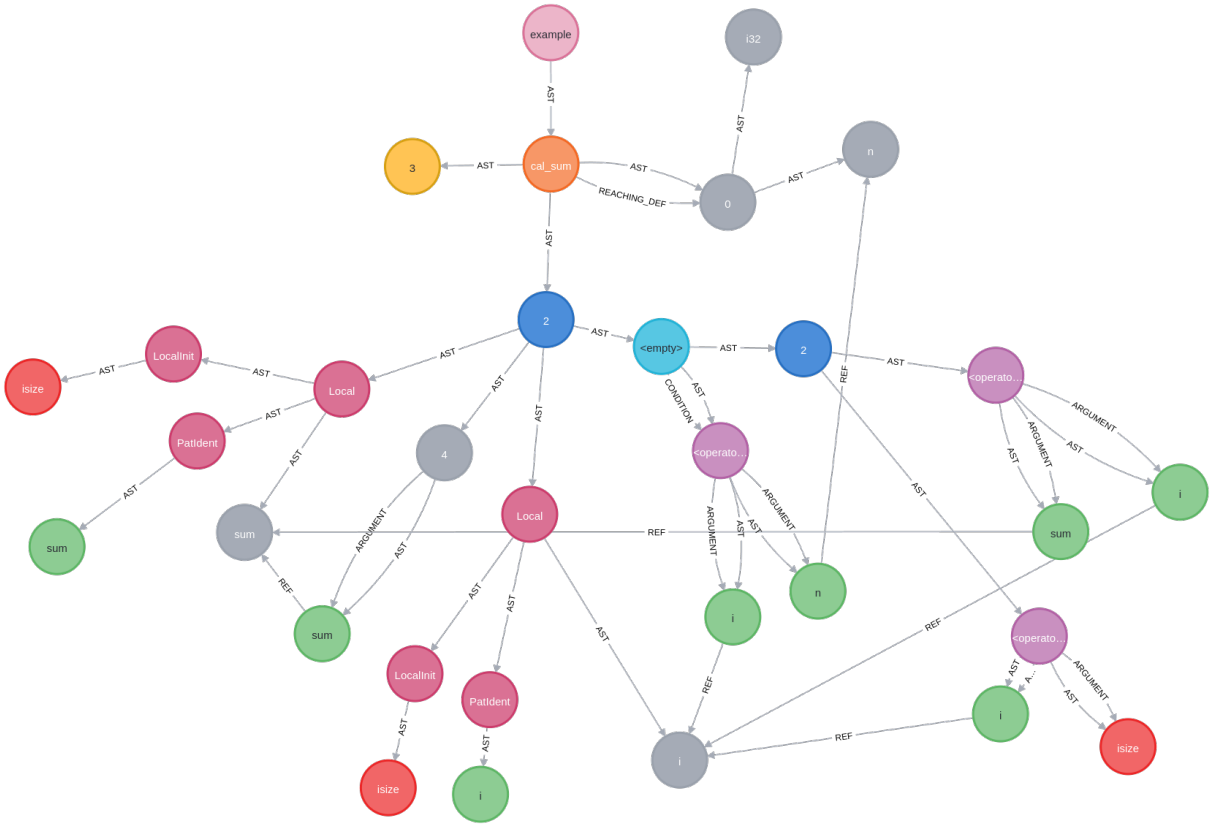
3. Chuyển đổi cây cú pháp trừu tượng từ ngôn ngữ Rust sang định dạng JSON. Do Joern có thể được sử dụng cho nhiều ngôn ngữ và Joern Frontend không phụ thuộc vào công cụ Language Parser của một ngôn ngữ nhất định, do vậy cần có định dạng dữ liệu trung gian để chuyển đổi cây AST của Language Parser sang ngôn ngữ Scala của Joern Frontend. Các kiểu dữ liệu trung gian phổ biến như JSON, XML, YAML, trong đó JSON được lựa chọn bởi tính đơn giản, dễ chuyển đổi.

Trong quá trình xây dựng cây cú pháp trừu tượng, các thành phần mã nguồn trong Rust sẽ được phân tích thành dạng cây tương ứng. Dưới đây là một số hình ảnh ví dụ về cây cú pháp trừu tượng ứng với các thành phần mã nguồn này.



Hình 3.3: Ví dụ đồ thị thuộc tính mã nguồn.

Hình 3.3 biểu diễn một hàm được phân tích thành một nút định nghĩa hàm (FunctionDeclaration), nút này có các thuộc tính là chữ ký (signature), kiểu trả về (returnType) và tên đầy đủ (fullName). Nút có các nút con gồm nút định danh (Identifier) biểu diễn định danh của hàm, nút kiểu hàm (FunctionType) biểu diễn kiểu dữ liệu của hàm và nút thân hàm (BlockStatement).



Hình 3.4: Ví dụ đồ thị thuộc tính mã nguồn.

Ví dụ về biểu diễn một kiểu cấu trúc được thể hiện trong hình 3.4. Nút TypeSpecification đại diện cho định nghĩa kiểu. Nút Identifier là nút định danh biểu diễn tên kiểu. Nút StructType biểu diễn kiểu cấu trúc. Nút FieldList có các nút con là Field biểu diễn các thuộc tính của kiểu này.

Các nút trong cây cú pháp mã nguồn của Rust được liệt kê trong bảng 3.1.

STT	**Tên nút**	**Mô tả**
1	Abi	The binary interface of a function: ‘extern "C"‘.
2	AngleBracketed GenericArguments	Angle bracketed arguments of a path segment: the ‘<K, V>‘ in HashMap<K, V>.
3	Arm	One arm of a ‘match‘ expression: ‘0..=10 => return true; ‘.
4	AssocConst	An equality constraint on an associated constant: ‘the PANIC = false in Trait<PANIC = false>‘.
5	AssocType	A binding (equality constraint) on an associated type: ‘the Item = u8 in Iterator<Item = u8>‘.
6	Attribute	An attribute, like ‘#[repr(transparent)]‘.
7	BareFnArg	An argument in a function type: ‘the usize in fn(usize) -> bool‘.

8	BareVariadic	The variadic argument of a function pointer like ‘fn(usize, ...)‘.
9	Block	A braced block containing Rust statements.
10	BoundLifetimes	A set of bound lifetimes: ‘for<’a, ’b, ’c>‘.
11	ConstParam	A const generic parameter: ‘const LENGTH: usize‘.
12	Constraint	An associated type bound: ‘Iterator<Item: Display>‘.
13	DataEnum	An enum input to a ‘proc_macro_derive‘ macro.
14	DataStruct	A struct input to a ‘proc_macro_derive‘ macro.
15	DataUnion	An untagged union input to a ‘proc_macro_derive‘ macro.
16	DeriveInput	Data structure sent to a ‘proc_macro_derive‘ macro.
17	Error	Error returned when a Syn parser cannot parse the input tokens.
18	ExprArray	A slice literal expression: ‘[a, b, c, d]‘.
19	ExprAssign	An assignment expression: ‘a = compute()‘.
20	ExprAsync	An async block: ‘async ... ‘.
21	ExprAwait	An await expression: ‘fut.await‘.
22	ExprBinary	A binary operation: ‘a + b, a += b‘.
23	ExprBlock	A blocked scope: ‘ ... ‘.
24	ExprBreak	A ‘break‘, with an optional label to break and an optional expression.
25	ExprCall	A function call expression: ‘invoke(a, b)‘.
26	ExprCast	A cast expression: ‘foo as f64‘.
27	ExprClosure	A closure expression: ‘[a, b] + a + b‘.
28	ExprConst	A const block: ‘const ... ‘.
29	ExprContinue	A ‘continue‘, with an optional label.
30	ExprField	Access of a named struct field ‘obj.k‘ or unnamed tuple struct field ‘obj.0‘.
31	ExprForLoop	A for loop: ‘for pat in expr ... ‘.
32	ExprGroup	An expression contained within invisible delimiters.
33	ExprIf	An if expression with an optional else block: if expr ... else ... .
34	ExprIndex	A square bracketed indexing expression: vector[2].
35	ExprInfer	The inferred value of a const generic argument, denoted _.
36	ExprLet	A let guard: let Some(x) = opt.
37	ExprLit	A literal in place of an expression: 1, "foo".
38	ExprLoop	Conditionless loop: loop ... .
39	ExprMacro	A macro invocation expression: format!("", q).
40	ExprMatch	A match expression: match n Some(n) => , None => .
41	ExprMethodCall	A method call expression: x.foo::<T>(a, b).

