



Information-Theoretic Analysis of Non-Cooperative and Cooperative Remote Sensing

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik der Universität Rostock

eingereicht von

Steffen Steiner | Blücherstraße 54a | 18055 Rostock

Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht die Optimierung verteilter Kompression in Sensornetzwerken. Dabei wird der Spezialfall betrachtet, bei dem einzelne Sensoren verrauschte Beobachtungen von dem selben Prozess machen und diese über kapazitätsbegrenzte Kanäle an einen gemeinsamen Empfänger weiterleiten wollen. Sollte die Kommunikation unter den Sensoren nicht möglich sein, ist dies unter dem Namen Chief Executive (Estimation) Officer (CEO) Problem bekannt. Um die Beobachtungen mit möglichst großer Rate fehlerfrei übertragen zu können, muss jeder Sensor eine lokale Komprimierung vornehmen. Dieses Problem stellt ein altbekanntes Problem in der Informationstheorie dar, dessen Untersuchung in den letzten Jahren signifikante Ergebnisse erzielt hat. Insbesondere wurde die komplette Region erreichbarer Übertragungsraten für verschiedene Verteilungen involvierter Zufallsprozesse sowie Verzerrungsmaße bestimmt. Darüber hinaus gibt es verschiedene algorithmische Ansätze, das CEO Problem zu lösen. Die praktische Ausführung dieser Algorithmen kann allerdings sehr anspruchsvoll bzw. komplex werden. Daher befasst sich diese Arbeit mit der praktischen Implementierung und Verfeinerung sowie der informationstheoretischen Analyse solcher Algorithmen. Betrachtet man das CEO Problem mit einem logarithmischen Verzerrungsmaß besteht ein direkter Zusammenhang zu dem sogenannten information bottleneck (IB) Prinzip. Dementsprechend wird zur Lösung des CEO Problems ein gieriger Algorithmus basierend auf diesem Prinzip eingeführt, welcher gleichzeitig individuelle Ratenbeschränkungen der Weiterleitungskanäle zum gemeinsamen Empfänger erlaubt. Hierbei werden die Komprimierer/Quantisierer der einzelnen Sensoren nacheinander optimiert, wobei die Abbildungsvorschriften der Quantisierer vorangegangener Sensoren, entsprechend des Wyner-Ziv Kodierprinzips, ausgenutzt werden. Dieser algorithmische Ansatz liefert eine signifikante Verbesserung der Leistungsfähigkeit verglichen mit einer skalaren und unabhängigen IB Optimierung der einzelnen Sensoren. Allerdings besteht auch bei diesem algorithmischen Ansatz ein exponentieller Zusammenhang zwischen dem Speicherbedarf zur Optimierung und der Größe des Sensornetzwerks. Um dieses Problem zu lösen, wird ein Ansatz verfolgt, bei dem die Abbildungsvorschriften der Quantisierer vorangegangener Sensoren basierend auf dem IB Prinzip weiter komprimiert werden. Dies reduziert den Speicherbedarf signifikant, wohingegen der Kompressionsverlust bezüglich des unkomprimierten Verfahrens gering gehalten wird. Im Falle einer fehlerbehafteten Übertragung zum gemeinsamen Empfänger, was zwangsläufig bei Verwendung von Codes mit endlicher Länge auftritt, wird der gierige Optimierungsalgorithmus adaptiert, um eben diese Fehler zu berücksichtigen.

Verglichen mit dem CEO Szenario mit voller Kooperation, bei dem jedem Sensor die Messwerte aller Sensoren zur Verfügung stehen und eine koordinierte Kompression durchgeführt werden kann, verbleibt bei dem bisherigen Algorithmus für das originale, unkooperierende CEO Problem eine große Lücke bezüglich der Leistungsfähigkeit. Aus diesem Grund wird das partiell kooperierende CEO Problem eingeführt, welches das originale Problem dahingehend erweitert, dass Sensoren über kapazitätsbegrenzte Kanäle

