

面向 rCore-Tutorial 操作系统的调试工具

毕业设计答辩

陈志扬

指导教师：吴竞邦

北京工商大学计算机科学与技术系

2023 年 5 月 24 日



- ① 项目简介
- ② 功能简介
- ③ 关键技术描述
- ④ 总结

① 项目简介

② 功能简介

③ 关键技术描述

④ 总结

项目背景与目标

项目背景

- rust 操作系统相关实验上手难度较高，环境配置繁琐
- GDB TUI 不方便，VSCode 有调试器插件，但是只能调试用户态程序

工作内容

- 在已有的调试器基础上，增加操作系统调试功能，如同时设内核态用户态断点，获取当前特权级，自动更换符号表文件
- 修改 QEMU 虚拟机，从而支持基于串口的调试
- 结合 eBPF 技术，同时用静态分析和动态分析技术进行函数跟踪和信息获取（寄存器，内存，函数调用参数）

项目背景与目标

主要技术难点

- 同时跟踪操作系统的内核态和用户态；
- 支持多个基于中断的 Qemu 虚拟串口传输
- 用两种跟踪技术（Qemu 的 gdbserver 和 eBPF Server），两个数据来源同时跟踪同一个操作系统
- 协调同步消息和异步消息
- 适配 RISC-V 处理器（PMP 机制，函数调用规范）

