



INTISARI

DESAIN SKEMA KENDALI MODEL PREDIKTIF KOALISI UNTUK SISTEM BERSKALA-BESAR

Oleh

ZAIFUL ULUM

19/450321/SPA/00703

Desain kendali pada suatu sistem bertujuan untuk menentukan input kendali agar sistem yang dikendalikan beroperasi sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Salah satu metode kendali yang dapat diterapkan pada sistem adalah metode Kendali Model Prediktif (*Model Predictive Control/MPC*). Metode MPC adalah metode kendali optimal yang menggunakan model sistem untuk memprediksi perilaku sistem dalam horizon waktu tertentu dan prinsip horizon mundur. Pada prinsip tersebut, input kendali sistem pada setiap waktu diperoleh dengan mengambil elemen pertama dari barisan prediksi input kendali optimal.

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi telah mendorong munculnya sistem berskala-besar, yakni, sistem yang terdiri atas banyak subsistem yang saling berinteraksi satu sama lain. Desain metode kendali MPC pada sistem berskala-besar dapat diimplementasikan dalam skema tersentralisasi atau terdesentralisasi. Skema kendali MPC tersentralisasi memiliki keunggulan dalam memberikan performa kendali yang optimal karena semua keputusan kendali dibuat oleh satu pengendali pusat yang memiliki informasi lengkap tentang sistem. Namun demikian, penerapan skema kendali MPC tersentralisasi pada sistem berskala besar menghadapi tantangan karena tingginya kompleksitas komputasi dan kebutuhan komunikasi yang besar. Pengendali pusat harus menyelesaikan sebuah masalah optimisasi berdimensi besar berdasarkan data semua subsistem, yang dapat menyebabkan waktu perhitungan terlalu lama dan memerlukan sumber daya komputasi yang besar. Sebaliknya, pada skema kendali MPC terdesentralisasi, masing-masing subsistem dikendalikan oleh pengendali MPC lokal yang bertugas menghitung input kendali subsistemnya secara independen dengan menyelesaikan masalah optimisasi lokal berdasarkan informasi lokal dari subsistemnya sendiri. Pendekatan ini mengurangi beban komputasi dan komunikasi dibandingkan dengan skema tersentralisasi, karena dimensi masalah optimisasi yang diselesaikan oleh masing-masing agen MPC lokal lebih kecil dibandingkan dengan masalah optimisasi pada skema tersentralisasi, dan tidak memerlukan informasi lengkap semua subsistem. Namun demikian,



skema kendali MPC terdesentralisasi dapat menghasilkan performa kendali yang buruk dan bahkan menyebabkan sistem menjadi tidak stabil jika interaksi antar subsistem kuat. Untuk mengatasi keterbatasan kedua pendekatan tersebut, MPC koalisi dikembangkan sebagai solusi yang menyeimbangkan efisiensi komputasi dan performa kendali.

Implementasi skema kendali MPC koalisi pada sistem berskala-besar bergantung pada topologi jaringan komunikasi di antara para agen MPC yang mengendalikan masing-masing subsistem. Topologi jaringan komunikasi tersebut merepresentasikan sebuah struktur yang menggambarkan bagaimana para agen MPC saling berkomunikasi dan bertukar informasi. Struktur tersebut dibentuk oleh sekumpulan tautan komunikasi, yaitu koneksi langsung antara dua agen MPC yang memungkinkan pertukaran informasi, seperti informasi *state* dan input kendali. Secara matematis, topologi jaringan komunikasi dinyatakan sebagai sebuah graf, dengan himpunan titiknya merepresentasikan para agen MPC, dan himpunan sisinya merepresentasikan tautan komunikasi di antara agen-agen tersebut. Dalam skema kendali koalisi, topologi jaringan komunikasi diperbarui secara periodik dengan cara mengaktifkan atau menonaktifkan tautan komunikasi berdasarkan kontribusinya terhadap performa kendali sistem. Agen-agen yang terhubung baik secara langsung maupun tidak langsung melalui tautan komunikasi aktif selanjutnya dikelompokkan ke dalam sebuah koalisi, yakni, kelompok agen yang berkomunikasi dan bekerja sama dalam menghitung input kendali subsistemnya secara kolektif. Dengan cara ini, koordinasi tetap terjaga seperti pada MPC tersentralisasi, tetapi tanpa harus menangani seluruh sistem sekaligus seperti dalam MPC terdesentralisasi. Terdapat dua pendekatan untuk menentukan topologi jaringan komunikasi antar agen pada skema kendali koalisi, yakni pendekatan *top-down* dan *bottom-up*. Pada pendekatan *top-down*, topologi jaringan komunikasi ditentukan secara terpusat oleh supervisor berdasarkan informasi global yang dikirim oleh semua agen. Sebaliknya, dalam pendekatan *bottom-up*, topologi jaringan komunikasi ditentukan secara mandiri oleh agen-agen berdasarkan informasi lokal yang dimilikinya.

