

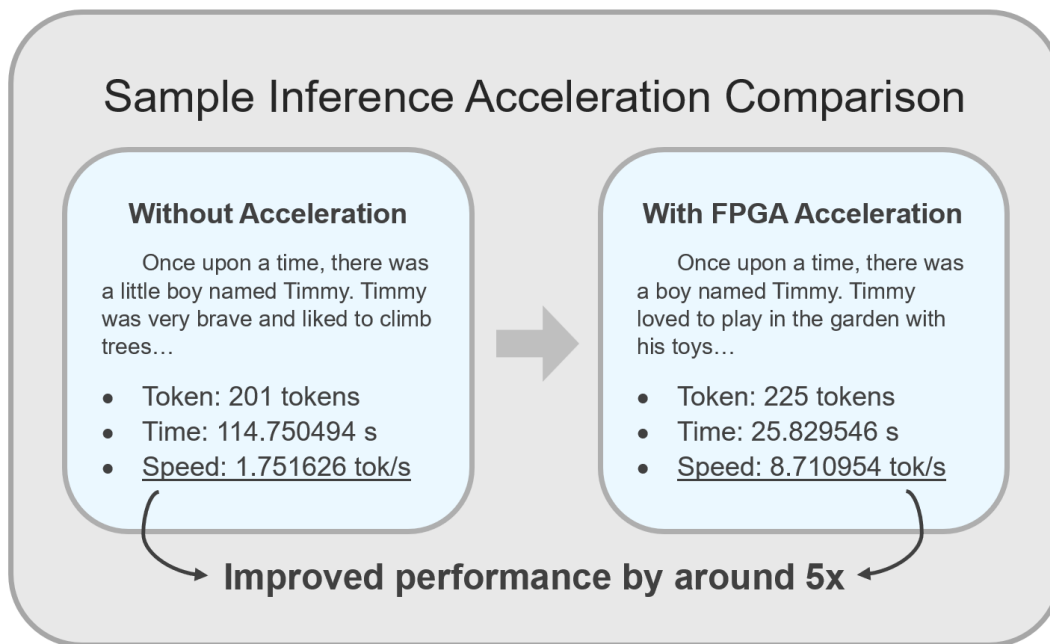
國立陽明交通大學 資訊工程學系
資訊工程專題（二）成果報告摘要

題目：利用高階合成加速 LLaMA2 模型在 FPGA 上的推論設計
(High-Level Synthesis Based Acceleration of LLaMA2 Inference on FPGA)

學生：趙堉安

組員：金以凡

指導教授：陳添福 教授



GitHub: [High-Level-Synthesis-Based-Acceleration-of-LLaMA2-Inference-on-FPGA](#)

Demo: [High-Level Synthesis Based Acceleration of LLaMA2 Inference on FPGA](#)

