

PAWEŁ TOPA

## **Cellular Automata**

**as an efficient and flexible computational framework  
for modeling and simulation of  
real-world, multiscale complex systems**

### **Abstract**

Computer simulation is now a fully-fledged scientific method. It is especially useful for systems or phenomena that have the property of complexity. It means that it is impossible to deduct the behavior of the whole system from the analysis of its individual parts. It is a result of interactions and feedbacks (positive and negative) that occur between components. Such systems are called Complex Systems and the only reliable method to simulate them is tracking their evolution step-by-step by using models that directly represents all components. Intensive investigations into modeling methods were motivated by the need for new methods that are able to efficiently model a Complex System. The Cellular Automata is a modeling and simulation method often used to simulate Complex Systems. It allows to decompose the system into set of interacting entities.

In this monograph, three issues related to the usage of this approach are considered. First, the possibilities of implementing parallel Cellular Automata models, especially for massively parallel architecture, such as a GPU, are investigated. Two Cellular Automata models are used as a case study: water flow and pedestrian dynamics. The researches include various strategies for constructing parallel models and their algorithms.

Another issue, investigated by the Author, is multiscality which is difficult to represent using the original Cellular Automata approach. Thus, a new extension is proposed which is capable of encompassing processes occurring in different spatio-temporal scales. Efficiency and universality of this new modeling tool is demonstrated and discussed using natural phenomena like a vascular system and a mycelium.

The last issue is the ability to use the Cellular Automata not only as a specific modeling tool but also as a flexible and efficient modeling framework. This approach was tested using a model of evolution and population dynamics. The model uses agent-based methodology to represent individuals, their behavior and life strategy

and the Cellular Automata represents the agents' habitat. Additionally, the Cellular Automata is used as a framework to organize the processing of agents. In particular, it allows to employ tested and efficient architectures of parallel computations. The monograph ends with an outline of the most important contributions and concluding remarks summarizing the results.

PAWEŁ TOPA

## **Automat komórkowy**

**jako wydajny i elastyczny schemat obliczeniowy**

**na potrzeby modelowania i symulacji**

**rzeczywistych, wieloskalowych zjawisk złożonych**

## **Streszczenie**

Symulacja komputerowa jest obecnie uważana za pełnoprawną metodę naukową. Jest ona szczególnie przydatna w przypadku systemów lub zjawisk, które określamy mianem złożonych. Termin ten oznacza, że nie można przewidzieć zachowania całego systemu na podstawie analizy wyłącznie jego poszczególnych części, a jest ono rezultatem interakcji i sprzężeń zwrotnych, które zachodzą między elementami składowymi. Tego typu układy określane są mianem systemów złożonych (ang. *Complex Systems*) i najskuteczniejszą metodą ich symulacji jest odтворzenie ich ewolucji krok po kroku za pomocą modelu komputerowego. Potrzeba stosowania wiernej i wydajnej symulacji systemów złożonych stanowi motywację do prowadzenia intensywnych prac nad nowymi narzędziami modelowania. Automat komórkowy jest często stosowany w przypadku modelowania i symulacji systemów złożonych. Ta metoda pozwala przedstawić system w postaci zbioru elementów, które oddziałują ze sobą zgodnie ze zdefiniowanymi regułami.

W niniejszej monografii rozważane są trzy zagadnienia związane z wykorzystaniem automatu komórkowego. Analizowane są kwestie równoległych implementacji modeli, w szczególności dla architektur masywnie równoległych, np. procesorów graficznych (GPU). Jako przykład efektywnego wykorzystania tej architektury przedstawiono dwa modele oparte na metodzie automatu komórkowego: model przepływu wody i dynamiki pieszych. Rozważano w tym przypadku różne strategie konstruowania modeli i ich algorytmów.

Następnym zagadnieniem, jakie zostało poddane analizie, jest możliwość modelowania zjawisk wieloskalowych. Ich symulacja za pomocą tradycyjnie rozumianego automatu komórkowego jest trudna lub niemożliwa. Konieczne jest wprowadzenie rozszerzeń, które umożliwią uchwycenie w jednym modelu procesów zachodzących w różnych skalach przestrzenno-czasowych. Wydajność i uniwersalność tego nowego narzędzia jest demonstrowana i omawiana w zastosowaniu do trzech przykładowych zjawisk naturalnych: rzeki anastomozującej, układu krwionośnego oraz grzybni.

Ostatnie zagadnienie to możliwość wykorzystania automatu komórkowego nie tylko jako konkretnej metody modelowania i symulacji, ale także jako elastycznego i wydajnego schematu konstruowania i implementacji modeli komputerowych opartych na innych metodologiach. Koncepcja ta została przetestowana w modelu ewolucji i dynamiki populacji wykorzystującego paradygmat agentowy. Proponowane podejście zakłada, że automat komórkowy nie tylko modeluje habitat agentów, ale także organizuje przetwarzania agentów. W szczególności umożliwia to zastosowanie istniejących i przetestowanych schematów obliczeń równoległych i rozproszonych. Monografię kończy podsumowanie najistotniejszych elementów pracy i osiągniętych wyników.