

Fire and Smoke

Maciej Bartczak, Mikołaj Leonhardt, Wojciech Wiśniewski

Czerwiec 2023

Naszym zadaniem było zaimplementowanie trójwymiarowego automatu komórkowego służącego do symulacji rozprzestrzeniania się ognia oraz dymu. Implementacja została wykonana w języku C++ przy pomocy biblioteki graficznej OpenGL.

Zaimplementowany przez nas model uwzględnia następujące mechanizmy:

- generowanie ciepła oraz dymu w procesie spalania
- kontaktowe przewodnictwo ciepła
- przewodnictwo ciepła poprzez konwekcje
- rozprzestrzenianie się ognia
- rozprzestrzenianie się dymu

W celu uproszczenia modelu i ułatwienia obliczeń, podobnie jak w innych badaniach tego typu, zastosowano sąsiedztwo oparte o relację przylegania do siebie sześciątów. Oznacza to, że w naszej trójwymiarowej przestrzeni automatu komórkowego, każda komórka wchodzi w interakcje z sześcioma najbliższymi jej komórkami, które są jej bezpośrednio przyległe wzdłuż osi X, Y, Z (góra, dół, lewo, prawo, przód, tył). Jest to trójwymiarowy odpowiednik sąsiedztwa Moore'a.

Własności zastosowanych materiałów

	Powietrze	Beton	Drewno	Dywan	Materiał
Palność	Nie	Nie	Tak	Tak	Tak
Gęstość [$\frac{kg}{m^3}$]	1.29	2200	400	300	400
Ciepło właściwe [$\frac{J}{kg \cdot K}$]	1005	900	2390	5200	2390
Wsp. przewodnictwa	0.026	0.005	0.3	0.174	0.3
T. zapłonu [$^{\circ}C$]	-	-	250	120	350
T. samozapłonu [$^{\circ}C$]	-	-	2000	750	1400
Czas palenia [s]	-	-	20	15	20
Wsp. em. ciepła [$\frac{J}{s}$]	-	-	1500	500	1500
Wsp. em. dymu	-	-	0.3	0.8	1

Powyższe dane zostały zaczerpnięte z pracy [1].

Generowanie ciepła

Ciepło jest generowane przez palące się komórki korzystając z fizycznych właściwości zastosowanych materiałów.

Ciepło wygenerowane przez płonący materiał o współczynniku emisji ciepła $P \left[\frac{J}{s} \right]$ jest dane wzorem:

$$Q = P \cdot t \quad (1)$$

Zmianę temperatury komórki (o cieple właściwym c i masie m) można policzyć według wzoru:

$$T_{t+1} = T_t + \frac{Q}{m \cdot c} \quad (2)$$

Przewodnictwo ciepła

Przewodnictwo ciepła to proces, w którym energia termiczna jest przenoszona wewnątrz ciała lub między ciałami w bezpośrednim kontakcie, poprzez drgania cząstek. W naszym modelu, przewodnictwo ciepła jest symulowane poprzez bezpośrednią interakcję między sąsiadującymi komórkami.

Korzystając z następujących oznaczeń:

- $N(c)$ to sąsiedztwo komórki c
- $\lambda(c)$ to współczynnik przewodnictwa komórki c

Można policzyć zmianę temperatury rozważanej komórki:

$$T_{t+1}(c) = T_t(c) + \sum_{c' \in N(c)} \lambda(c') \cdot (T_t(c) - T_t(c')) \quad (3)$$

W naszym automacie konwekcja jest symulowana przez ruch ciepła w górę poprzez komórki powietrza.

Korzystając z oznaczeń:

- c_U - górna komórka
- c_L - dolna komórka
- α - współczynnik konwekcji

Można policzyć zmianę temperatury rozważanych komórek:

$$\begin{aligned} T_{t+1}(c_U) &= T_t(c_U) + \alpha \cdot (T_t(c_U) - T_t(c_L)) \\ T_{t+1}(c_L) &= T_t(c_L) - \alpha \cdot (T_t(c_U) - T_t(c_L)) \end{aligned} \quad (4)$$

Rozprzestrzenianie się ognia

Dla każdego zastosowanego materiału zostały zdefiniowane temperatury zapłonu oraz samozapłonu.

Pozwala nam to zdefiniować dwa warunki wystarczające do zapalenia się komórki:

- 1 Temperatura rozważanej komórki jest wystarczająca oraz istnieje sąsiad, który palił się wystarczająco długo:

$$\exists c' \in N(c) : T(c) \geq T_z(c) \wedge t(c') \geq t_z(c') \quad (5)$$

- 2 Temperatura rozważanej komórki przekroczyła temperaturę samozapłonu:

$$T(c) \geq T_s(c) \quad (6)$$

Rozprzestrzenianie się dymu

Rozważając komórkę naszego automatu komórkowego, w sytuacji, gdy dostępna pojemność na dym w komórce stanowi 10% lub mniej całościowej pojemności, dystrybucja dymu jest realizowana pomiędzy pięcioma komórkami sąsiednimi, pomijając komórkę bezpośrednio powyżej.

Dla każdej z pięciu komórek, obecna komórka przekazuje najwyżej $1/6$ swojego dymu, pod warunkiem, że komórka docelowa jest w stanie go pomieścić. Równocześnie, obecna komórka może przyjąć dym od każdej z pięciu komórek, jednak najwyżej $1/6$ ilości dymu każdej z nich, i tylko w granicach swojej dostępnej pojemności.

Gdy dostępna pojemność na dym w komórce przekracza 10% jej całościowej pojemności, dystrybucja dymu jest analogiczna, ale uwzględnia wszystkie sześć komórek sąsiadujących.