42	ExprParen	A parenthesized expression: (a + b).
43	ExprPath	A path like std::mem::replace possibly containing generic parameters and a qualified self-type.
44	ExprRange	A range expression: 1..2, 1.., ..2, 1..=2, ..=2.
45	ExprRawAddr	Address-of operation: &raw const place or &raw mut place.
46	ExprReference	A referencing operation: &a or &mut a.
47	ExprRepeat	An array literal constructed from one repeated element: [0u8; N].
48	ExprReturn	A return, with an optional value to be returned.
49	ExprStruct	A struct literal expression: Point x: 1, y: 1 .
50	ExprTry	A try-expression: expr?.
51	ExprTryBlock	A try block: try ... .
52	ExprTuple	A tuple expression: (a, b, c, d).
53	ExprUnary	A unary operation: !x, x.
54	ExprUnsafe	An unsafe block: unsafe ... .
55	ExprWhile	A while loop: while expr ... .
56	ExprYield	A yield expression: yield expr.
57	Field	A field of a struct or enum variant.
58	FieldPat	A single field in a struct pattern.
59	FieldValue	A field-value pair in a struct literal.
60	FieldsNamed	Named fields of a struct or struct variant such as Point x: f64, y: f64 .
61	FieldsUnnamed	Unnamed fields of a tuple struct or tuple variant such as Some(T).
62	File	A complete file of Rust source code.
63	ForeignItemFn	A foreign function in an extern block.
64	ForeignItemMacro	A macro invocation within an extern block.
65	ForeignItemStatic	A foreign static item in an extern block: static ext: u8.
66	ForeignItemType	A foreign type in an extern block: type void.
67	Generics	Lifetimes and type parameters attached to a declaration of a function, enum, trait, etc.
68	Ident	A word of Rust code, which may be a keyword or legal variable name.
69	ImplGenerics	Returned by Generics::split_for_impl.
70	ImplItemConst	An associated constant within an impl block.
71	ImplItemFn	An associated function within an impl block.
72	ImplItemMacro	A macro invocation within an impl block.
73	ImplItemType	An associated type within an impl block.
74	Index	The index of an unnamed tuple struct field.

75	ItemConst	A constant item: ‘const MAX: u16 = 65535‘.
76	ItemEnum	An enum definition: ‘enum Foo<A, B> A(A), B(B) ‘.
77	ItemExternCrate	An extern crate item: ‘extern crate serde‘.
78	ItemFn	A free-standing function: ‘fn process(n: usize) -> Result<(), ... ‘.
79	ItemForeignMod	A block of foreign items: ‘extern "C" ... ‘.
80	ItemImpl	An impl block providing trait or associated items: ‘impl<A> Trait for Data<A> ... ‘.
81	ItemMacro	A macro invocation, which includes ‘macro_rules!‘ definitions.
82	ItemMod	A module or module declaration: ‘mod m or mod m ... ‘.
83	ItemStatic	A static item: ‘static BIKE: Shed = Shed(42)‘.
84	ItemStruct	A struct definition: ‘struct Foo<A> x: A ‘.
85	ItemTrait	A trait definition: ‘pub trait Iterator ... ‘.
86	ItemTraitAlias	A trait alias: ‘pub trait SharableIterator = Iterator + Sync‘.
87	ItemType	A type alias: ‘type Result<T> = std::result::Result<T, MyError>‘.
88	ItemUnion	A union definition: ‘union Foo<A, B> x: A, y: B ‘.
89	ItemUse	A use declaration: ‘use std::collections::HashMap‘.
90	Label	A lifetime labeling a for, while, or loop.
91	Lifetime	A Rust lifetime: ‘’a‘.
92	LifetimeParam	A lifetime definition: ‘’a: ’b + ’c + ’d‘.
93	LitBool	A boolean literal: ‘true or false‘.
94	LitByte	A byte literal: ‘b’f’‘.
95	LitByteStr	A byte string literal: ‘b"foo"‘.
96	LitCStr	A null-terminated C-string literal: ‘c"foo"‘.
97	LitChar	A character literal: ‘’a’‘.
98	LitFloat	A floating point literal: ‘1f64 or 1.0e10f64‘.
99	LitInt	An integer literal: ‘1 or 1u16‘.
100	LitStr	A UTF-8 string literal: ‘"foo"‘.
101	Local	A local let binding: ‘let x: u64 = s.parse()?‘.
102	LocalInit	The expression assigned in a local let binding, including optional diverging else block.
103	Macro	A macro invocation: ‘println!("!", mac)‘.
104	MetaList	A structured list within an attribute, like ‘derive(Copy, Clone)‘.
105	MetaNameValue	A name-value pair within an attribute, like ‘feature = "nightly"‘.

106	Parenthesized GenericArguments	Arguments of a function path segment: the (A, B) -> C in ‘Fn(A, B) -> C‘.
133	PatConst	A pattern that contains a constant.
134	PatIdent	A pattern that matches an identifier or wildcard: ‘mut var @ pat‘.
135	PatLit	A pattern that matches a literal value.
136	PatMacro	A pattern that comes from an inline macro.
137	PatOr	A pattern that matches any one of a list of patterns.
138	PatParen	A pattern enclosed in parentheses.
139	PatPath	A pattern that matches a path to a constant.
140	PatRange	A pattern that matches a range of values.
141	PatReference	A pattern that matches a reference.
142	PatRest	A pattern that matches the rest pattern: ‘..‘.
143	PatSlice	A pattern that matches a slice of values.
144	PatStruct	A pattern that matches a struct.
145	PatTuple	A pattern that matches a tuple.
146	PatTupleStruct	A pattern that matches a tuple struct.
147	PatType	A pattern that matches a type.
148	PatWild	A wildcard pattern: ‘_‘.
149	Path	A path like ‘std::mem::replace‘, possibly containing generic parameters and a self-type.
150	PathSegment	A segment of a path: ‘std‘, ‘std::mem‘, ‘std::mem::replace‘.
151	PreciseCapture	Specifies precise capture behavior for closures.
152	PredicateLifetime	A lifetime predicate in a where clause.
153	PredicateType	A type predicate in a where clause.
154	QSelf	The portion of a path before the ‘::‘, if the path is qualified.
155	Receiver	The self argument of an associated method: ‘&self‘ or ‘&mut self‘.
156	Signature	A function signature in a trait or impl block.
157	StmtMacro	A macro invocation as a statement: ‘println!("Hello, world!")‘.
158	TraitBound	A trait bound on a type parameter or associated type.
159	TraitItemConst	An associated constant in a trait.
160	TraitItemFn	An associated function in a trait.
161	TraitItemMacro	A macro invocation in a trait.
162	TraitItemType	An associated type in a trait.
163	TurboFish	A turbo-fish, e.g., ‘collect::<Vec<_»()‘.
164	TypeArray	An array type: ‘[T; n]‘.
165	TypeBareFn	A bare function type: ‘fn(usize) -> bool‘.

