

DISS. ETH NO. 19163

DATA STREAM PROCESSING ON EMBEDDED DEVICES

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

RENÉ MÜLLER

Master of Science ETH in Computer Science, ETH Zurich

September 24, 1978

citizen of
Walterswil, Solothurn

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Gustavo Alonso, examiner
Prof. Dr. Donald Kossmann, co-examiner
Prof. Dr. Samuel R. Madden, co-examiner
Dr. Satnam Singh, co-examiner

2010

Abstract

Over the years, online processing of data has become more important. In inventory management, monitoring and financial applications data is generated in streams that are processed on the fly instead of being stored in a repository and processed offline later. As data volumes increase, processing has to be offloaded from the central stream processing engine. Processing either has to be moved to the data sources or to specialized accelerators placed between data source and engine. Stream processing platforms thus become heterogeneous. The problem is how to optimize query execution when it spans different streaming systems.

This thesis discusses stream processing on two different platforms: wireless sensor networks and field-programmable gate arrays (FPGAs). Both are typically connected to traditional server-class streaming processors. Driven by the different optimization goals (e.g., throughput, latency, resource consumption) operators have to be carefully placed. In some cases it is more efficient to place operators, for example, into the sensor network. Other operators that require a substantial amount of state are better placed on the server. The problems addressed in this work is the design of the underlying execution platforms that facilitate the operator placement, strategies, and cost-models used for optimization.

In the first part of the thesis *SwissQM* is presented. *SwissQM* is a stream processing platform for wireless sensor networks and is based on a small virtual machine that is deployed on resource-constrained sensor nodes. Declarative queries submitted by the user are translated into short bytecode sequences and are disseminated in the network. The bytecode programs implement streaming operators that are executed at the data source in the network. The remaining operators of the queries are placed onto the base station that connects the wireless sensor network to, e.g., the Internet. The base station also performs multi-query optimization of multiple user queries that are executed concurrently. The thesis proposes an energy-based cost model and presents optimization strategies that rely on the cost model. Multi-query optimization maximizes utilization of the network infrastructure such that expensive deployments can be accessed by several users and applications concurrently.

The second part of the thesis applies the same techniques to FPGAs, i.e., the automated compilation of queries into digital circuits that can be placed onto

FPGAs. First, a stream processing algebra is defined, which is later used to express stream execution plans. *Glacier*, a library of hardware components and a set of translation rules is presented as compositional approach to translate queries into FPGAs circuits. A key property of the generated hardware circuits is the well-defined performance behavior. The dissertation also presents optimization techniques to trade-off various parameters on the FPGAs such as throughput, latency, and chip space.

The thesis proposes a common solution for both the sensor network and the FPGA domain, which allows users to specify queries in the same declarative language. As such, it increases the level of abstraction on both platforms from embedded systems programming and hardware description languages to a high-level language. As a domain-specific language it makes this technology available to broader range of users.

Kurzfassung

Die Online-Datenverarbeitung hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Lagerverwaltungs- und Überwachungssysteme sowie Anwendungen aus dem Finanzsektor verarbeiten Daten, sogenannte Datenströme, zunehmend ohne vorgängiges Speichern. Mit steigendem Datenvolumen muss ein Teil der Verarbeitung vom Streamprozessor ausgelagert werden. Die Verarbeitung wird entweder in die Datenquelle selbst oder auf einen Hardware-Beschleuniger im Datenpfad zwischen Quelle und Streamprozessor ausgelagert. Die Streamverarbeitung erfolgt somit auf einer heterogenen Plattform. Das Problem besteht nun darin, die Verarbeitung zu optimieren, auch wenn diese unterschiedliche Systeme umschliesst.

Im Rahmen dieser Dissertation werden zwei Streamverarbeitungsplattformen vorgestellt: drahtlose Sensornetzwerke und FPGAs (Field-Programmable Gate Arrays). Beide sind üblicherweise mit einem bestehenden, Server-basierten Streamverarbeitungssystem verbunden. Unterschiedliche Optimierungsziele (z.B. Durchsatz, Latenz, Ressourcenverbrauch) bestimmen das Platzieren der Operatoren. In bestimmten Fällen ist es effizienter, einen Operator in das Sensornetzwerk zu verschieben. In anderen Fällen werden Operatoren, die üblicherweise sehr speicherintensiv sind, sinnvollerweise auf dem leistungsfähigeren Server ausgeführt. Das Design der Ausführungsplattform, welche das Verschieben von Operatoren ermöglicht, sowie die entsprechenden Platzierungsstrategien und Kostenmodelle für die Optimierung werden in dieser Dissertation behandelt.

Im ersten Teil der Arbeit wird *SwissQM* vorgestellt. *SwissQM* ist eine Streamverarbeitungsplattform für drahtlose Sensornetzwerke, die auf einer virtuellen Maschine (VM) basiert. Diese VM wird auf den Sensorknoten installiert. Deklarative Anfragen, die Anwender an das System stellen, werden in kurze Bytecodesequenzen übersetzt und im Netzwerk verteilt. Die Bytecodeprogramme implementieren diejenigen Streamoperatoren, welche ins Sensornetzwerk verschoben wurden. Die übrigen Verarbeitungsschritte werden auf der Basisstation ausgeführt, welche das Sensornetzwerk mit beispielsweise dem Internet verbindet. Die Basisstation führt ebenfalls Multiquery-Optimierung durch, d.h., parallele Anfragen von mehreren Anwendern werden optimiert und gleichzeitig ausgeführt. Dadurch kann die üblicherweise äusserst teure Installation von mehreren Benutzern oder Endanwendungen gleichzeitig verwendet und die Kosten entsprechend aufgeteilt werden.

Im zweiten Teil werden diese Techniken auf FPGAs angewendet, d.h., die automatische Übersetzung von Anfragen in digitale Schaltung für FPGAs. Zuerst wird eine Streamalgebra eingeführt, anhand deren Anfragepläne dargestellt werden können. Anschliessend wird *Glacier* vorgestellt. Es handelt sich dabei um eine Bibliothek aus Hardwarekomponenten und einen Satz von Regeln, anhand derer die Anfragepläne durch Einsatz von Komposition in FPGA-Schaltungen übersetzt werden können. Eine wichtige Eigenschaft der erzeugten Hardwareschaltungen ist das wohldefinierte Verhalten bezüglich Latenz und Durchsatz. Die Arbeit stellt weiter Optimierungstechniken vor, die es erlauben, verschiedene Parameter wie beispielsweise, Durchsatz, Latenz und die erforderliche Chip-Fläche gegeneinander abzuwägen.

In dieser Dissertation wird eine allgemeine Lösung vorgestellt, die sowohl für Sensornetzwerke als auch für FPGAs eingesetzt werden kann. Benutzer können Anfragen in deklarativer Form stellen. Als solche, entspricht diese einer domänenspezifischen Sprache, welche den Abstraktionsgrad vom Programmieren eingebetteter Systeme und dem Design von Schaltungen auf die Ebene einer Hochsprache erhöht. Das macht die Plattformen für einen weiteren Benutzerkreis verwendbar.