Pada disertasi ini dibahas desain skema kendali MPC koalisi pada sistem linear berkendala yang dibangun oleh subsistem-subsistem yang saling berinteraksi melalui vektor *state* dan input kendali. Tujuan penelitian ini adalah merancang skema kendali koalisi pada sistem berskala-besar yang dapat menjamin fisibilitas dan kestabilan sistem, baik untuk sistem tanpa gangguan luar maupun dengan adanya gangguan luar, namun dengan biaya kendali dan komunikasi yang efisien. Penelitian ini dilakukan karena skema kendali koalisi yang ada masih memiliki sejumlah keterbatasan, seperti, belum mempertimbangkan kendala *state* dan input secara eksplisit, atau hanya menggunakan pendekatan *soft constraints* pada *state*, serta umumnya mengabaikan pengaruh gangguan luar pada sistem. Selain itu, pada skema kendali MPC koalisi dengan pendekatan *top-down* yang ada, perhitungan topologi jaringan komunikasi masih melibatkan proses iterasi, sehingga meningkatkan kompleksitas perhitungan. Secara rinci, terdapat tiga skema kendali koalisi yang dirancang dalam disertasi ini, yaitu, (i) skema kendali MPC koalisi dengan pende-



katan *top-down* untuk sistem tanpa gangguan luar, (ii) skema kendali MPC koalisi dengan pendekatan *top-down* untuk sistem dengan gangguan luar, dan (iii) skema kendali MPC koalisi dengan pendekatan *bottom-up* untuk sistem dengan gangguan luar. Ketiga skema kendali tersebut dirancang dengan menerapkan *hard constraints* pada *state* dan input kendali sistem untuk menjamin kendala *state* dan input pada sistem selalu terpenuhi pada setiap waktu. Masalah optimisasi MPC koalisi pada ketiga skema kendali yang diusulkan dirumuskan berdasarkan pendekatan MPC kokoh berbasis tabung. Dalam perumusan ini, interaksi antar koalisi dan gangguan pada subsistem-subsistem di dalam koalisi diperlakukan sebagai gangguan luar, sehingga dapat meningkatkan ketahanan sistem terhadap gangguan sekaligus meningkatkan akurasi kendali. Kemudian, untuk mengurangi kompleksitas perhitungan topologi jaringan dalam pendekatan *bottom-up*, disusun algoritma non-iterasi berbasis teori permainan jaringan. Selain itu, disertasi ini juga memberikan syarat cukup yang menjamin fisibilitas rekursif dari semua skema kendali koalisi yang diusulkan. Lebih jauh, disertasi ini juga memberikan syarat cukup untuk menjamin stabilitas sistem lingkaran tertutup dari skema kendali MPC koalisi pertama dan ketiga. Hasil simulasi skema kendali koalisi pertama pada sistem yang dibangun oleh empat subsistem yang saling berinteraksi menunjukkan bahwa skema kendali koalisi tersebut menghasilkan performa kendali mendekati performa kendali MPC tersentralisasi, namun dengan biaya total yang lebih rendah, dan waktu eksekusi masalah optimisasi MPC yang tidak jauh berbeda. Selanjutnya, hasil simulasi skema kendali MPC koalisi yang kedua pada sistem kendali pengatur suhu ruangan pada bangunan yang terdiri atas empat ruangan menunjukkan bahwa skema kendali MPC koalisi tersebut tidak hanya memberikan waktu komputasi masalah optimisasi MPC dan biaya total yang lebih efisien, tetapi juga menghasilkan performa kendali yang lebih baik dibandingkan dengan skema kendali MPC tersentralisasi. Sementara itu, hasil simulasi skema kendali MPC koalisi yang ketiga pada sistem tiga tangki yang saling berinteraksi memperlihatkan bahwa skema kendali koalisi tersebut menghasilkan performa kendali yang mirip dengan performa kendali MPC tersentralisasi, tetapi dengan biaya total dan waktu eksekusi masalah optimisasi MPC yang lebih kecil.

Kata-kata kunci: skema kendali model prediktif koalisi, pendekatan *top-down*, pendekatan *bottom-up*, permainan jaringan, sistem alih, sistem pengatur suhu ruangan, sistem tangki



ABSTRACT

THE DESIGN OF COALITIONAL MODEL PREDICTIVE CONTROL SCHEME FOR LARGE-SCALED SYSTEMS

By

ZAIFUL ULUM

19/450321/SPA/00703

The control design of a system aims to determine the control input such that the controlled system operates according to the desired specifications. One of the control methods that can be applied to the system is Model Predictive Control (MPC). MPC is an optimal control method that employs a system model to predict the system's behavior within a certain time horizon and the receding horizon principle. In this principle, the control input at each time step is obtained by taking the first element of the optimal control input prediction sequence.

