



Doctoral Thesis

Synchronization and symmetry breaking in distributed systems

Author(s):

Lenzen, Christoph

Publication Date:

2011

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006517282> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Christoph Lenzen

Synchronization and Symmetry Breaking
in Distributed Systems

Diss. ETH No. 19459
Diss. TIK No. 121

Hartung-Gorre Verlag Konstanz
2011

Reprint of Diss. ETH No. 19459

Series in Distributed Computing Volume 14

edited by Roger Wattenhofer

examiner	Roger Wattenhofer
co-examiner	Danny Dolev
co-examiner	Berthold Vöcking

Bibliographic information published by Die Deutsche Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Copyright © 2011 by Christoph Lenzen

First Edition 2011

Hartung-Gorre Verlag Konstanz

ISSN 1861-1591

ISBN 3-86628-390-3 and 978-3-86628-390-9

Abstract

An emerging characteristic of modern computer systems is that it is becoming ever more frequent that the amount of communication involved in a solution to a given problem is the determining cost factor. In other words, the convenient abstraction of a random access memory machine performing sequential operations does not adequately reflect reality anymore. Rather, a multitude of spatially separated agents cooperates in solving a problem, where at any time each individual agent has a limited view of the entire system's state. As a result, coordinating these agents' efforts in a way making best possible use of the system's resources becomes a fascinating and challenging task. This dissertation treats of several such coordination problems arising in distributed systems.

In the *clock synchronization* problem, devices carry clocks whose times should agree to the best possible degree. As these clocks are not perfect, the devices need to perpetually resynchronize by exchanging messages repeatedly. We consider two different varieties of this problem. First, we examine the problem in sensor networks, where for the purpose of energy conservation it is mandatory to reduce communication to a minimum. We give an algorithm that achieves an asymptotically optimal maximal clock difference throughout the network using a minimal number of transmissions. Subsequently, we explore a worst-case model allowing for arbitrary network dynamics, i.e., network links may fail and (re)appear at arbitrary times. For this model, we devise an algorithm achieving an asymptotically optimal gradient property. That is, if two devices in a larger network have access to precise estimates of each other's clock values, their clock difference is much smaller than the maximal one. Naturally, this property can only hold for devices that had such estimates for a sufficiently long period of time. We prove that the time span necessary for our algorithm to fully establish the gradient property when better estimates become available is also asymptotically optimal.

Many *load balancing* tasks can be abstracted as distributing n balls as evenly as possible into n bins. In a distributed setting, we assume the balls and bins to act as independent entities that seek to coordinate at a minimal communication complexity. We show that under this constraint, a natural class of algorithms requires a small, but non-constant number of communication rounds to achieve a constant maximum bin load. We complement the respective bounds by demonstrating that if any of the preconditions of the lower bound is dropped, a constant-time solution is possible.

Finally, we consider two basic combinatorial structures, *maximal independent sets* and *dominating sets*. A maximal independent set is a subset of the agents containing no pair of agents that can communicate directly, while there is no agent that can be added to the set without destroying this property. A dominating set is a subset of the agents that—as a whole—can contact all agents by direct communication. For several families of graphs, we shed new light on the distributed complexity of computing dominating sets of approximatively minimal size or maximal independent sets, respectively.

Zusammenfassung

Moderne Computersysteme zeichnen sich in zunehmendem Maße dadurch aus, dass das Kommunikationsvolumen den bestimmenden Kostenfaktor bei der Lösung eines gegebenen Problems darstellt. In der Folge wird die klassische Abstraktion einer random access machine, die sequentielle Operationen ausführt, der Realität heutiger Rechners nicht mehr gerecht. Vielmehr wird die Lösung durch eine Vielzahl interagierender Systemkomponenten bestimmt, die für sich genommen zu keiner Zeit Zugriff auf den Gesamtzustand des Systems haben. Vor diesem Hintergrund erweist es sich als ebenso fordernde wie fesselnde Aufgabe, die einzelnen Teile des Systems derart zu koordinieren, dass eine optimale Nutzung der verfügbaren Ressourcen erreicht wird. In dieser Dissertation behandeln wir verschiedene Koordinationsprobleme, die in verteilten Systemen auftreten.

Uhrensynchronisation ist eine Aufgabe, die sich in verteilten Systemen daraus ergibt, dass die lokalen Uhren einzelner Komponenten nicht exakt gleich schnell laufen. Wir behandeln zwei Spielarten dieses Themas. Zunächst untersuchen wir Sensornetzwerke, in denen begrenzte Energiereserven es erfordern, den Funkverkehr auf ein Minimum zu beschränken. Wir beschreiben einen Algorithmus, der unter diesen Bedingungen die maximale Uhrendifferenz im System asymptotisch minimiert. Anschliessend diskutieren wir ein worst-case Modell, in dem das Netzwerk sich beliebig ändert, das heißt Verbindungen zu beliebigen Zeiten ausfallen und aufgebaut werden können. Wir präsentieren einen Algorithmus mit optimaler Gradienteneigenschaft. Dies bedeutet, dass wann immer zwei Teilnehmer in einem grösseren Netzwerk für genügend lange Zeit gegenseitig auf zuverlässige Schätzwerte ihrer Uhrenwerte zugreifen können, die Differenz ihrer Uhrenwerte deutlich kleiner als die maximale im System ist. Unser Algorithmus minimiert asymptotisch die Zeitspanne, die eine Verbindung existieren muss, bis sie der Gradienteneigenschaft genügt.

In vielen Fällen können *Lastverteilungsaufgaben* durch ein abstraktes Modell beschrieben werden, in dem n Bälle n Urnen zugeordnet werden. In einem verteilten System nimmt man dabei an, dass sowohl Bälle als auch Urnen eigenständig operieren. Ziel ist, bei minimaler Kommunikation die maximale Anzahl Bälle in einer Urne konstant zu beschränken. Wir werden zeigen, dass für eine natürliche Klasse von Algorithmen die dafür nötige Anzahl von Kommunikationsrunden zwar langsam wachsend, jedoch nicht unabhängig von n ist. Wir ergänzen dieses Ergebnis durch den Nachweis, dass Fallenzulassen einer beliebigen Voraussetzung der entsprechenden unteren Schranke eine Lösung des Problems in konstant vielen Kommunikationsrunden ermöglicht.

Schliesslich untersuchen wir zwei grundlegende kombinatorische Strukturen. Eine *maximale stabile Menge* ist eine nicht vergrösserbare Teilmenge der Komponenten, so dass kein Paar aus dieser Menge direkt kommunizieren kann. Ein *dominierende Menge* ist eine Teilmenge der Komponenten, die zusammengenommen das gesamte System direkt kontaktieren kann. Wir zeigen für verschiedene Graphfamilien Komplexitätsschranken für die Berechnung von maximalen stabilen Mengen beziehungsweise kleinen dominierenden Mengen.