166	TypeGenerics	A generic type parameter in a type definition.
167	TypeGroup	A group of types.
168	TypeImplTrait	An ‘impl Trait‘ type in return position.
169	TypeInfer	An inferred type: ‘_‘.
170	TypeMacro	A macro in the type position.
171	TypeNever	The never type: !.
172	TypeParam	A generic type parameter: T: Into<String>.
173	TypeParen	A parenthesized type equivalent to the inner type.
174	TypePath	A path like std::slice::Iter, optionally qualified with a self-type as in <Vec<T> as SomeTrait>::Associated.
175	TypePtr	A raw pointer type: const T or mut T.
176	TypeReference	A reference type: &’a Tor &’a mut T.
177	TypeSlice	A dynamically sized slice type: [T].
178	TypeTraitObject	A trait object type dyn Bound1 Bound2 + Bound3 where Bound is a trait or a lifetime.
179	TypeTuple	A tuple type: (A, B, C, String).
180	UseGlob	A glob import in a use item: .
181	UseGroup	A braced group of imports in a use item: A, B, C.
182	UseName	An identifier imported by a use item: HashMap.
183	UsePath	A path prefix of imports in a use item: std::..
184	UseRename	An renamed identifier imported by a use item: HashMap as Map.
185	Variadic	The variadic argument of a foreign function.
186	Variant	An enum variant.
187	VisRestricted	A visibility level restricted to some path: pub (self) or pub (super) or pub (crate) or pub (in some::module).
188	WhereClause	A where clause in a definition: where T: Deserialize<’de>, D: ’static.

Bảng 3.1: Các nút trong cú pháp mã nguồn của Rust.

3.3 Xây dựng đồ thị thuộc tính mã nguồn (CPG)

Mục này sẽ trình bày quá trình công cụ phân tích ánh xạ cây cú pháp trừu tượng thành cây đồ thị thuộc tính mã nguồn.

3.3.1 Các loại đỉnh và cạnh của đồ thị thuộc tính mã nguồn CPG

Đồ thị thuộc tính mã nguồn là dạng cấu trúc dữ liệu được kết hợp giữa cây cú pháp trừu tượng, đồ thị luồng điều khiển và đồ thị phụ thuộc chương trình. Đồ thị này biểu diễn các đỉnh là các nút trong cây cú pháp trừu tượng và các cạnh của đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa chúng. Đồ thị này giúp theo dõi các luồng điều khiển, các phụ thuộc trong mã nguồn.

Bảng 3.2 dưới đây mô tả các đỉnh trong đồ thị thuộc tính mã nguồn

STT	**Tên nút**	**Mô tả**
1	META_DATA	Nút này chứa siêu dữ liệu (metadata) của đồ thị. Một đồ thị CPG phải có và chỉ có duy nhất một nút META_DATA.
2	FILE	Nút biểu diễn một tệp mã nguồn. Với mỗi tệp tin trong mã nguồn, đồ thị sẽ có chính xác một nút FILE để biểu diễn tệp mã nguồn đó.
3	NAMESPACE	Nút này biểu diễn một không gian tên (namespace) hoặc một gói (package), đối với Rust, nút này biểu diễn các gói trong mã nguồn.
4	NAMESPACE_BLOCK	Nút này biểu diễn một tham chiếu đến không gian tên (namespace) tương ứng. Nó chứa các khối mã nguồn được định nghĩa dưới không gian tên (namespace) tương ứng.
5	METHOD	Biểu diễn các hàm, phương thức hoặc biểu thức lambda.
6	PARAMETER_IN	Nút đại diện cho một tham số đầu vào của hàm.
7	PARAMETER_OUT	Nút đại diện cho một tham số đầu ra của hàm.
8	METHOD_RETURN	Nút này biểu diễn kiểu trả về của một hàm.
9	MEMBER	Biểu diễn thuộc tính của một kiểu cấu trúc (struct).
10	TYPE	Nút đại diện cho một thể hiện (instance) của một kiểu dữ liệu.
11	TYPE_ARGUMENT	Biểu diễn đối số của một kiểu dữ liệu, có thể hình dung giống như các kiểu dữ liệu generic trong JAVA.
12	TYPE_DECL	Biểu diễn một khai báo kiểu dữ liệu ví dụ như khai báo một kiểu cấu trúc (struct) hay khai báo một giao diện (interface).
13	BLOCK	Biểu diễn một khối mã nguồn.
14	CALL	Biểu diễn một lời gọi hàm.
15	CONTROL_STRUCTURE	Biểu diễn một cấu trúc điều khiển ví dụ như câu lệnh if else, vòng lặp for, cấu trúc switch case.
16	IDENTIFIER	Nút định danh biểu diễn tham chiếu đến một biến.
17	JUMP_LABEL	Biểu diễn các cấu trúc nhảy như BREAK, CONTINUE, GOTO.
18	LITERAL	Biểu diễn một hằng số như số nguyên hoặc chuỗi.
19	LOCAL	Biểu diễn một biến cục bộ.

20	METHOD_REF	Biểu diễn một tham chiếu đến hàm khi hàm đó được dùng làm tham số cho một lời gọi.
21	MODIFIER	Biểu diễn một bộ chỉnh sửa (modifier) như static, public hay private.
22	RETURN	Biểu diễn một chỉ thị trả về (return instruction).
23	TYPE_REF	Biểu diễn tham chiếu đến một kiểu dữ liệu.

Bảng 3.2: Các đỉnh trong đồ thị thuộc tính mã nguồn (CPG)

Bảng 3.3 liệt kê các quan hệ trong đồ thị thuộc tính mã nguồn (CPG)

STT	**Tên nút**	**Mô tả**
1	SOURCE_FILE	Quan hệ biểu diễn một nút là tệp gốc của một nút khác. Quan hệ cha con (biểu diễn quan hệ trong cây cú pháp mã nguồn (AST)).
2	AST	Cây cú pháp trừu tượng (Abstract Syntax Tree).
3	CALL	Quan hệ gọi, dùng để biểu diễn quan hệ giữa hàm/phương thức với nút gọi hàm/phương thức đó.
4	CONTAINS	Quan hệ bao gồm.
5	CONDITION	Quan hệ điều kiện, dùng để biểu diễn quan hệ giữa khối điều khiển như if else, switch hay for với biểu thức điều kiện của chúng.
6	ARGUMENT	Quan hệ đối số kết nối các điểm gọi (kiểu nút CALL) với các đối số của chúng, cũng như các nút RETURN với các biểu thức trả về.
7	RECEIVER	Quan hệ kết nối các điểm gọi (CALL) tới đối số nhận (receiver argument) của chúng. Một đối số nhận là một đối tượng mà phương thức đó thuộc về (có thể hiểu đối số nhận ở đây là con trỏ 'this' trong Java).
8	CFG	Quan hệ này biểu diễn luồng điều khiển từ nút nguồn đến nút đích.
9	DOMINATE	Quan hệ biểu diễn tính kiểm soát (dominate) ngay lập tức từ nút nguồn đến nút đích.
10	POST_DOMINATE	Quan hệ biểu diễn nút nguồn kiểm soát (dominate) ngay lập tức sau nút đích.
11	CDG	Quan hệ biểu diễn nút đích phụ thuộc điều khiển vào nút nguồn.
12	REACHING_DEF	Quan hệ biểu diễn một biến được tạo ra từ nút nguồn và không bị gán lại giá trị trên đường đi tới nút đích.
13	CONTAINS	Quan hệ này kết nối một nút tới hàm/phương thức chứa nó.

14	EVAL_TYPE	Quan hệ kết nối một nút tới nút kiểu dữ liệu của nút đó.
15	PARAMETER_LINK	Quan hệ kết nối một nút tham số đầu vào với nút tham số đầu ra tương ứng của hàm/phương thức đó.

