

اجرای زبانهای برنامه نویسی در سیستم های اینترنت اشیا و نهفته

ساحل سجادی، فاطمه شمس زهرائی، زهره امینی

گروه مهندسی کامپیوتر دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات

چکیده

با رشد سریع اینترنت اشیا و افزایش پیچیدگی ریزکنترلرها، نیاز به روشهایی برای بهبود توسعه پذیری و قابلیت حمل نرم افزارهای نهفته افزایش یافته است. در این پژوهش، مدل های مختلف اجرای کد در ریزکنترلرها بررسی شده و یک زبان قابل حمل به همراه ماشین مجازی Mico8-Chip معرفی می شود که هدف آن کاهش وابستگی به سخت افزار و ساده سازی فرآیند توسعه است. نتایج اولیه نشان می دهد این رویکرد با تولید بایت کدی کم حجم، تعادل مناسبی میان انتزاع سطح بالا و محدودیت های منابع برقرار کرده و می تواند هزینه توسعه و پیچیدگی استقرار در سامانه های اینترنت اشیا را کاهش دهد.

مقدمه

با شتاب گرفتن تحولات دیجیتال، اینترنت اشیا با اتصال تجهیزات فیزیکی به سامانه های محاسباتی، امکان تبادل داده، کنترل هوشمند و خودکارسازی فرآیندها را فراهم کرده است. با گسترش این سامانه ها، اجرای ایمن و کارآمد کد در دستگاه های کم منابع به یکی از چالش های اصلی تبدیل شده است. در این زمینه، وب اسمبلی به دلیل باینری فشرده، سرعت اجرای بالا و مدل امنیتی مبتنی بر سندباکس، به عنوان گزینه ای مناسب برای اینترنت اشیا مطرح شده است. با توجه به محدودیت های شدید حافظه، پردازنده و انرژی در ریزکنترلرها، استفاده از ماشین های مجازی سبک و اجرای مبتنی بر بایت کد برای زبان هایی مانند جاوا، اسکیم و وب اسمبلی مورد توجه قرار گرفته است. هرچند وسم با تکیه بر LLVM و WASI اجرای چندزبانه را ممکن می سازد، اما محدودیت های آن در سامانه های نهفته نشان دهنده نیاز به مدل های اجرایی بهینه تر است. از آنجا که مطالعات موجود عمدتاً توصیفی هستند، بررسی و مقایسه ی تحلیلی رویکردهای مختلف اجرای کد در اینترنت اشیا به عنوان یک خلأ پژوهشی مطرح بوده و این مقاله در پی پاسخ به آن است.

چارچوب پیشنهادی

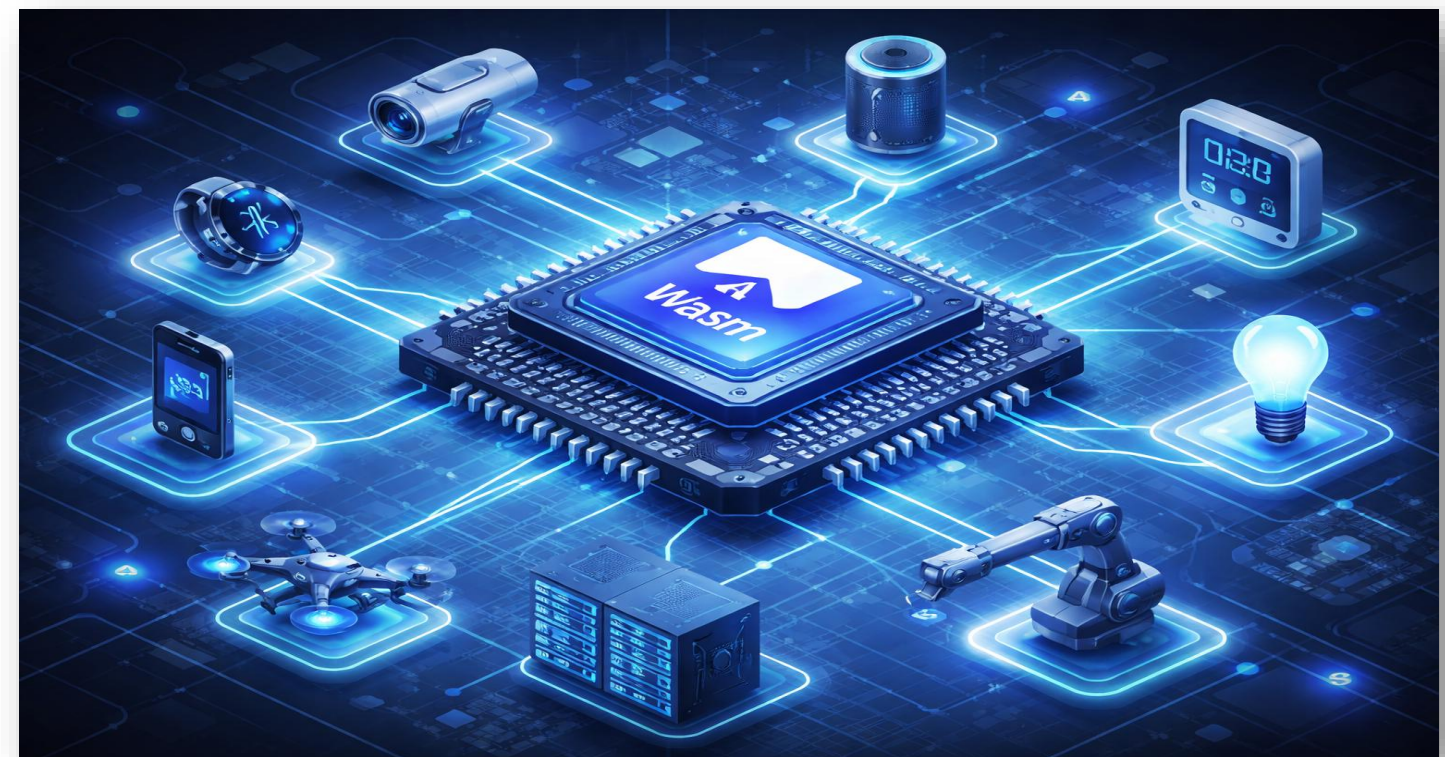
این مقاله یک چارچوب مقایسه ای برای ارزیابی مدل های اجرای نرم افزار در اینترنت اشیا ارائه می دهد که در آن رویکردهای مختلف اجرای نیتیو، وب اسمبلی، زبان های مفسری، eBPF و ماشین های مجازی اختصاصی بر اساس معیارهایی مانند کارایی، تأخیر، مصرف حافظه، قابلیت بلادرنگ، امنیت و قابلیت حمل به صورت تجربی تحلیل و مقایسه می شوند. هدف این چارچوب، ارائه ی تصویری یکپارچه از مزایا و هزینه های هر مدل و هدایت انتخاب مدل اجرایی متناسب با محدودیت های سخت افزاری و الزامات زمانی و امنیتی سامانه های نهفته است.

