

Multi-Sensor Synchronization and FPGA-Based Preprocessing for Neuromorphic Robotic Perception

In recent years, advances in neuromorphic sensing and computing have enabled the development of highly efficient perception systems for autonomous robots. The integration of heterogeneous sensors—such as event-based cameras, frame-based cameras, and inertial measurement units (IMUs)—promises to combine the complementary strengths of different sensing modalities: high dynamic range and low latency from event cameras, dense spatial features from frame cameras, and motion context from IMUs. However, exploiting these diverse data streams on ultra-low-power robotic platforms requires addressing critical challenges in sensor synchronization, data preprocessing, and efficient hardware-software interfacing.

One of the main open challenges concerns the design of flexible and energy-efficient interfaces capable of synchronizing multiple asynchronous and synchronous sensor streams at microsecond-level precision, while performing intelligent preprocessing to reduce the computational and bandwidth burden on the downstream neuromorphic System-on-Chip. This problem is particularly critical for miniaturized robots such as nano-UAVs, where form factor, power envelope (a few hundred milliwatts), and payload constraints severely limit the available hardware resources.

The use of Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) represents a promising solution for implementing low-latency, reconfigurable sensor interfaces with hardware-accelerated preprocessing capabilities. FPGA-based designs can provide precise temporal alignment of multi-modal sensor data, filter event streams, extract relevant features, and buffer data efficiently before forwarding it to the neuromorphic SoC. However, the co-design of FPGA-based sensor interfaces tailored for robotics applications, together with their integration into compact PCB designs suitable for both ground and aerial vehicles, remains an open research problem.

This *Incarico di Ricerca* is framed within the **RoboMix2** project and has as its main objective the design, implementation, and validation of FPGA-based multi-sensor synchronization and preprocessing systems for ultra-low-power neuromorphic robotic platforms. The work will focus on developing the hardware infrastructure for the project, including 1) the design of modular FPGA architectures hosting event cameras, frame cameras, IMUs, and FPGA-based synchronization and preprocessing units; 2) smart interface strategies—such as event filtering, temporal alignment, and feature extraction—to optimize the data flow towards the Kraken and Grypho neuromorphic SoCs.

Multi-Sensor Synchronization and FPGA-Based Preprocessing for Neuromorphic Robotic Perception

Negli ultimi anni, i progressi nel campo del sensing e del computing neuromorfico hanno consentito lo sviluppo di sistemi di percezione altamente efficienti per robot autonomi. L'integrazione di sensori eterogenei—quali telecamere event-based, telecamere frame-based e unità di misura inerziale (IMU)—promette di combinare i punti di forza complementari di diverse modalità sensoriali: elevato range dinamico e bassa latenza dalle telecamere event-based, caratteristiche spaziali dense dalle telecamere frame-based e contesto di movimento dalle IMU. Tuttavia, sfruttare questi diversi flussi di dati su piattaforme robotiche a bassissimo consumo richiede di affrontare sfide critiche relative alla sincronizzazione dei sensori, al preprocessing dei dati e all'interfacciamento efficiente hardware-software.

Una delle principali sfide aperte riguarda la progettazione di interfacce flessibili ed efficienti dal punto di vista energetico, capaci di sincronizzare molteplici flussi di sensori asincroni e sincroni con precisione a livello di microsecondi, eseguendo al contempo preprocessing intelligente per ridurre il carico computazionale e la larghezza di banda sul System-on-Chip neuromorfico a valle. Questo problema è particolarmente critico per robot miniaturizzati come i nano-UAV, dove il fattore di forma, l'involucro energetico (poche centinaia di milliwatt) e i vincoli di payload limitano severamente le risorse hardware disponibili.

L'utilizzo di Field-Programmable Gate Array (FPGA) rappresenta una soluzione promettente per implementare interfacce sensoriali riconfigurabili a bassa latenza con capacità di preprocessing accelerate via hardware. I design basati su FPGA possono fornire allineamento temporale preciso di dati sensoriali multi-modal, filtrare flussi di eventi, estrarre caratteristiche rilevanti e bufferizzare i dati in modo efficiente prima di inoltrarli al SoC neuromorfo. Tuttavia, la co-progettazione di interfacce sensoriali basate su FPGA e ottimizzate per applicazioni robotiche, insieme alla loro integrazione in design PCB compatti adatti sia a veicoli terrestri che aerei, rimane un problema di ricerca aperto.

Questo Incarico di Ricerca si colloca nell'ambito del progetto RoboMix2 e ha come obiettivo principale la progettazione, implementazione e validazione di sistemi di sincronizzazione multi-sensore e preprocessing basati su FPGA per piattaforme robotiche neuromorfe a bassissimo consumo. Il lavoro si concentrerà sullo sviluppo dell'infrastruttura hardware per il progetto, includendo 1) la progettazione di architetture FPGA modulari che ospitano telecamere event-based, telecamere frame-based, IMU e unità di sincronizzazione e preprocessing basate su FPGA; 2) strategie di interfaccia intelligenti—quali filtraggio di eventi, allineamento temporale ed estrazione di caratteristiche—per ottimizzare il flusso di dati verso i SoC neuromorfi Kraken e Grypho.