中華民國 114 年 07 月

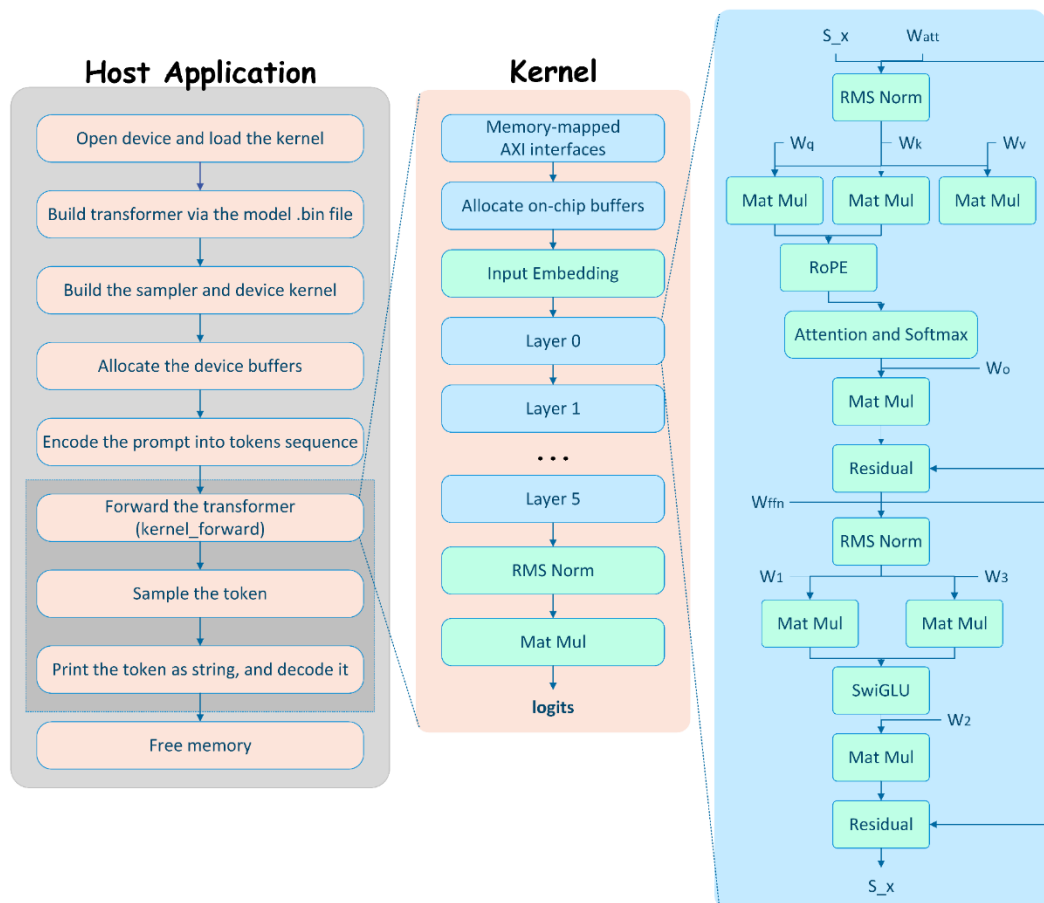
壹、動機與目的

隨著大型語言模型（Large Language Models, LLMs）在自然語言處理領域的廣泛應用，其推論效能需求逐漸受到重視。由於推論過程高度依賴矩陣運算，雲端 GPU/TPU 雖具強大計算能力，但不適用於嵌入式系統或邊緣裝置的應用場景中。相較之下，現場可程式化閘陣列（Field-Programmable Gate Array, FPGA）不僅能滿足嵌入式系統的資源限制，也能支援邊緣運算的即時需求，因此成為加速語言模型推論的理想方案。

本研究利用高階合成（High-Level Synthesis, HLS）技術，將語言模型推論中計算密集的運算（如矩陣乘法）轉換為硬體描述，並卸載至 FPGA 以提升整體推論速度。以開源專案 llama2.c 為基礎，針對經 TinyStories 訓練的輕量級語言模型進行實驗，驗證 FPGA 加速在推論中的可行性與效能提升成果，進而探討其在邊緣 AI 應用的潛力。

貳、系統開發與架構

本研究基於開源 llama2.c 開發語言模型推論，採用 ZCU106 FPGA 開發板作為硬體平台，並利用 Xilinx Vitis HLS 將 C 程式轉換為可執行的硬體邏輯。整體系統架構如圖所示，分為 Host Application（載入 Kernel 並傳送模型權重）與 Kernel（執行推論運算）兩部分。每層運算包含六種核心操作，本研究對其進行硬體優化，以提升整體推論效能。

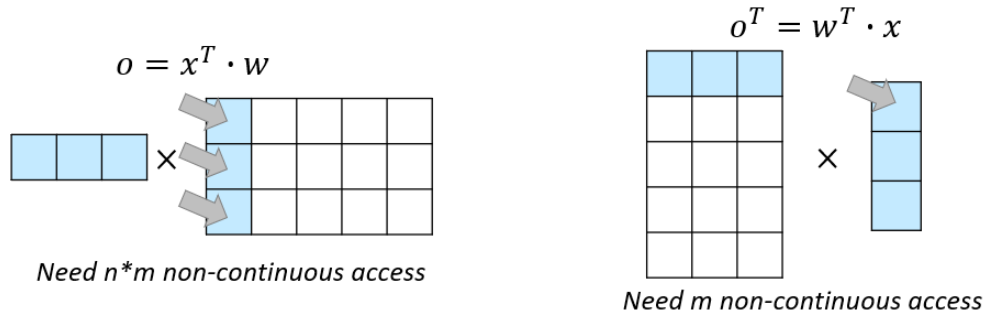


參、核心運算模組與加速方法

在 LLaMA2 推論過程中，六個核心運算模組佔據主要計算資源。本研究針對這些模組利用 HLS pragma 進行陣列切分（Array Partition）、迴圈展開（Loop Unrolling）與流水線設計（Pipeline II=1）設計，提升資料存取與運算的平行度，實現完整管線化（Fully Pipelined）結構，使系統能在每個時脈週期持續處理新輸入，進一步提高整體吞吐量。此外，以下四個模組進行了額外的優化：