Bảng 3.3: Các cạnh trong đồ thị thuộc tính mã nguồn (CPG).

3.3.2 Chuyển hóa cây cú pháp trừu trượng sang đồ thị thuộc tính mã nguồn

Với các thông tin có được về cây cú pháp mã nguồn được lưu trong các tệp JSON, đồ thị thuộc tính mã nguồn sẽ được dựng lên từ những thông tin đó. Sau đây tôi sẽ mô tả việc ánh xạ các thành phần mã nguồn chính của Rust từ cây cú pháp mã nguồn sang đồ thị thuộc tính mã nguồn.

Ánh xạ tệp (file) và gói (package)

Hình 3.5 biểu diễn ánh xạ từ mã nguồn sang cây cú pháp trừu tượng và ánh xạ sang đồ thị thuộc tính mã nguồn. Cây cú pháp trừu tượng của Rust không có nút biểu diễn gói, thông tin về gói sẽ được lưu trong nút tệp định nghĩa gói đó. Khi ánh xạ nút tệp sang đồ thị thuộc tính mã nguồn sẽ biểu diễn được nút FILE và NAMESPACE tương ứng. Nút NAMESPACE_BLOCK biểu diễn thân của gói, nút này đóng vai trò làm nút cha của các định nghĩa bên trong thân của gói.

3.4 Thực nghiệm trên các tính năng đã hỗ trợ

3.4.1 if let

- If else là cấu trúc điều khiển phổ thông có mặt trong tất cả các loại ngôn ngữ phổ biến. Nó cho phép chúng ta kiểm tra một điều kiện và thực thi một khối mã nếu điều kiện đó đúng và một khối mã khác nếu điều kiện đó sai. Cấu trúc câu lệnh if else sẽ bao gồm một điều kiện và 2 khối mã. Nếu điều kiện đúng, khối mã trong if sẽ được thực thi, ngược lại khối mã trong else sẽ được thực thi. Thông thường khối điều kiện sẽ là biểu thức trả về kết quả đúng hoặc sai của biểu thức đó. Trong ngôn ngữ như C/C++, Java thì chỉ chấp nhận biểu thức điều kiện, sử dụng mệnh đề điều kiện (có dấu ; kết thúc câu lệnh) là không hợp lệ.
- Tuy nhiên trong Rust, với tinh thần Expresion Over Statement và nhằm mục đích tạo sự ngắn gọn cho câu lệnh, Rust cho phép thực hiện phép khai báo biến và gán giá trị cho biến trong câu lệnh if. Điều này giúp chúng ta viết mã nguồn ngắn gọn hơn, dễ đọc hơn và dễ bảo trì hơn. Cú pháp của câu lệnh if let sẽ là if let <pattern> = <expression> <block> else <block> . Cú pháp này sẽ thực hiện 2 công việc, kiểm tra xem expression có match 1 pattern hay không, nếu không match thì trả về false, nếu có match thì tiếp tục thực hiện tạo biến mới dựa theo pattern vừa extract được. Các biến được extract từ pattern sẽ có phạm vi tồn tại trong khối lệnh điều kiện thành công của lệnh if. Do thực hiện 2 công việc

trong cùng 1 câu lệnh nên khi quy đổi sang câu lệnh tương tự trong ngôn ngữ khác như C/C++, Java sẽ tương đương 2 câu lệnh gán biến và kiểm tra điều kiện

```rust
fn basic() {
    let number: Option<i32> = None;
    let i_like_letters = false;

    if let Some(i) = number {
        println!("Matched number {:?}!", i);
    } else if i_like_letters {
        // ...
    } else {
        // ...
    }
}
```

Đoạn mã 3.1: Ví dụ mã nguồn cho if let

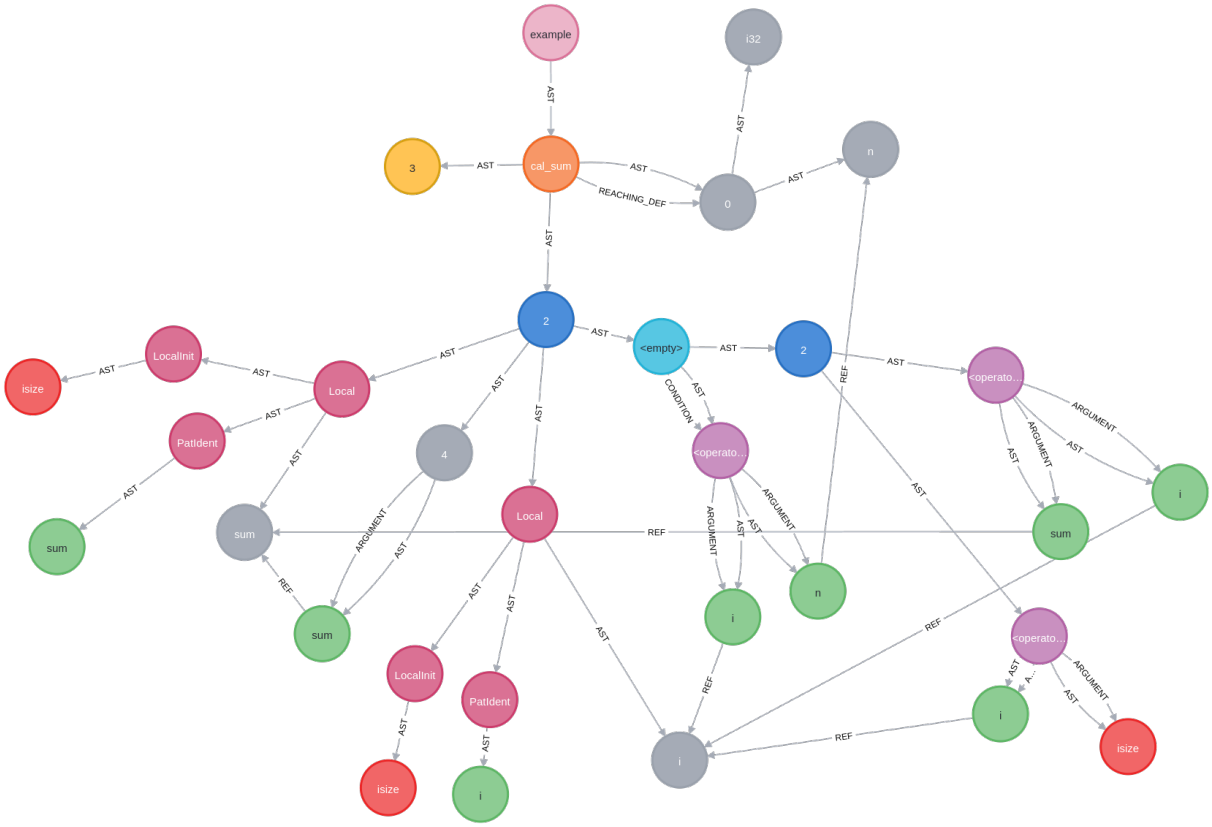
```java
public class Main {
    public static void main(String[] args) {
        Object obj = inputObj(); // This could be any object or null
        boolean iLikeLetters = false;

        if (obj != null) {
            Integer number = (Integer)obj;
            System.out.println("Matched " + number + "!");
        } else if (iLikeLetters) {
            // ...
        } else {
           // ...
        }
    }
}
```

Đoạn mã 3.2: Ví dụ mã nguồn cho if let tương đương trong Java

- Hình 3.5, biểu diễn đồ thị thuộc tính mã nguồn cho ví dụ mã nguồn if let. Trong đó cạnh $CONDITION$ của node $ExprIf$ chỉ tới node $Local$, đồng thời cũng khai báo biến mới với tên i. Các mệnh đề trong khối code được thực thi khi điều kiện đúng nếu có nhắc tới biến i thì sẽ tham chiếu tới biến i vừa được khai báo thông qua cạnh REF

- ...