The development of information and communication technology has encouraged the emergence of large-scale systems, i.e., systems consist of many subsystems that interact with each other. The design of MPC strategies for such systems can be realized through centralized or decentralized control frameworks. The centralized MPC scheme offers the advantage of achieving optimal control performance, since all control decisions are determined by a central controller possessing complete information about the overall system. However, the implementation of centralized MPC scheme to large-scale systems is challenging due to high computational complexity and large communication requirements. The central controller has to solve a high-dimensional optimization problem based on data from all subsystems, which can result in very long computation times and require substantial computational resources. On the other hand, in the decentralized MPC scheme, each subsystem is governed by a local MPC controller that independently computes its control input by solving a local optimization problem using only information available from its own subsystem. This approach significantly reduces both the computational burden and communication requirements compared to the centralized scheme, because the dimension of the optimization problem solved by each local MPC agent is smaller than the optimization problem in the centralized scheme, and does not require complete information from all subsystems. However, the decentralized MPC control scheme can result in poor control performance and even causes the system to become unstable if the interaction between subsystems is strong. To



overcome the limitations of both approaches, coalitional MPC schemes are developed as a solution that balances computational efficiency and control performance.

The implementation of the coalitional MPC control scheme to large-scale systems relies on the topology of the communication network among the MPC agents controlling each subsystem. The communication network topology represents a structure that describes how MPC agents communicate with each other and exchange information. The structure is formed by a set of communication links, i.e., direct connections between two MPC agents that enable them to exchange information, such as state and control input vectors. In the coalitional scheme, the communication network topology is updated periodically by enabling and disabling communication links based on their contribution to the system control performance. Agents that are connected either directly or indirectly through active communication links will be grouped into a coalition, i.e., a group of agents that communicate and cooperate in calculating their subsystem control inputs collectively. In this way, coordination is maintained as in the centralized MPC scheme, but without having to deal with the entire system as in the decentralized MPC scheme. There are two approaches to determine the topology of the communication network between agents in the coalition control scheme, namely the top-down and bottom-up approaches. In the top-down approach, the topology of the communication network is determined centrally by a supervisor based on the global information sent by all agents. On the other hand, the topology of the communication network in the bottom-up approach is determined independently by the agents based on their local information.

This dissertation discusses the design of a coalitional MPC scheme for constrained linear systems composed of multiple interacting subsystems through state and control input vectors. The purpose of this dissertation research is to design a coalitional control scheme for systems with and without external disturbances that can ensure the feasibility and stability of the system with minimum control and communication costs. Specifically, three coalitional control schemes are proposed in this dissertation: (i) a top-down coalitional MPC scheme for systems without external disturbances, (ii) a top-down coalitional MPC scheme for systems with external disturbances, and (iii) a bottom-up coalitional MPC scheme for systems with external disturbances. The three control schemes are designed by imposing hard constraints on the state and control inputs of the system to ensure that the system constraints are satisfied at all time steps. The coalitional MPC optimization problems of the three proposed control schemes are formulated based on the tube-based robust MPC approach, taking into account the interactions between coalitions and disturbances to subsystems within the coalition as external disturbances, to improve the robustness to disturbances and control accuracy. In the coalitional MPC control scheme with bottom-up approach, a non-iteration algorithm based on network game theory is formulated to reduce the complexity of network topology computation. In addition, this dissertation also provides sufficient conditions that guarantee the recursive feasibility of all proposed coalitional control schemes. Furthermore, this dissertation also provides sufficient conditions to guarantee the stability of the closed-loop



system of the first and third coalitional MPC control schemes. The simulation results of the first coalitional control scheme on a system built by four interacting subsystems show that the coalition control scheme produces control performance close to that of centralized MPC control, but with lower total costs and MPC optimization problem execution times that are not significantly different. Furthermore, the simulation results of the second coalitional MPC scheme, implemented on a temperature regulation system in a building consisting of four rooms, indicate that the scheme not only yields more efficient optimization computation time and total cost, produces better control performance compared to the centralized MPC control scheme. Meanwhile, the simulation results of the third coalitional MPC scheme, applied to an interconnected three-tank system, show that the proposed coalitional control scheme provides control performance similar to that of the centralized MPC scheme, but with lower total costs and MPC optimization problem execution times.

Keywords: coalitional MPC schemes, top-down approaches, bottom-up approaches, network games, switched systems, temperature control systems, tank systems