
Accelerator for Event-based Failure Prediction

Subtitle

Master's Thesis submitted to the
Faculty of Informatics of the *Università della Svizzera Italiana*
in partial fulfillment of the requirements for the degree of
Master of Science in Informatics
Embedded Systems Design

presented by
Simon Maurer

under the supervision of
Prof. Mirosław Malek

Janaury 2014

I certify that except where due acknowledgement has been given, the work presented in this thesis is that of the author alone; the work has not been submitted previously, in whole or in part, to qualify for any other academic award; and the content of the thesis is the result of work which has been carried out since the official commencement date of the approved research program.

Simon Maurer
Lugano, 29. January 2014

Abstract

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue.

Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Acknowledgements

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue.

Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Contents

Contents	vii
List of Figures	ix
List of Tables	xi
1 Introduction	1
1.1 Problem Statement	1
1.2 Motivation	1
1.3 Contributions	1
1.4 Document Structure	1
2 State of the Art	3
2.1 Failure Prediction	3
2.2 Accelerator - SVM	3
3 Implementation	5
3.1 Data Processing	5
3.2 Model Training	5
3.3 Sequence Processing	5
3.4 Classification	5
4 Acceleration	7
4.1 Theoretical Analysis	7
4.2 Model implementation	7
4.3 GPU-Acceleration	7
4.4 FPGA-Acceleration	7
5 Testing and Verification	9
5.1 Log Standard	9
5.2 Metrics	9
5.3 Automated Log Generation	9
5.4 Online Log Generation	9
6 Results	11
6.1 Speedup	11
6.2 Accuracy	11

7 Conclusion	13
7.1 Achievements	13
7.2 Future Work	13
A Some material	15
Bibliography	17

Figures

Tables

Chapter 1

Introduction

1.1 Problem Statement

1.2 Motivation

1.3 Contributions

1.4 Document Structure

Chapter 2

State of the Art

2.1 Failure Prediction

2.2 Accelerator - SVM

Chapter 3

Implementation

3.1 Data Processing

3.2 Model Training

3.3 Sequence Processing

3.4 Classification

Chapter 4

Acceleration

- 4.1 Theoretical Analysis
- 4.2 Model implementation
- 4.3 GPU-Acceleration
- 4.4 FPGA-Acceleration

Chapter 5

Testing and Verification

5.1 Log Standard

5.2 Metrics

5.3 Automated Log Generation

5.4 Online Log Generation

Chapter 6

Results

6.1 Speedup

6.2 Accuracy

Chapter 7

Conclusion

7.1 Achievements

7.2 Future Work

Appendix A

Some material

Bibliography

- [1] A. AVIZIENIS, J.-C. LAPRIE, B. RANDELL, AND C. LANDWEHR, *Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing*, IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 1 (2004), pp. 11–33.
- [2] M. AZHAR, M. SJALANDER, H. ALI, A. VIJAYASHEKAR, T. HOANG, K. ANSARI, AND P. LARSSON-EDEFORS, *Viterbi accelerator for embedded processor datapaths*, in IEEE International Conference on Application-Specific Systems, Architectures and Processors (ASAP), July 2012, pp. 133–140.
- [3] S. CADAMBI, I. DURDANOVIC, V. JAKKULA, M. SANKARADASS, E. COSATTO, S. CHAKRADHAR, AND H. GRAF, *A massively parallel FPGA-based coprocessor for support vector machines*, in IEEE Symposium on Field Programmable Custom Computing Machines (FCCM), April 2009, pp. 115–122.
- [4] C. DOMENICONI, C.-S. PERNG, R. VILALTA, AND S. MA, *A classification approach for prediction of target events in temporal sequences*, in Principles of Data Mining and Knowledge Discovery, T. Elomaa, H. Mannila, and H. Toivonen, eds., vol. 2431 of Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg, 2002, pp. 125–137.
- [5] A. JACOB, J. LANCASTER, J. BUHLER, AND R. CHAMBERLAIN, *Preliminary results in accelerating profile hmm search on fpgas*, in IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS), March 2007, pp. 1–8.
- [6] T.-T. Y. LIN, *Design and evaluation of an on-line predictive diagnostic system*, PhD thesis, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA, 1988.
- [7] R. P. MADDIMSETTY, J. BUHLER, R. D. CHAMBERLAIN, M. A. FRANKLIN, AND B. HARRIS, *Accelerator design for protein sequence hmm search*, in International Conference on Supercomputing, ICS '06, New York, NY, USA, 2006, ACM, pp. 288–296.
- [8] J. MAKHOUL, F. KUBALA, R. SCHWARTZ, AND R. WEISCHEDEL, *Performance measures for information extraction*, in In Proceedings of DARPA Broadcast News Workshop, 1999, pp. 249–252.
- [9] T. OLIVER, L. YEOW, AND B. SCHMIDT, *High performance database searching with hmmer on fpgas*, in IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS), March 2007, pp. 1–7.
- [10] C. J. V. RIJSBERGEN, *Information Retrieval*, Butterworth-Heinemann, Newton, MA, USA, 2nd ed., 1979.

-
- [11] F. SALFNER, *Event-based Failure Prediction*, PhD thesis, Humboldt-University of Berlin, February 2008.
 - [12] F. SALFNER, M. LENK, AND M. MALEK, *A survey of online failure prediction methods*, *ACM Comput. Surv.*, 42 (2010), pp. 10:1–10:42.
 - [13] F. SALFNER, S. TSCHIRPKE, AND M. MALEK, *Comprehensive logfiles for autonomic systems*, in *IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, April 2004, pp. 211–218.
 - [14] R. VILALTA AND S. MA, *Predicting rare events in temporal domains*, in *IEEE International Conference on Data Mining (ICDM)*, December 2002, pp. 474–481.
 - [15] J. WALTERS, V. BALU, S. KOMPALLI, AND V. CHAUDHARY, *Evaluating the use of gpus in liver image segmentation and hmmer database searches*, in *IEEE International Parallel Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, May 2009, pp. 1–12.