Hình 3.5: Ví dụ đồ thị thuộc tính mã nguồn cho if let

3.4.2 while let

- Tương tự với tính năng if let ở trên thì Rust cũng hỗ trợ luôn việc khai báo biến làm điều kiện cho vòng lặp while. Có thể hiểu là nếu việc pattern matching của vế trái thành công thì sẽ tiếp tục thực hiện vòng lặp, sẽ có 1 biến i mới được khởi tạo đối với mỗi lần lặp. Các mệnh đề trong khối code khi điều kiện thành công của vòng lặp sẽ tham chiếu tới biến i vừa được khai báo thông qua cạnh REF nếu có sử dụng tới
- Không chỉ vậy vế phải của điều kiện có thể được gán lại liên tục trong quá trình lặp, nếu vế phải không match với pattern nào thì vòng lặp sẽ kết thúc.

```rust
fn main() {
    let mut optional = Some(0);

    while let Some(i) = optional {
        if i > 9 {
            println!("Greater than 9, quit!");
            optional = None;
        } else {
            println!("`i` is `{:?}`. Try again.", i);
            optional = Some(i + 1);
        }
    }
}
```

Đoạn mã 3.3: Ví dụ mã nguồn cho while let

3.4.3 match

- Ngoài việc có thể sử dụng mệnh đề gán biến thành biểu thức điều kiện, tính hướng hàm của Rust còn thể hiện ở tính match, sự kết hợp giữa pattern matching và Algebraic Data Types. Cấu trúc match trong Rust không chỉ kiểm tra giá trị của một biến mà còn có thể kết hợp với các mẫu phức tạp hơn, bao gồm kiểm tra điều kiện, so sánh phạm vi và kiểm tra các kiểu dữ liệu khác nhau. Điều này mang lại cho Rust tính linh hoạt cao hơn so với switch trong C/C++ và Java, vốn chủ yếu dựa trên so sánh giá trị chính xác.
- Một điểm khác biệt quan trọng giữa match và switch là tính toàn diện của match. Rust yêu cầu các mẫu trong match phải bao quát tất cả các khả năng có thể xảy ra, nếu không trình biên dịch sẽ báo lỗi. Điều này giúp đảm bảo rằng không có tình huống nào bị bỏ qua, tăng cường độ an toàn và độ tin cậy của mã nguồn. Trong khi đó, switch trong C/C++ và Java không yêu cầu bao quát tất cả các trường hợp, và việc bỏ sót một trường hợp có thể dẫn đến lỗi logic hoặc hành vi không mong muốn.
- Thêm vào đó, match trong Rust hỗ trợ "destructuring", cho phép trích xuất và xử lý các thành phần của cấu trúc dữ liệu phức tạp ngay trong quá trình đối chiếu mẫu. Ví dụ, Rust có thể match trên các tuple, enum, hoặc thậm chí là các phần tử của một mảng, trong khi switch của C/C++ và Java thường chỉ giới hạn trong các giá trị nguyên thủy.

```rust
enum Color {
    Red,
    Blue(u32, u32, u32),
    Green {
      red: u32,
      green: u32,
      blue: u32,
    },
}

fn main() {
    let color = Color::Blue(0, 0, 255);

    match color {
        Color::Red =>
            println!("The color is Red!")
        Color::Blue(r, g, b) =>
            println!("Red: {}, green: {}, and blue: {}!", r, g, b)
        Color::Green {red, green, blue} =>
            println!(
              "Red: {}, green: {}, and blue: {}!",
              red, green, blue
            ),
    }
}
```

Đoạn mã 3.4: Ví dụ mã nguồn cho match, pattern matching

3.4.4 lifetime

- Nói kĩ lại cơ chế của lifetime, cái nào sống lâu hơn cái nào, borrow checker, được kiểm tra vào lúc compile time
- Để đáp ứng được tính năng lifetime độc đáo, quan hệ giữa các biến reference có lifetime quan hệ với biến khác. Đồ thị CPG có làm thêm 3 loại node mới là Lifetime, Lifetime Parameter, Lifetime Argument và 1 cạnh OUT_LIVE
- Cạnh OUT_LIVE cực kỳ quan trọng và là điểm chỉnh sửa đặc tả và chỉnh sửa Joern Backend để hỗ trợ lifetime. Cạnh này biểu diễn một biến reference có lifetime quan hệ với biến khác, nếu biến reference này sống lâu hơn biến khác thì cạnh này sẽ chỉ từ biến reference tới biến khác. Các biến reference này sẽ được gán lifetime thông qua cú pháp 'a, 'b, 'c, ...
- Nếu các biến cùng đánh dấu lifetime 'a thì sẽ có cạnh OUT_LIVE tới 'a đó, nếu biến

reference này sống lâu hơn biến khác thì cạnh này sẽ chỉ từ biến reference tới biến khác. Đồng thời cũng có thể gán lifetime cho các biến reference thông qua cú pháp 'a: 'b, 'b: 'c, ...

- Nói về 3 luật Lifetime Ellision trong Rust, nếu có thể suy luận được lifetime thì không cần phải ghi rõ lifetime, nếu không thể suy luận được thì phải ghi rõ lifetime, nếu có nhiều hơn 1 biến reference thì phải ghi rõ lifetime
- Ownership, borrow checker và lifetime là 3 thứ làm nên ngôn ngữ Rust, do vậy khi làm CPG phải làm sao hỗ trợ được 3 tính năng này, thể hiện 3 tính năng này 1 cách rõ ràng, đặc biệt là lifetime

```
1  fn longest<'a>(x: &'a str, y: &'a str) -> &'a str {
2      if x.len() > y.len() {
3          x
4      } else {
5          y
6      }
7  }
8
9  fn f<'a, 'b, 'c, 'd: 'c>(x: &'a i32, mut y: &'b i32, z: &'c i32)
10 where
11     'a: 'b,
12 {
13     // ...
14 }
15
```

Đoạn mã 3.5: Ví dụ mã nguồn cho lifetime annotation

3.5 Hạn chế

3.5.1 Macro

- Marco (nhớ cite định nghĩa macro là gì) của Rust không được giải ở bước sinh cây AST mà sẽ được giải sau khi sinh cây AST nhưng trước khi đi vào phase Semantic Ananlysis (nhớ cite Semantinc Analysis)
- Rust không giống C/C++. C/C++ có preprossor để giải Marco trước khi cho vào compiler, đo đó khi mã nguồn sau khi được tiền xử lý thì đã được giải toàn bộ Macro
- Mà thư viên *syn* chỉ là thư viện hỗ trợ sinh cây AST, không hỗ trợ giải Macro. Do đó tất cả các mã lệnh nằm bên trong macro sẽ không được giải, dẫn đến việc không thể sinh cây

AST cho macro. Tất cả các đoạn lệnh nằm trong 1 lời gọi macro hiện tại được xem như 1 chuỗi token, không thể phân biệt được các token trong đó.