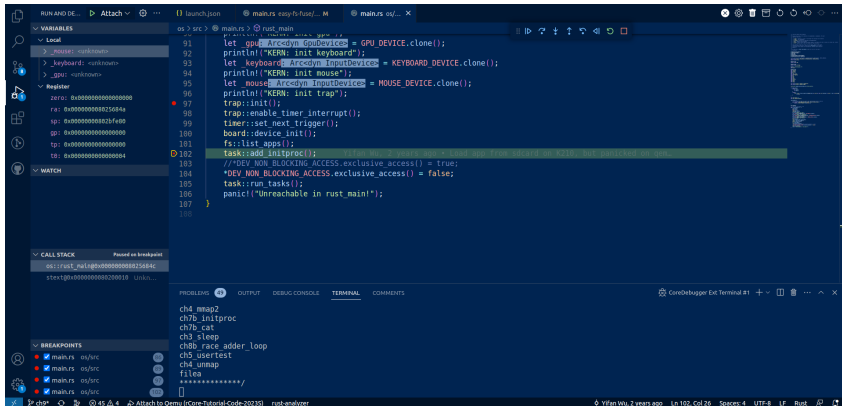
① 项目简介

② 功能简介

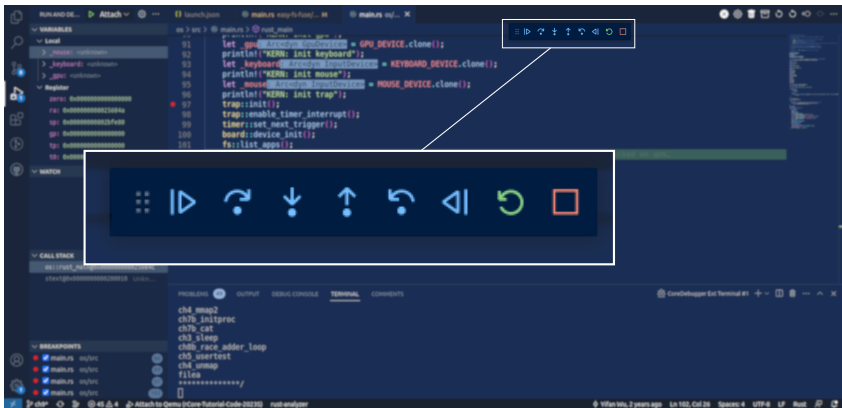
③ 关键技术描述

④ 总结

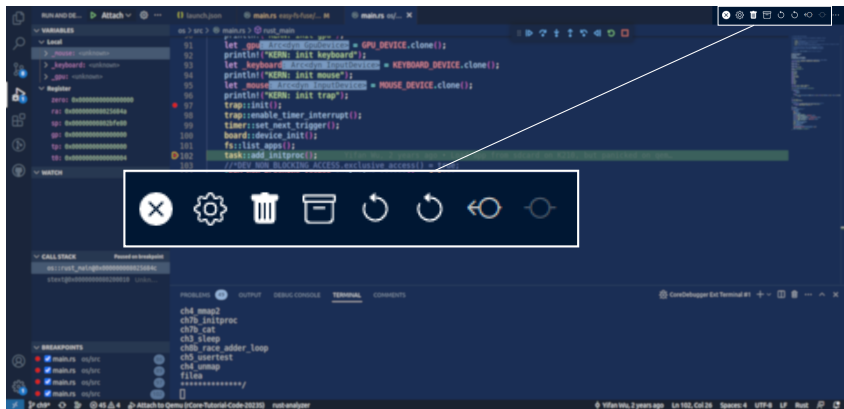
用户界面



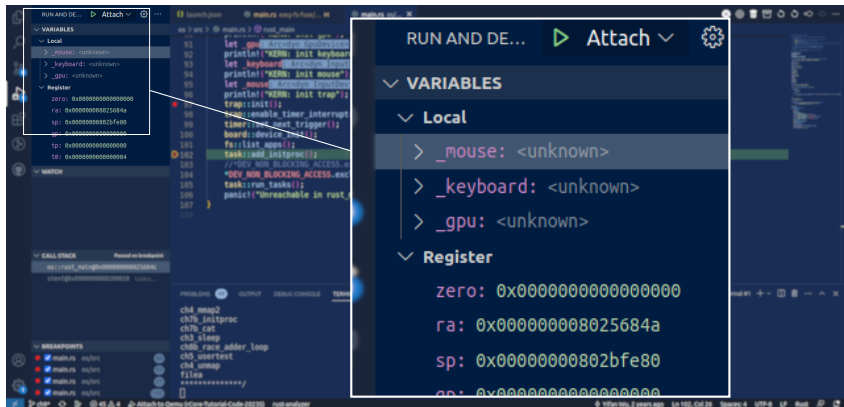
用户界面



用户界面



用户界面



① 项目简介

② 功能简介

③ 关键技术描述

自动编译、加载内核并启动调试
解决内核态用户态的断点冲突
基于 eBPF 技术的跟踪调试

④ 总结

1 项目简介

2 功能简介

3 关键技术描述

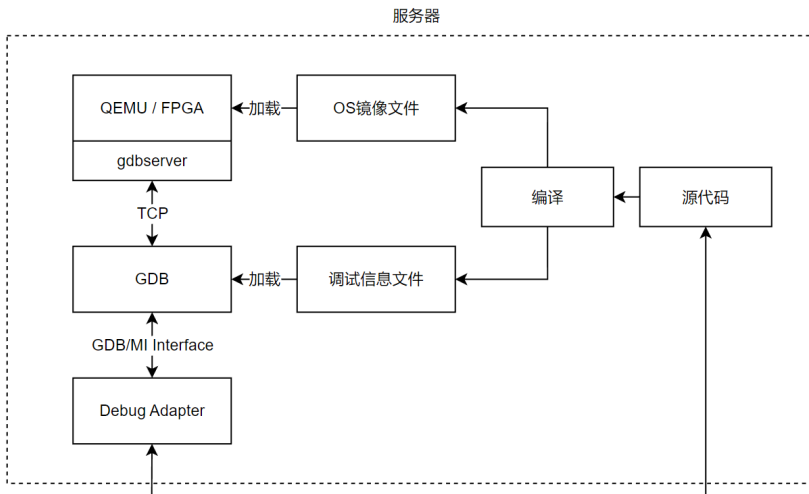
自动编译、加载内核并启动调试

解决内核态用户态的断点冲突

基于 eBPF 技术的跟踪调试

4 总结

自动编译、加载内核并启动调试



遇到的问题

GDB 无法设置断点

- 解决办法：修改编译参数
- 在 release 编译模式下保留所有调试信息并关闭编译器的优化

没有操作系统相关的调试功能

- 通过修改 Debug Adapter 来实现内核态用户态切换跟踪，特权级检测等功能

修改编译参数

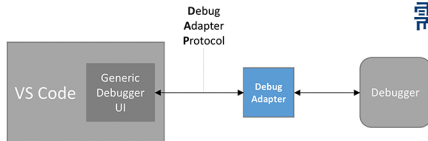
修改编译参数和链接脚本

- 'debug=true' 保留调试信息
- 'opt-level=0' 最低优化等级
- 'linker.ld' 保留 *.debug 段

修改后带来的问题

- 应用程序占用的磁盘空间显著增加，导致 easy-fs-fuse（用于将应用程序打包为文件系统镜像）崩溃
 - 因此，需要将磁盘镜像的空间调大
- 用户栈溢出
 - 调整 'USER_STACK_SIZE' 等参数