Problemy związane z radiacją

Radiacja to proces przekazywania energii ciepłej za pomocą fal elektromagnetycznych, bez bezpośredniego kontaktu.

Implementacja tego procesu w modelu automatu komórkowego stanowi duże wyzwanie, ponieważ nie jest ona ograniczona do bezpośrednich sąsiadów.

Natężenie promieniowania maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości między komórkami. Powoduje to konieczność zbudowania oraz utrzymywania sąsiedztwa według relacji wzajemnej widoczności każdej pary komórek, co jest problemem trudnym obliczeniowo. Taka naiwna implementacja nie uwzględniałaby także obliczeń wynikających z różnych kątów padania promieniowania. Z wyżej wymienionych powodów zaniechaliśmy implementacji Radiacji.

Problemy z powstawaniem słupów ognia

Przy próbie symulacji słupów ognia w automacie komórkowym napotkaliśmy wiele wyzwań. W szczególności, dynamika płomienia obejmuje skomplikowane interakcje między gazami, temperaturą i ciśnieniem, które są trudne do modelowania w ramach prostych reguł automatu komórkowego.

Ze względu na te wyzwania, podjęliśmy decyzję o wprowadzeniu uproszczeń. Zamiast próbować symulować cały słupek ognia, skupiliśmy się na modelowaniu palenia się pojedynczych komórek.

Przykłady rzeczywistych pożarów



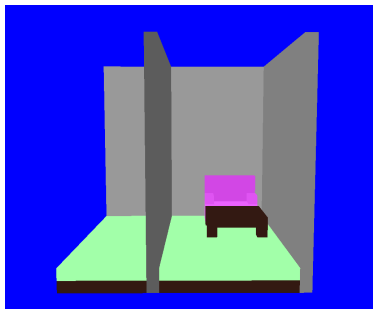
Rysunek: Przykład 1 - pożar drzewka choinkowego



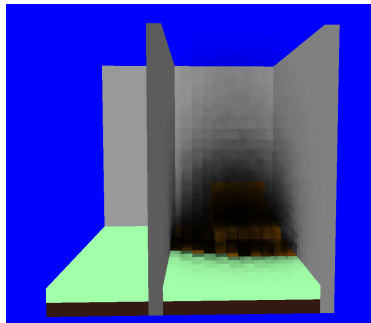
Rysunek: Przykład 2 - pożar kanapy

Na obu powyższych przykładach można zaobserwować zjawiska powstawania słupów ognia oraz radiacji, których nie udało nam się zaimplementować.

Nasza symulacja - dym oraz ogień



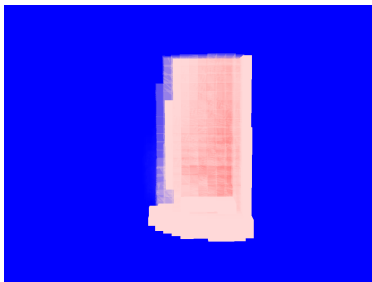
Rysunek: Scena przed pożarem



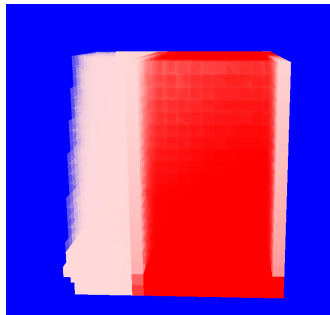
Rysunek: Scena w trakcie pożaru

Można zauważyć rozprzestrzenianie się ognia (pomarańczowe bloki) oraz dymu.

Nasza symulacja - temperatura



Rysunek: Początkowe stadium pożaru



Rysunek: Zaawansowane stadium pożaru

Można zauważyć, że temperatura jest największa w miejscu wybuchu ognia (dolna część kanapy). Ciepło wypełnia pokój i poprzez przewodnictwo dociera do sąsiedniego pokoju.

Nasza próba implementacji tej symulacji pozwoliła nam poznać wyzwania wynikające z takiego zadania. Obliczenia trójwymiarowe są wymagające obliczeniowo, a ich implementacja na karcie graficznej wymaga głębokiego zrozumienia OpenGL. Mimo intensywnych starań nie udało nam się w pełni przenieść wszystkich niezbędnych obliczeń na GPU, co przekładało się na problemy z wydajnością. Byliśmy zmuszeni dokonać pewnych uproszczeń w naszych mechanikach symulacyjnych, co jest bezpośrednią konsekwencją tych trudności. Nie pomniejsza to jednak wartości doświadczenia, które zdobyliśmy w trakcie tej próby, i stanowi cenne lekcje na przyszłość.

- 1 Wąs, J., Karp, A., Łukasik, S., Pałka, D. (2020). Modeling of Fire Spread Including Different Heat Transfer Mechanisms Using Cellular Automata. In: , et al. Computational Science – ICCS 2020. ICCS 2020. Lecture Notes in Computer Science(), vol 12137. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-50371-0_33
- 2 M. Byari, A. Bernoussi, O. Jellouli, M. Ouardouz, M. Amharref, Multi-scale 3D cellular automata modeling: Application to wildland fire spread, Chaos, Solitons & Fractals, Volume 164, 2022, 112653, ISSN 0960-0779,
<https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112653>
- 3 Brennender Christbaum / Weihnachtsbaum
<https://www.youtube.com/watch?v=YDCwJhCoN9c>
- 4 Living room fires with and without a fire sprinkler (Timecode)
<https://www.youtube.com/watch?v=EehFOUHYaYk>