

Dissertation ETH Zurich No. 25597

**Distributed control and game design:**  
From strategic agents to programmable machines

A dissertation submitted to attain the degree of  
Doctor of Sciences of ETH Zurich  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Dario Paccagnan

Dott. Magistrale, Università degli studi di Padova, Italy  
M.Sc. Technical University of Denmark, Denmark

born 19.01.1990 in Treviso  
citizen of Italy

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. John Lygeros, examiner  
Prof. Dr. Andreas Krause, co-examiner  
Prof. Dr. Jason R. Marden, co-examiner

2018

# Abstract

Large scale systems are forecasted to greatly impact our future lives thanks to their wide ranging applications including cooperative robotics, mobility on demand, resource and task allocation, supply chain management, and many more. While technological developments have paved the way for the realization of such futuristic systems, we have a limited grasp on how to coordinate the behavior of their individual components to achieve the desired global objective.

With the objective of advancing our understanding, this thesis focus on the analysis and coordination of large scale systems without the need of a centralized authority. At a high level, we distinguish these systems depending on wether they are composed of *cooperative* or *non-cooperative* subsystems. In regard to the first class, a key challenge is the design of local decision rules for the individual components to guarantee that the collective behavior is desirable with respect to a global objective. Non-cooperative systems, on the other hand, require a more careful thinking in that the designer needs to take into account the self-interested nature of the agents. In both cases, the need for distributed protocols stems from the observation that centralized decision making is prohibited due to the scale and privacy requirement associated with typical systems.

In the first part of this thesis, we focus on the coordination of a large number of *non-cooperative* agents. More specifically, we consider strategic decision making problems where each agent's objective is a function of the aggregate behavior of the population. Examples are ubiquitous and include social and traffic networks, demand-response markets, vaccination campaigns, to name just a few. We present two cohesive contributions. First, we compare the performance of an equilibrium allocation with that of an optimal allocation, that is an allocation where a common welfare function is maximized. We propose conditions under which all Nash equilibrium allocations are efficient, i.e., are desirable from a macroscopic standpoint. In the journey towards this goal, we prove a novel result bounding the distance between the strategies at a Nash and at a Wardrop equilibrium that might be of independent interest. Second, we show how to derive scalable algorithms that guide agents towards an equilibrium allocation, i.e., a stable configuration where no agent has any incentive to deviate. When the corresponding equilibria are efficient, these algorithms attain the global objective and respect the agents' selfish nature.

In the second part of this thesis, we focus on the coordination of *cooperative* agents. We consider large-scale resource allocation problems, where a number of agents need to be

allocated to a set of resources, with the goal of jointly maximizing a given submodular or supermodular set function. Applications include sensor allocation problems, distributed caching, data summarization, and many more. Since this class of problems is computationally intractable, we aim at deriving tractable algorithms for attaining approximate solutions, ideally with the best possible approximation ratio. We approach the problem from a game-theoretic perspective and ask the following question: how should we design agents' utilities so that any equilibrium configuration recovers a large fraction of the optimum welfare? In order to answer this question, we introduce a novel framework providing a tight expression for the worst-case performance (price of anarchy) as a function of the chosen utilities. Leveraging this result, we show how to design utility functions so as to optimize the price of anarchy by means of a tractable linear program. The upshot of our contribution is the design of algorithms that are distributed, efficient, and whose performance is certified to be on par or better than that of existing (and centralized) schemes.

# Sommario

I sistemi tecnologici su larga scala promettono di migliorare sensibilmente la qualità della nostra vita futura grazie alle loro numerose applicazioni, tra cui la robotica cooperativa, la mobilità su richiesta, l’allocazione di risorse, la gestione della supply chain. Nonostante gli sviluppi tecnologici abbiano aperto la strada alla realizzazione di questi sistemi futuristici, abbiamo una conoscenza limitata su come coordinare i singoli componenti per ottenere l’obiettivo macroscopico desiderato.

Questa tesi si concentra sull’analisi e il coordinamento di sistemi su larga scala privi di un’autorità centralizzata, con l’obiettivo di migliorarne la comprensione ed il funzionamento. Ad alto livello, distinguiamo questi sistemi a seconda che essi siano cooperativi o meno. Una sfida chiave in relazione ai sistemi cooperativi è la progettazione di algoritmi di controllo per le singole componenti che garantiscano il raggiungimento di un predeterminato obiettivo globale. I sistemi non cooperativi, d’altra parte, richiedono una maggiore attenzione in quanto è necessario tenere in considerazione la natura egoistica degli agenti. In entrambi i casi, l’utilizzo di protocolli distribuiti è reso necessario dalle dimensioni di tali sistemi e dai requisiti di privacy che vi sono associati.

Nella prima parte di questa tesi, ci concentriamo sul coordinamento di sistemi non cooperativi. Più specificamente, consideriamo problemi strategici in cui l’obiettivo di ciascun agente è influenzato del comportamento aggregato della popolazione. Esempi di tali sistemi comprendono i social networks, le reti stradali, i mercati azionari. Nel seguito presentiamo due risultati coesivi. In primo luogo, confrontiamo la performance di un’allocazione di equilibrio con la performance di un’allocazione ottimale, cioè di un’allocazione in cui viene massimizzata una funzione obiettivo comune. Proponiamo poi condizioni che garantiscono l’efficienza di tutte le allocazioni di equilibrio. Nel percorso verso questo obiettivo, otteniamo un risultato che delimita la distanza tra gli equilibri di Nash e Wardrop e che potrebbe essere di interesse indipendente. In secondo luogo, progettiamo algoritmi scalabili che guidano gli agenti verso un’allocazione di equilibrio, cioè una configurazione stabile in cui nessun agente ha alcun incentivo a deviare. Quando tali equilibri sono efficienti, questi algoritmi raggiungono l’obiettivo globale e rispettano la natura individualistica degli agenti.

Nella seconda parte di questa tesi, ci concentriamo sul controllo di sistemi cooperativi. In particolare, consideriamo problemi di allocazione delle risorse su larga scala, dove un insieme di risorse deve essere assegnato ad un fissato numero di agenti, con l’obiettivo di massimizzare una funzione obiettivo globale, submodulare o supermodu-

lare. Le applicazioni includono problemi di allocazione dei sensori, caching distribuito, data summarization e molto altro ancora. Poiché questa classe di problemi è intrattabile dal punto di vista computazionale, ci prefiggiamo di ricavare soluzioni approssimate con algoritmi efficienti, idealmente con il miglior rapporto di approssimazione possibile. Formuliamo questo problema con il linguaggio della teoria dei giochi e ci poniamo la seguente domanda: come progettare le funzioni obiettivo da assegnare agli agenti in modo che ogni configurazione di equilibrio produca la massima frazione del valore ottimo? Per rispondere a questa domanda, introduciamo un nuovo metodo per calcolare in maniera esatta la qualità di un equilibrio in relazione alle funzioni obiettivo scelte (price of anarchy). Sfruttando questo risultato, mostriamo come costruire tali funzioni obiettivo in modo da massimizzare la performance dei corrispondenti equilibri grazie ad un programma lineare ausiliario. Il risultato finale è la progettazione di algoritmi distribuiti ed efficienti, il cui rapporto di approssimazione è alla pari o superiore a quello di molti schemi (centralizzati) comunemente usati.