zur Laufzeit miteinander kommunizieren können. Dementsprechend kann diese instantane Seiteninformation, basierend auf dem verwendeten Übertragungsprotokoll, bei der Kompression ausgenutzt werden. Die Optimierung der Kompression einzelner Sensoren erfolgt wie beim originalen CEO Problem über einen gierigen Algorithmus. Beim sukzessiven Broadcast-Übertragungsprotokoll kann jeder Sensor die instantane Seiteninformation aller vorher übertragenden Sensoren ausnutzen. Da die Quantisierungsfunktion von der Größe des Netzwerks abhängt, könnte es bei der Nutzung dieses Übertragungsprotokolls zu Speicherproblemen kommen. Um dies zu umgehen, beschränkt sich das sequentielle Punkt-zu-Punkt-Übertragungsprotokoll auf die Kommunikation mit direkten Nachbarn. Dementsprechend kann lediglich die instantane Seiteninformation des direkten Vorgängers genutzt werden. Mit Hilfe des Austauschs von instantaner Seiteninformation zwischen Sensoren kann die Leistungsfähigkeit gegenüber dem originalen CEO Problem signifikant verbessert werden. Darüber hinaus verbessert der Austausch instantaner Seiteninformation die Robustheit gegenüber schlechten Wyner-Ziv Kodierungen, welche durch suboptimale Optimierungsreihenfolgen hervorgerufen werden und deutliche Einbrüche der Leistungsfähigkeit beim originalen CEO Problem mit sich bringen können. Da trotz partieller Kooperation mit sukzessiver Broadcast oder sequentieller Punkt-zu-Punkt Übertragung im Vergleich zum vollkooperierenden CEO Problem, bezüglich der Leistungsfähigkeit, weiterhin eine Lücke bleibt, wird das Zweiphasen-Übertragungsprotokoll eingeführt. Dieses separiert die Kooperation zwischen Sensoren und das Weiterleiten zum gemeinsamen Empfänger in einzelne Phasen und ermöglicht so, dass Sensoren die maximale instantane Seiteninformation ausnutzen können. Mit Hilfe dieses Übertragungsprotokolls kann die Leistungsfähigkeit des CEO Szenarios mit voller Kooperation erreicht werden.

Abstract

This work addresses the optimization of distributed compression in a sensor network. In particular, distributed sensors measure noisy versions of the same process of interest and try to forward their measurements over capacity-limited links to a common receiver. Therefore, each sensor has to locally compress its measurements. If direct communication among sensors is not possible, this setup is widely known as the Chief Executive (Estimation) Officer (CEO) problem. This problem represents a long-standing problem in information theory, and significant progress has been achieved in recent years. In particular, the region of achievable transmission rates has been completely characterized for specific probability distributions of involved random processes and distortion measures. Moreover, algorithmic solutions to solve the CEO problem are principally known. Their practical implementation, however, can become challenging due to complexity reasons. Therefore, this work focuses on an implementation point of view to solve this problem as well as an information-theoretic analysis of the proposed algorithms. Since the CEO problem with a logarithmic loss distortion measure is closely related to the information bottleneck (IB) principle, an efficient greedy algorithm based on this principle is introduced to determine feasible solutions of the CEO problem while fulfilling individual rate constraints of the forward link of each sensor. Applying Wyner-Ziv coding, the compression devices/quantizers are successively designed, exploiting the quantizer mappings of already designed sensors. This algorithmic approach leads to a significant performance gain compared to individual scalar IB optimization of each sensor. However, even this greedy optimization algorithm results in an exponentially growing memory complexity with the number of sensors in the network, which is why an IB based approach to compress the exploited quantizer mappings for Wyner-Ziv coding is introduced. This significantly reduces the memory requirements, while the loss compared to the uncompressed case can be kept very small. For the case of erroneous transmission to the common receiver caused, e.g., by finite length codes, the greedy optimization algorithm is adapted, incorporating residual error probabilities on the forward channel of each sensor.

The greedy optimization approach still exhibits a significant gap to a fully cooperative CEO scenario, where each sensor has access to all measurements in the network, and coordinated compression can be performed. Therefore, this work introduces the partial cooperative CEO scenario, extending the original CEO problem by allowing sensors to communicate over capacity-limited inter-sensor links during run-time. Hence, sensors can exploit instantaneous side-information received from other sensors for compressing their measurements depending on the specific inter-sensor communication protocol. Inspired by algorithmic solutions for the original CEO problem, the sensors are optimized in a greedy manner. The successive broadcast transmission protocol allows each sensor to exploit instantaneous side-information of all previously transmitting sensors. However, this introduces memory issues for larger networks since the mapping is dependent on the network size. In order to solve this, the sequential point-to-point transmission protocol

restricts the inter-sensor communication such that sensors can only exploit instantaneous side-information of the direct predecessor. This inter-sensor communication significantly increases the performance of the CEO scenario. Moreover, exchanging instantaneous side-information increases the robustness against bad Wyner-Ziv coding strategies caused by a specific optimization order, which can lead to significant performance losses in the original CEO problem. Since there still occurs a gap to the fully cooperative CEO scenario, a two-phase transmission protocol is introduced, separating the cooperation among sensors and the forwarding to the common receiver. This transmission protocol can reach the performance of a fully cooperative CEO scenario.