شبیه سازی و نتایج

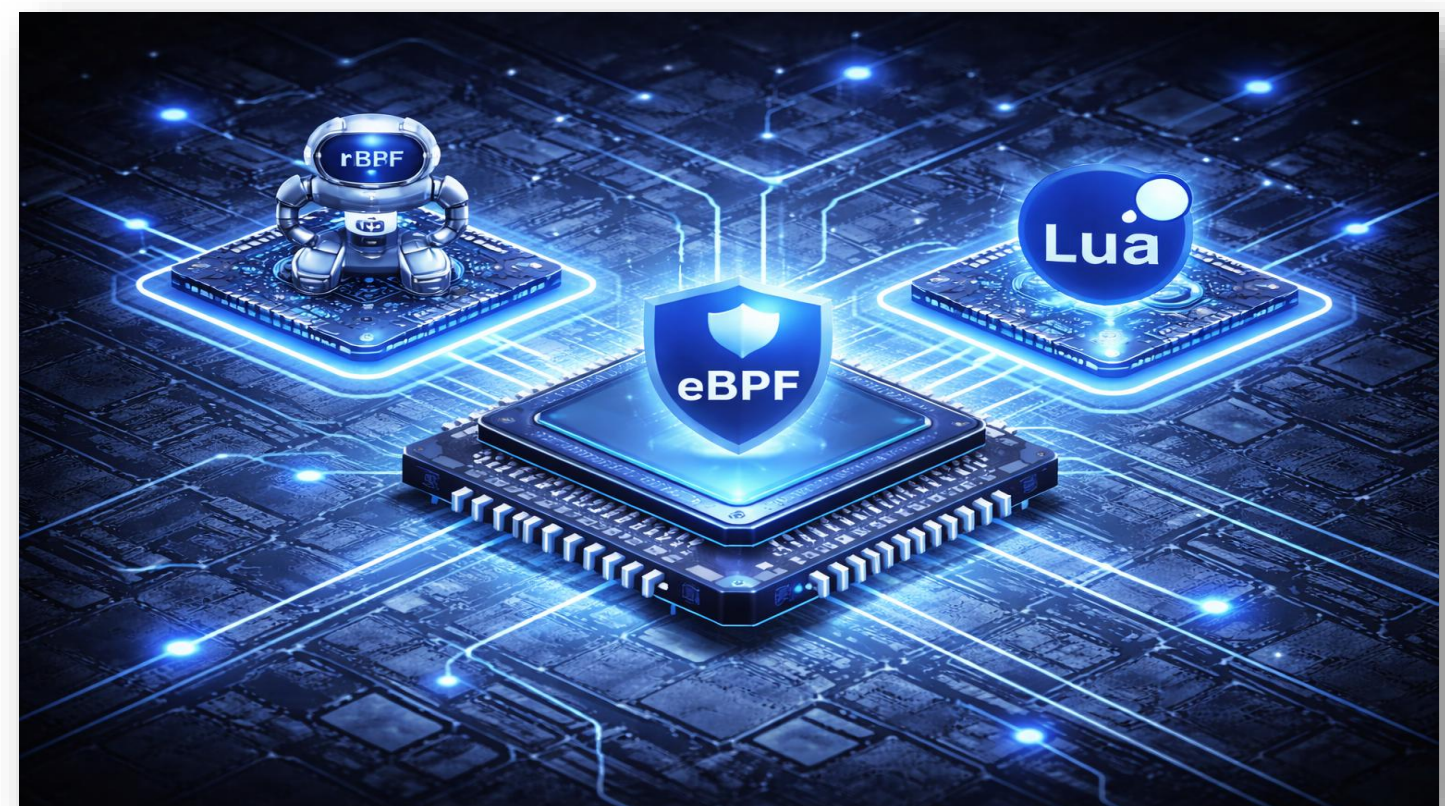
برای ارزیابی مدل پیشنهادی، ماشین های مجازی رایج شامل وب اسمبلی، Lua/ میکروپایتون و eBPF از نظر فوت پرینت حافظه و سرعت اجرا مقایسه شدند. نتایج نشان می دهد وب اسمبلی با وجود قابلیت انتقال و امنیت بالا، به حافظه بیشتری نیاز داشته و در حالت تفسیری با افت کارایی مواجه است، در حالی که Lua و میکروپایتون توسعه سریع اما تأخیر و مصرف انرژی بالاتری دارند. در مقابل، eBPF با فوت پرینت بسیار کوچک برای سامانه های کم منبع مناسب است. همچنین، راه حل پیشنهادی با فوت پرینت کمتر و تأخیر پایین تر، گزینه ای کارآمد برای اجرای روی MCU های محدود محسوب می شود، هرچند فاقد برخی قابلیت های پیشرفته است.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می دهد که هیچ مدل اجرایی واحدی قادر به برآورده سازی همزمان تمامی الزامات کارایی، امنیت، قابلیت انتقال و مصرف انرژی در سامانه های اینترنت اشیا نیست. از این رو، انتخاب معماری اجرایی باید به صورت مسئله محور و متناسب با محدودیت های منابع، الزامات بلادرنگ و سطح امنیت مورد نیاز هر پروژه انجام شود، نه بر اساس یک راه حل عمومی و یکسان برای تمامی کاربردها.



شکل ۱. میکروکنترلر مرکزی در اکوسیستم IoT با اجرای WebAssembly



شکل ۲. ماشین های مجازی سبک روی MCU در اکوسیستم IoT

منابع

- [1] نوذری، حامد،، ابراهیم صادقی، محمد،، فلاح، محمد،، "اولویت بندی حوزه های کاربرد فناوری اینترنت اشیا در ایران: فرصتی برای هم پایی اقتصادی"، 1400.