- Không chỉ vậy macro trong Rust sử dụng DSL riêng, DSL gần với ngôn ngữ Rust nhưng có sử mở rộng biến đổi để phù hợp với vai trò là 1 macro (inline function), do đó không thể sinh cây AST cho macro.
- Có 1 ý tưởng để giải trường hợp này là tự tạo 1 bước toàn xử lý mã nguồn để giải macro như C/C++. Chúng ta sẽ sử dụng đến thư viện $cargo - expand$, thư viện này có tác dụng đưa đoạn code Rust mà lập trình viên nhìn thấy (dạng đã được rút gọn đi) thành đoạn code Rust mà compiler nhìn thấy (trước khi cho vào compiler). Đoạn code sau khi được mở rộng thì sẽ có được các thông tin bị ẩn đi như prelude mặc định của Rust (các hàm, symbol được built-in trong ngôn ngữ mà người dùng không phải import thủ công), các macro sẽ được giải, bao gồm declarative và procedural macro. Đối với declarative macro, thì macro được built-in của ngôn ngữ như *println*!, *vec*! hay kể cả declarative macro do người dùng định nghĩa cũng sẽ được giải.
- Tuy nhiên, việc giải macro trước khi cho vào cây AST sẽ làm cho mã nguồn bị biến đổi (không còn là những gì mà lập trình viên nhìn thấy), tăng kích cỡ và độ lớn của mã nguồn. Việc thêm các thông tin ẩn mà lập trình viên không nhìn thấy có thể gây nhầm lẫn cho người đọc mã nguồn, cũng như làm tăng độ phức tạp của mã nguồn. Điều này cũng đồng nghĩa với việc việc sinh cây AST cho mã nguồn sau khi giải macro sẽ phức tạp hơn, việc này sẽ làm tăng thời gian xử lý mã nguồn, cũng như làm tăng độ phức tạp của mã nguồn.
- Xem thêm The Little Book of Rust Macros
- Representing LLVM-IR in a Code Property Graph

3.5.2 Module

- Giải thích module trong Rust là gì (nhớ cite định nghĩa module trong Rust), gồm keyword mod, pub, use
- Module có thể được định nghĩa trong 1 file, nhưng mỗi 1 file có thể là 1 module. Module muốn sử dụng module khác thì phải sử dụng keyword use. Về cơ bản đây là mối quan hệ phức tạp, nếu chỉ có 1 module thì sử dụng 1 symbol table, nhưng nhiều module, import trait, struct từ module khác rất phức tạp nên hiện tại chưa làm được.
- Hệ thống module trong Rust giúp tổ chức và quản lý mã nguồn một cách hiệu quả. Dưới đây là các thành phần chính và cách hoạt động của hệ thống module và import trong Rust:
  Thành phần của hệ thống module Module (mod): Module là đơn vị tổ chức mã nguồn trong Rust. Một module có thể chứa các hàm, cấu trúc dữ liệu, hằng số, và các module con khác. Module được khai báo bằng từ khóa mod.

  Crate: Crate là đơn vị biên dịch và phân phối mã nguồn trong Rust. Một crate có thể là một thư viện hoặc một ứng dụng. Mỗi crate có thể chứa nhiều module.

  Path: Đường dẫn (path) được sử dụng để truy cập các thành phần trong module. Có hai loại đường dẫn:

Absolute Path: Đường dẫn tuyệt đối bắt đầu từ crate root. Relative Path: Đường dẫn tương đối bắt đầu từ module hiện tại. Visibility: Mặc định, các thành phần trong module là private. Để làm cho chúng public, sử dụng từ khóa pub.

- Xem thêm Managing Growing Projects with Packages, Crates, and Modules

3.5.3 Path

- Path có thể là Absolute Path hoặc Relative Path tùy vào bối cảnh module hiện tại, path có thể chỉ tới đối tượng trong cùng 1 module hoặc khác module
- Path trong Rust là đường dẫn đến 1 đối tượng nào đó được định nghĩa trong mã nguồn như struct, trait, static, const, function
- Cây AST sử dụng thư viện *syn*, *syn* có thể lấy được path của 1 đối tượng nhưng không biết được đối đượng đang trỏ tới là static, const, hay function. Do đó đang không phân biệt được đâu là path của static, const, hay function

3.5.4 Type Argument match Type Parameter

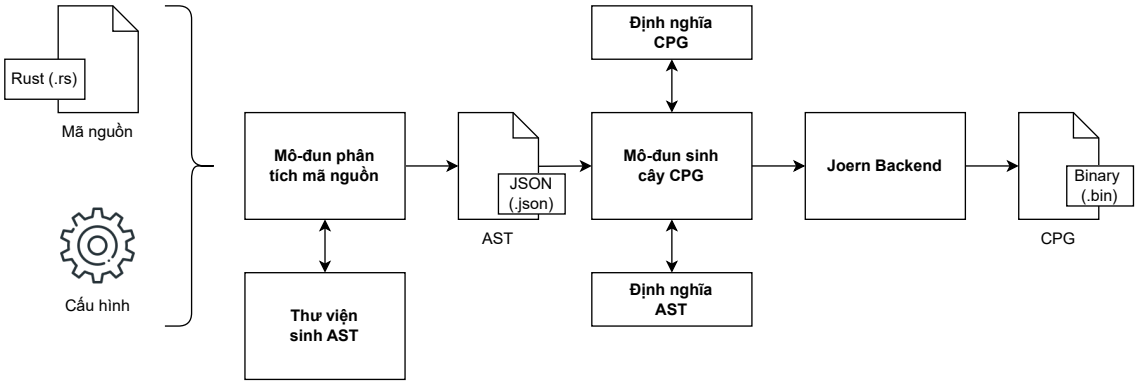
Chương 4

Cài đặt công cụ và thực nghiệm

Chương này sẽ tập trung trình bày về quá trình thực nghiệm và đánh giá phương pháp đánh giá điểm thưởng dựa trên thiết kế đã mô tả chi tiết trong phần trước. Phần thực nghiệm sẽ đi sâu vào việc áp dụng phương pháp để cải thiện hiệu quả công cụ ARAT-RL và so sánh hiệu suất của phương pháp mới với phương pháp đánh giá điểm thưởng mặc định của ARAT-RL. Dựa trên kết quả thu được, tôi sẽ đưa ra các nhận xét và kết luận về giải pháp đề xuất.

4.1 Cài đặt công cụ

Công cụ phân tích mã nguồn Rust được phát triển từ mã nguồn của công cụ Joern. Công cụ được cài đặt bằng ngôn ngữ Rust và Scala. Kiến trúc tổng quan của công cụ được mô tả ở Hình 4.1



Hình 4.1: Kiến trúc công cụ.

Công cụ gồm hai mô-đun là *Rust Parser* và *Joern* trong đó *Joern* là mô-đun chính. Mô-đun Rust Parser được cài đặt bằng ngôn ngữ Rust. Mô-đun này sẽ nhận đầu vào là đường dẫn đến thư mục dự án chứa mã nguồn Rust và thực hiện việc phân tích mã nguồn thành cây cú pháp mã nguồn, xử lý kiểu dữ liệu và lưu cây cú pháp mã nguồn vào các tệp JSON. *Joern* được cài đặt bằng ngôn ngữ Scala và được phát triển từ mã nguồn của công cụ *Joern*. Mô-đun thực hiện nhận mã nguồn đầu vào, gọi mô-đun *Rust Parser* để dựng cây cú pháp mã nguồn và sau đó xây dựng đồ thị thuộc tính mã nguồn từ các thông tin trong cây cú pháp mã nguồn. Đầu ra của mô-đun này cũng là đồ thị thuộc tính mã nguồn được lưu dưới dạng tệp nhị phân (.bin). Đây cũng là đầu ra của cả công cụ. Chúng ta có thể dùng một số công cụ được *Joern* cung cấp sẵn để thao tác với đồ thị này như xuất đồ thị dưới nhiều định dạng khác nhau như neo4jcsv, graphml,

graphson, dot bằng công cụ *Joern Export*, thực hiện các câu lệnh truy vấn trên đồ thị hoặc quét đồ thị để tìm lỗ hổng trong mã nguồn bằng công cụ *Joern Scan*.