（一）矩陣乘法（Matrix Multiplication）

雖然矩陣乘法的目標是計算左圖中 $x^T \cdot w$ 的乘積，但這種運算會產生大量非連續記憶體存取，增加延遲。因此使用右圖的 $w^T \cdot x$ ，有效降低記憶體存取次數，大幅提升計算效率。



（二）均方根層歸一化（Root Mean Square Normalization, RMSNorm）

由於 RMS 計算過程中的 N 為已知常數，因此可預先計算 $1/N$ 的值，以乘法取代原本的除法，簡化計算步驟並提升運算速度。

$$RMS(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

（三）自注意力機制（Self-Attention）

與 RMSNorm 相似，自注意力計算中的 d_k 為已知常數，因此可以預先計算 $1/d_k$ ，並以乘法取代除法及根號運算，以降低硬體運算負擔。

$$attention\ score = \frac{Q \times K^T}{\sqrt{d_k}}$$

（四）旋轉位置編碼（Rotary Position Embedding, RoPE）

將 embedding table 以及 sin/cos 查表資料預先載入 FPGA 的 BRAM，避免多次從 DRAM 存取，縮短資料傳輸延遲，提升運算速度。

肆、實驗成果與分析

本研究以 ZCU106 FPGA 開發板作為硬體平台，驗證 LLaMA2 推論加速效果。為全面評估硬體加速對輕量級語言模型的影響，實驗選用經 TinyStories 訓練的 15M 模型，以簡單的故事生成任務作為測試場景。模型如圖所示，能自動生成完整的故事，呈現模型在故事生成任務中的輸出表現。

```
Generate:  
Once upon a time, there was a little boy named Timmy. Timmy was very brave and l  
iked to climb trees. One day, Timmy saw a big wagon in the park. He wanted to cl  
imb on it, but he was scared. His mom told him not to climb on the wagon, but Ti  
immy didn't listen.  
Timmy climbed on the wagon and started to climb up the tree. Suddenly, he slippe  
d and fell down. His mom heard the noise and ran to help him. She saw that he ha  
d hurt his knee and needed a bandage. She put a bandage on his knee and told him  
that being brave was important.  
From that day on, Timmy listened to his mom and stayed away from the wagon. He w  
as very proud of himself for being brave and not doing anything dangerous. He le  
arned that sometimes it's important to listen to grown-ups and be careful.
```

實驗結果顯示，執行原始 llama2.c 版本的推論速度約為 1.75 tokens/s，而 FPGA 加速後的推論速度提升至 8.71 tokens/s，約為原始版本的五倍，明顯改善了推論效能，驗證了 FPGA 加速對 LLaMA2 模型推論的有效性。

伍、結論

本研究針對 LLaMA2 模型在 FPGA 上的推論進行加速設計與實作。實驗結果顯示，將計算密集的運算卸載至 FPGA Kernel 並進行硬體優化後，推論速度可提升約五倍，顯著改善模型在輕量級任務中的效能表現。然而，FPGA 在硬體資源上仍有限制。例如記憶體容量不足以支援更大模型，運算資源也限制了平行化程度的擴展。

總體而言，本研究驗證了將大型語言模型運行於邊緣裝置的可行性，並提供了針對 FPGA 加速設計的實務參考，為未來在邊緣 AI 系統上部署語言模型提供了可行方向。未來可進一步優化記憶體使用與運算平行化，並結合模型壓縮技術，以支援更大規模的語言模型在 FPGA 上的高效推論。

陸、參考資料

- llama2.c : <https://github.com/karpathy/llama2.c/>
- TinyStories : <https://huggingface.co/datasets/roneneldan/TinyStories>
- swan : <https://github.com/turingmotors/swan/>
- HLSTransform : <https://github.com/HLSTransform/submission/>
- Vitis Tutorial : <https://docs.amd.com/r/2024.1-English/Vitis-Tutorials-Vitis-Platform-Creation/Customize-the-System-Design-for-Clock-and-Reset>
- 从零开始的 Vitis 教程 : <https://www.bilibili.com/video/BV1Fv411q7EK/>
- 从零開始的 Xilinx SoC 開發 : <https://ys-hayashi.me/2021/08/xilinx-soc-01/>