- [2] Ray, P.P.; "An Overview of WebAssembly for IoT: Background, Tools, State-of-the-Art, Challenges, and Future Directions", Future Internet, 15-275, 2023.
- [3] Wallentowitz, M., Kersting, B., Mihai Dumitriu, D., "Potential of WebAssembly for Embedded Systems", 10th MEDITERRANEAN CONFERENCE ON EMBEDDED COMPUTING, (MECO), BUDVA, MONTENEGRO, 7-10 JUNE 2021.
- [4] Zandberg, K., Baccelli, E., "Minimal Virtual Machines on IoT Microcontrollers: The Case of Berkeley Packet Filters with rBPF", international conference on acoustics speech and signal, 2020.
- [5] Dashdamirli, N., "Cross-platform development for microcontrollers: design of a virtual machine based portable programming language", Transport Systems and Technologies, 45, 2025.
- [6] Marevac, E., Kadišić, E., Živić, N., Buzadija, N., Lemeš, S., "Framework Design for the Dynamic Reconfiguration of IoT-Enabled Embedded Systems and On-the-Fly Code Execution", Future Internet, 17-23, 2025.
- [7] Kim, J., Kim, R., Oh, J., Eun Lee, S., "Hardware-Based WebAssembly Accelerator for Embedded System", Electronics, 13-3979, 2024.
- [8] Harnes, H., Morrison, D., "SoK: Analysis Techniques for WebAssembly", Future Internet, 16(3)-84, 2024.
- [9] Mochizuki, F., Yamazaki, T., Chiba, S., "BlueScript: A Disaggregated Virtual Machine for Microcontrollers", The Art, Science, and Engineering of Programming, Vol. 10, Issue 3, Article 21, 2025.