4.1.1 Mô-đun xây dựng cây cú pháp trừu tượng Rust Parser

Chức năng chính của *Rust Parser* là nhận thông tin đường dẫn đến mã nguồn, lọc các tệp mã nguồn Rust, sinh cây cú pháp trừu tượng, xử lý kiểu dữ liệu cho các nút định danh (identifier) và lưu kết quả vào các tệp JSON. Các thành phần trong mô-đun này bao gồm cli, parser, resolver, ast và util. Chức năng chi tiết của từng thành phần được mô tả như sau:

- Thành phần cli làm nhiệm vụ xử lý và cung cấp giao diện dòng lệnh (CLI), nhận đầu vào là đường dẫn đến dự án Rust, nhận các cấu hình (ví dụ như đường dẫn lưu các tệp đầu ra hoặc danh sách các tệp mã nguồn cần bỏ qua) và gọi các chức năng phân tích.
- Thành phần parser thực hiện nhận thông tin từ thành phần cli, từ đó đọc các tệp mã nguồn của Rust có đuôi là ".rs" từ dự án đầu vào, phân tích các tệp tin này và sinh cây cú pháp trừu tượng.
- Thành phần resolver cung cấp các API phục vụ việc xử lý kiểu dữ liệu.
- Thành phần ast chứa các cấu trúc định nghĩa các loại nút và thuộc tính của từng loại nút của cây cú pháp trừu tượng.
- Thành phần util cung cấp các tiện ích chung bao gồm xử lý tệp tin và xử lý nhật ký (log).

Hình 4.2 biểu diễn các thành phần của mô-đun *Rust Parser*, các mũi tên biểu mối quan hệ sử dụng giữa các thành phần này.

4.1.2 Mô-đun xây dựng đồ thị thuộc tính mã nguồn Joern

Mô-đun *Joern* thực hiện nhiệm vụ xây dựng đồ thị thuộc tính mã nguồn (CPG) từ cây cú pháp trừu tượng AST. Mô-đun sẽ thực hiện đọc thông tin từ các tệp JSON được tạo ra từ mô-đun *Rust Parser* và xây dựng đồ thị thuộc tính mã nguồn (CPG). Mô-đun này được phát triển từ mô-đun *Joern* của công cụ *Joern* nên sử dụng lại một số thành phần có sẵn của *Joern* bao gồm các thành phần console, semanticcpg, codepropertygraph và x2cpg. Dưới đây tôi sẽ mô tả chức năng của từng thành phần:

- Thành phần console thực hiện chức năng tương tự như thành phần cli của mô-đun *Rust Parser*.
- Thành phần rust-language-frontend đảm nhận nhiệm vụ nhận đường dẫn đến mã nguồn từ thành phần console, gọi mô-đun *Rust Parser* để sinh cây cú pháp trừu tượng sau đó đọc các tệp JSON được sinh ra và xây dựng thành đồ thị thuộc tính mã nguồn.
- Thành phần codepropertygraph chứa các lớp định nghĩa các đỉnh và cạnh của đồ thị thuộc tính mã nguồn.
- Thành phần x2cpg cung cấp các tiện ích để ánh xạ các thuộc tính từ các nút của cây cú pháp trừu tượng sang thuộc tính của các đỉnh trong đồ thị thuộc tính mã nguồn.

- Thành phần semanticcpg chứa các tiện ích cho phép vấn đồ thị thuộc tính mã nguồn. Thành phần này được sử để thực hiện các tác vụ hậu xử lý sau khi đồ thị thuộc tính mã nguồn được xây dựng (ví dụ như bổ sung thông tin hoặc tạo các đỉnh liên kết).

Hình 4.3 biểu diễn các thành phần của mô-đun *Rust Parser*, các mũi tên biểu mối quan hệ sử dụng giữa các thành phần này.

4.2 Tính áp dụng vào thực tế của đồ thị CPG dành cho Rust

4.2.1 RUSTSEC-2021-0086

- Lỗi access uninitialized memory

```
1 const N: usize = 255;
2
3 // Before fix
4 let mut buf: Vec<u8> = Vec::with_capacity(N);
5 unsafe { buf.set_len(N) };
6
7 // After fix
8 let mut buf: Vec<u8> = vec![0; N];
```

Đoạn mã 4.1: Ví dụ mã nguồn cho RUSTSEC-2021-0086

4.2.2 RUSTSEC-2022-0028

- Thể hiện được tính năng bổ sung, rule, pattern của lỗi thể hiển lên CPG
- Từ pattern có thể nói rằng có thể sử dụng các luật và học máy để duyệt trên đồ thị CPG, từ đó tìm ra được lỗi
- Lỗi không đánh lifetime tường minh cho kiểu T, dẫn đến compiler không thể phát hiện ra lỗi khi compile

```rust
// Before fix
pub fn external<'a, C, T>(cx: &mut C, data: T) -> Handle<'a, Self>
where
    C: Context<'a>,
    T: AsMut<[u8]> + Send,
{
    // ...
}

// After fix
pub fn external<'a, C, T>(cx: &mut C, data: T) -> Handle<'a, Self>
where
    C: Context<'a>,
    T: AsMut<[u8]> + Send + 'static,
{
    // ...
}
```

Đoạn mã 4.2: Ví dụ mã nguồn cho RUSTSEC-2022-0028

4.2.3 RUSTSEC-2020-0044

- Giải thích Send và Sync trong Rust
- Lỗi là do kiểu Atom không đánh Send và Sync cho kiểu P, dẫn đến lỗi khi sử dụng Atom trong multi-thread
- Sửa lỗi bằng cách đánh Send và Sync cho kiểu P
- Kiểu cha (Wrapper) mà muốn Send được thì kiểu con (P) cũng phải Send được (tương tự với Sync)
- Từ đây ta có thể thấy được pattern về lỗi không đánh Send và Sync cho kiểu P rất phổ biến, có thể dùng luật (pattern) traverse trên đồ thị để phát hiện ra lỗi

```rust
// Before fix
unsafe impl<P> Send for Atom<P> where P: IntoRawPtr + FromRawPtr {}
unsafe impl<P> Sync for Atom<P> where P: IntoRawPtr + FromRawPtr {}

// After fix
unsafe impl<P> Send for Atom<P> where P: IntoRawPtr + FromRawPtr + Send {}
unsafe impl<P> Sync for Atom<P> where P: IntoRawPtr + FromRawPtr + Send {}
```

Đoạn mã 4.3: Ví dụ mã nguồn cho RUSTSEC-2020-0044

4.2.4 RUSTSEC-2021-0130

- Nói về 3 luật lifetime ellision
- Lỗi là do self và kiểu Iter không cùng lifetime với nhau. Iter có thể access tới self khi self đã bị drop, dẫn đến lỗi
- Sửa lỗi bằng cách sử dụng thống nhất 1 lifetime chung cho self và Iter, sử dụng thông qua bằng quy tắc 3 của lifetime ellision, lifetime của Iter sẽ được auto infer từ lifetime của self
- Từ đây ta có thể thấy được pattern về lỗi lifetime không đồng bộ giữa self và kiểu trả về là rất nhiều, có thể dùng luật (pattern) traverse trên đồ thị để phát hiện ra lỗi

```
1  // Before fix
2  pub fn iter<'a>(&'_ self) -> Iter<'a, K, V> {
3      Iter {
4          ptr: unsafe { (*self.head).next },
5      }
6  }
7
8  // After fix
9  pub fn iter(&self) -> Iter<'_, K, V> {
10     Iter {
11         ptr: unsafe { (*self.head).next },
12     }
13 }
```

Đoạn mã 4.4: Ví dụ mã nguồn cho RUSTSEC-2021-0130

Kết luận

Phân tích mã nguồn là một bước quan trọng trong quy trình phát triển phần mềm, giúp phát hiện lỗi, lỗ hổng bảo mật và các vấn đề tiềm ẩn khác trong mã nguồn. Quá trình này cũng hỗ trợ lập trình viên phát hiện lỗi logic, tối ưu mã nguồn và tuân thủ các quy tắc và tiêu chuẩn lập trình, từ đó đảm bảo tính ổn định, khả năng quản lý và bảo trì mã nguồn về lâu dài.