改进 Debug Adapter



需要完善并实现的协议

- Debug Adapter Protocol
- GDB Machine Interface
- Remote Serial Protocol

1 项目简介

2 功能简介

3 关键技术描述

自动编译、加载内核并启动调试
解决内核态用户态的断点冲突
基于 eBPF 技术的跟踪调试

4 总结

解决内核态用户态的断点冲突

存在的问题

由于 GDB 限制，无法在内核态设置用户态代码的断点

原因

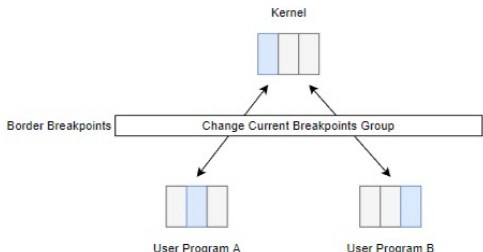
特权级切换时，TLB 刷新

解决方法

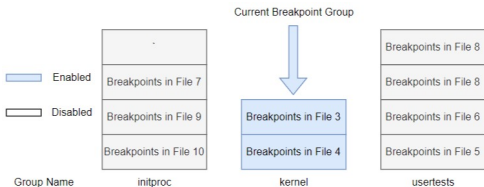
暂存，待时机合适再设置

关键问题

暂存断点的策略，恢复断点的时机



断点组暂存机制



- ① 分组缓存所有断点的信息
- ② 若用户设置的断点不属于当前断点组，不令 GDB 设置
- ③ 在特权级切换时切换符号表文件、进行断点组切换
- ④ 这种策略还可以应用于多处理机、多线程、多协程…

如何判断特权级是否已经切换？

RISC-V 处理器的特殊性

- RISC-V 处理器无寄存器能反映当前特权级，需要用一些变通的办法

“边界断点” 机制

- 在特权级切换的代码附近设置断点，若断点触发则特权级将切换
- 这些“边界断点”可以由 Debug Adapter 自动设置，无需用户手动设置
- 同时借助内存地址空间、文件名辅助判断

① 项目简介

② 功能简介

③ 关键技术描述

自动编译、加载内核并启动调试
解决内核态用户态的断点冲突
基于 eBPF 技术的跟踪调试

④ 总结

利用 eBPF 进行跟踪

GDB 的限制

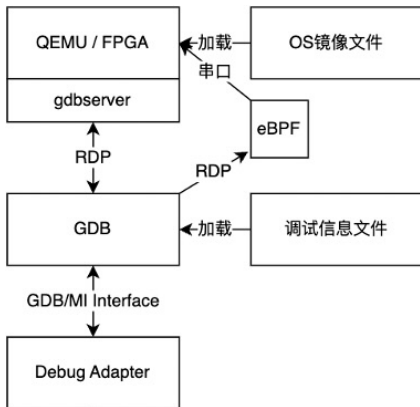
- 为了用上调试器，得改编译参数，改内核代码... 比较繁琐.
- GDB 无法跟踪 rCore 的一些重要的内核数据结构，对 rust 语言的支持也不是特别好.

用 eBPF 技术与 gdbserver 同时进行跟踪

- eBPF 技术使得用户可以在内核执行用户自定义的程序，和 Qemu 的 gdbserver 形成很好的互补
- eBPF 程序的可移植性比较好.
- 我们基于 eBPF 实现的功能：函数调用参数获取、内存查看、寄存器查看

实现 eBPF server

- 1 移植 eBPF 模块
- 2 修改 Qemu 虚拟机代码，支持基于中断的多串口通信
- 3 同步数据包即使被异步数据包打断也能正常传输
- 4 实现 RSP 协议
- 5 在 Debug Adapter 和在线 IDE 中适配 eBPF Server



- ① 项目简介
- ② 功能简介
- ③ 关键技术描述
- ④ 总结**

总结

已完成工作

- 在已有调试器插件的基础上实现基于 Qemu 的 rust 内核在线调试工具
- 支持基于 GDB 的单步断点、内存查看、寄存器查看功能
- 支持基于 eBPF 的断点、内存查看、寄存器查看功能
- 函数调用动态跟踪
- 内核态与用户态方便的切换跟踪

代码量（用 git 统计）

- 添加：15,169 行
- 删除：2,687 行

发表论文与研究成果

- 1 An Online Debugging Tool for Rust-based Operating Systems. Rust-Edu Workshop, 2022.
- 2 支持 Rust 语言的源代码级内核调试工具. 开源操作系统年度技术会议, 2022.
- 3 全国三等奖. 全国大学生计算机系统能力大赛操作系统设计赛功能设计赛道, 2022.
- 4 全国三等奖. 全国大学生计算机系统能力大赛操作系统设计赛内核设计赛道, 2021.
- 5 优秀营员. 开源操作系统夏令营, 2022.
- 6 北京赛区二等奖. 第十二届蓝桥杯, 2021.
- 7 北京赛区一等奖. 第十三届蓝桥杯, 2022.

Thanks!