Hiện có khoảng 20 ngôn ngữ lập trình thông dụng trên thế giới, kèm theo đó là hàng trăm công cụ phân tích mã nguồn khác nhau. Khóa luận này đã phát triển thành công một công cụ phân tích mã nguồn cho ngôn ngữ lập trình Rust. Công cụ này phân tích mã nguồn thành đồ thị thuộc tính mã nguồn thay vì chỉ phân tích thành cây cú pháp trừu tượng, vì đồ thị này tổng hợp thông tin từ cây cú pháp trừu tượng, đồ thị luồng điều khiển và đồ thị thuộc tính mã nguồn. Điều này không chỉ cung cấp thông tin về cú pháp mà còn về luồng điều khiển và phụ thuộc dữ liệu trong chương trình.

Công cụ được phát triển dựa trên Joern, kế thừa các tiện ích mạnh mẽ giúp khai thác mã nguồn dựa trên đồ thị thuộc tính mã nguồn trở nên dễ dàng và chuyên sâu hơn. Qua thử nghiệm với các dự án mã nguồn Rust phổ biến, công cụ đã đạt được các mục tiêu đề ra, xử lý thông tin về kiểu dữ liệu, phân tích hầu hết các cú pháp Rust và đưa ra kết quả chi tiết hơn so với Joern. Tuy nhiên, công cụ vẫn chưa xử lý được tất cả các cú pháp của Rust và còn tốn nhiều thời gian phân tích, đặc biệt với các dự án sử dụng nhiều thư viện ngoài.

Trong tương lai, công cụ sẽ được hoàn thiện hơn để xử lý toàn bộ cú pháp Rust. Việc xử lý kiểu dữ liệu sẽ được tối ưu bằng chiến thuật khác, không cần phân tích tất cả các thư viện đi kèm dự án, giúp rút ngắn thời gian phân tích. Công cụ cũng sẽ hỗ trợ các hệ điều hành phổ biến như Windows và MacOS, thay vì chỉ Ubuntu. Với độ chi tiết của đồ thị đầu ra và các tiện ích truy vấn mạnh mẽ, công cụ sẽ là nền tảng mạnh mẽ để phát triển các công cụ phân tích mã nguồn khác, như tìm kiếm lỗ hổng, gợi ý mã nguồn và phát hiện lỗi cú pháp. Đầu ra của công cụ cũng có thể được sử dụng cho các bài toán học máy hoặc học sâu.

Tài liệu tham khảo

[1] Fraunhofer AISEC. Home - Code Property Graph — fraunhofer-aisec.github.io. `https://fraunhofer-aisec.github.io/cpg/`. [Accessed 19-11-2024].

[2] Christian Banse, Immanuel Kunz, Angelika Schneider, and Konrad Weiss. Cloud property graph: Connecting cloud security assessments with static code analysis. In *2021 IEEE 14th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*, pages 13–19. IEEE, 2021.

[3] cppreference. RAII - cppreference.com — en.cppreference.com. `https://en.cppreference.com/w/cpp/language/raii`. [Accessed 18-11-2024].

[4] Jeanne Ferrante, Karl J Ottenstein, and Joe D Warren. The program dependence graph and its use in optimization. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS)*, 9(3):319–349, 1987.

[5] googleblog. Memory Safe Languages in Android 13 — security.googleblog.com. `https://security.googleblog.com/2022/12/memory-safe-languages-in-android-13.html`. [Accessed 18-11-2024].

[6] Jiaxuan Han, Cheng Huang, Siqi Sun, Zhonglin Liu, and Jiayong Liu. bjxnet: an improved bug localization model based on code property graph and attention mechanism. *Automated Software Engineering*, 30(1):12, 2023.

[7] Susan Horwitz and Thomas Reps. The use of program dependence graphs in software engineering. In *Proceedings of the 14th international conference on Software engineering*, pages 392–411, 1992.

[8] O JE and T CT. Why scientists are turning to rust. *Nature*, 588:185, 2020.

[9] joern. Joern - The Bug Hunter's Workbench — joern.io. `https://joern.io/`. [Accessed 19-11-2024].

[10] Ralf Jung, Jacques-Henri Jourdan, Robbert Krebbers, and Derek Dreyer. Safe systems programming in rust. *Communications of the ACM*, 64(4):144–152, 2021.

[11] Wim Keirsgieter and Willem Visser. Graft: Static analysis of java bytecode with graph databases. In *Conference of the South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists 2020*, pages 217–226, 2020.

[12] Alexander Küchler and Christian Banse. Representing llvm-ir in a code property graph. In *International Conference on Information Security*, pages 360–380. Springer, 2022.

[13] plume oss/plume. GitHub - plume-oss/plume: Plume is a code representation benchmarking library with options to extract the AST from Java bytecode and store the result in various graph databases. — github.com. `https://github.com/plume-oss/plume`. [Accessed 19-11-2024].

[14] ProceduralMacros. Procedural Macros - The Rust Reference — doc.rust-lang.org. `https://doc.rust-lang.org/reference/procedural-macros.html`. [Accessed 19-11-2024].

[15] rustlang. The Rust Programming Language - The Rust Programming Language — doc.rust-lang.org. `https://doc.rust-lang.org/stable/book/`. [Accessed 18-11-2024].

[16] rustReference. Introduction - The Rust Reference — doc.rust-lang.org. `https://doc.rust-lang.org/reference/`. [Accessed 19-11-2024].

[17] Lukas Seidel and Julian Beier. Bringing rust to safety-critical systems in space. *arXiv preprint arXiv:2405.18135*, 2024.

[18] Ayushi Sharma, Shashank Sharma, Santiago Torres-Arias, and Aravind Machiry. Rust for embedded systems: Current state, challenges and open problems. *arXiv preprint arXiv:2311.05063*, 2023.

[19] stackoverflow. Stack Overflow Developer Survey 2023 — survey.stackoverflow.co. `https://survey.stackoverflow.co/2023/`. [Accessed 18-11-2024].

[20] syn. syn - Rust — docs.rs. `https://docs.rs/syn/latest/syn/index.html`. [Accessed 19-11-2024].

[21] Konrad Weiss and Christian Banse. A language-independent analysis platform for source code. *arXiv preprint arXiv:2203.08424*, 2022.

[22] wimkeir/graft. GitHub - wimkeir/graft: A static analysis tool for Java programs, based on the theory of code property graphs. — github.com. `https://github.com/wimkeir/graft`. [Accessed 19-11-2024].

[23] Wang Xiaomeng, Zhang Tao, Wu Runpu, Xin Wei, and Hou Changyu. Cpgva: code property graph based vulnerability analysis by deep learning. In *2018 10th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT)*, pages 184–188. IEEE, 2018.

[24] Fabian Yamaguchi, Nico Golde, Daniel Arp, and Konrad Rieck. Modeling and discovering vulnerabilities with code property graphs. In *2014 IEEE symposium on security and privacy*, pages 590–604. IEEE, 2014.

[25] Jiaqi Yan, Guanhua Yan, and Dong Jin. Classifying malware represented as control flow graphs using deep graph convolutional neural network. In *2019 49th annual IEEE/IFIP international conference on dependable systems and networks (DSN)*, pages 52–63. IEEE, 2019.

[26] Jian Zhang, Xu Wang, Hongyu Zhang, Hailong Sun, Kaixuan Wang, and Xudong Liu. A novel neural source code representation based on abstract syntax tree. In *2019 IEEE/ACM 41st International Conference on Software Engineering (ICSE)*, pages 783–794. IEEE, 2019.