

**Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie**

---

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki



**PRACA INŻYNIERSKA**

**DOROTA WOJTAŁOW, JACEK ZŁYDACH**

**SYMULACJA ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ DYMU I OGNIA W  
OPARCIU O NIEHOMOGENICZNE AUTOMATY KOMÓRKOWE**

PROMOTOR:  
dr inż. Jarosław Wąs

Kraków 2010

## **OŚWIADCZENIE AUTORA PRACY**

OŚWIADCZAM, ŚWIADOMY ODPOWIEDZIALNOŚCI KARNEJ ZA POŚWIADCZENIE NIEPRAWDY, ŻE NINIEJSZĄ PRACĘ DYPLOMOWĄ WYKONAŁEM OSOBIŚCIE I SAMODZIELNIE, I NIE KORZYSTAŁEM ZE ŹRÓDEŁ INNYCH NIŻ WYMNIENIONE W PRACY.

.....

PODPIS



**DOROTA WOJTAŁOW, JACEK ZŁYDACH**

**SIMULATION OF FIRE AND SMOKE BY USING  
NON-HOMOGENEOUS CELLULAR AUTOMATA**

**SUPERVISOR:**  
**Jarosław Wąs Ph.D**

**Krakow 2010**

Serdecznie dziękujemy ...

## Spis treści

<b>1. Wstęp</b>	6
1.1. Temat pracy	6
1.2. Geneza tematu	6
1.3. Realizacja projektu	6
1.4. Struktura pracy	6
<b>2. Teoria</b>	8
2.1. Czym jest ogień	8
2.2. Propagacja ciepła	9
2.2.1. Przewodnictwo	9
2.2.2. Konwekcja	10
2.2.3. Radiacja	10
2.2.4. Zależność temperatury od dostarczonej energii	12
<b>3. Projekt</b>	13
3.1. Główne założenia	13
3.2. Architektura aplikacji	13
3.2.1. Moduł: Controller	14
3.2.2. Moduł: Scene	14
3.2.3. Model	14
3.3. Moduły	14
3.4. Obiekty	14

# 1. Wstęp

## 1.1. Temat pracy

Tematem pracy jest stworzenie symulacji rozprzestrzeniania się dymu i ognia w oparciu o niehomogeniczne automaty komórkowe. Zakres pracy obejmuje stworzenie symulacji rozchodzenia się dymu i ognia na podstawie automatów komórkowych wraz z jej wizualizacją, a także walidację stworzonego modelu. Celem pracy jest pokazanie możliwości niehomogenicznych automatów komórkowych jako narzędzia umożliwiającego odzwierciedlenie rzeczywistego rozprzestrzeniania się dymu i ognia podczas pożaru.

## 1.2. Geneza tematu

W dobie wszechobecnej urbanizacji i ciągłego budownictwa, wraz ze wzrostem świadomości dotyczącej bezpieczeństwa pożarowego oraz zaangażowania w jego zagwarantowaniu pojawiła się potrzeba możliwości modelowania i obserwacji rozprzestrzeniania się ognia w zamkniętych budynkach. Wspomniane symulacje pożarów wykazują szereg zastosowań. Są z powodzeniem wykorzystywane w śledztwach. Dają możliwość odtworzenia przebiegu zdarzeń i porównania z wynikami oględzin. Umożliwiają zbadanie prototypu budynku pod kątem gwarancji bezpieczeństwa pożarowego. Ułatwiają projektowanie systemów oddymiania. W połączeniu z modelami ewakuacji ludzi stanowią kompleksowy system ułatwiający tworzenie bezpiecznych budowli.

W ostatnich latach powstał szereg programów umożliwiających wizualizację symulacji rozchodzenia ognia. Opracowane dotychczas rozwiązania swoje działanie opierają na metodach numerycznej dynamiki płynów (ang. Computational Fluid Dynamics). Niewątpliwą zaletą numerycznego podejścia jest dokładność wyników. Głównymi wadami jest złożoność obliczeń i stopień komplikacji modelu. Niehomogeniczne automaty komórkowe umożliwiają znaczne uproszczenie modelu. Uproszczenie modelu powoduje z kolei redukcję złożoności obliczeń czyniąc automaty komórkowe szczególnie dogodną metodą w przypadku tworzenia prototypów oraz symulacji czasu rzeczywistego.

## 1.3. Realizacja projektu

Praca została zrealizowana jako wolnostojąca aplikacja komputerowa napisana w języku Java. Do renderowania grafiki trójwymiarowej została użyta biblioteka graficzna Java3D. Aplikacja została przetestowana z wykorzystaniem biblioteki JUnit4.

## 1.4. Struktura pracy

Praca składa się z [ilusi] rozdziałów. W pierwszym rozdziale znajdują się podstawy teoretyczne, związane zarówno z modelowanymi zjawiskami fizycznymi jak i użytym algorytmem. Rozdział Modele symulacji zawiera propozycje zweryfikowanych modeli rozprzestrzeniania się dymu i ognia zaprojektowanych w oparciu o niehomogeniczne automaty komórkowe. Rozdział Implementacja przedstawia

sposób realizacji projektu, napotkane problemy oraz ich rozwiązania. Opisuje możliwości graficznego interfejsu użytkownika oraz sposób korzystania z niego.

## 2. Teoria

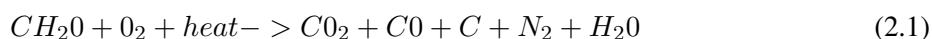
Kluczowym elementem, niezbędnym do prawidłowego zamodelowania pożaru jest zrozumienie czym jest ogień oraz poznanie zjawisk jakim podlega. Niniejszy rozdział zawiera krótki wstęp teoretyczny, przedstawiający zjawiska fizyczne niezbędne do zrozumienia istoty pożaru i prawidłowego jego zamodelowania.

### 2.1. Czym jest ogień

Ogień nie jest substancją. Ogień powstaje jako produkt reakcji chemicznej zachodzącej między paliwem i tlenem. Obserwowalną postać ognia, czyli to co widzimy i nazywamy ogniem tworzy światło powstałe w wyniku ruchu rozgrzanego powietrza. Jest to jednak tylko jeden z aspektów tego złożonego procesu. Elementami koniecznymi do powstania i podtrzymania ognia są:

- tlen
- paliwo
- ciepło

Paliwem może być ciecz, ciało stałe lub gaz. Samo w sobie paliwo nie ulega spalaniu. Paliwo pod wpływem ciepła pochodzącego np. z zapalki lub otrzymanego od innego nagrzanego ciała ogrzewa się. Po osiągnięciu odpowiedniej temperatury, paliwo ulega procesowi dekompozycji. Jednym z produktów dekompozycji są opary. W przypadku jednego z najbardziej popularnych paliw - drewna oprócz oparów w wyniku dekompozycji otrzymujemy węgiel i popiół. Spalanie drewna przedstawia poniższa reakcja 2.1:



Kiedy opary osiągną odpowiednią temperaturę tzw. temperaturę zapłonu (w przypadku drewna wynosi ona ok.  $300^{\circ}C$ ) oraz gdy ich stężenie w powietrzu jest odpowiednie może dojść do zapłonu. Do zapłonu dochodzi w wyniku kontaktu z otwartym ogniem, iskrą lub w wyniku osiągnięcia przez opary temperatury tzn. samozapłonu. Wynikiem zapłonu jest spalanie oparów. Jak widać głównym substratem reakcji spalania są opary powstające w wyniku ogrzania paliwa. W przypadku niektórych paliw jest to jedyny reagent. Jednym z przykładów jest benzyna, która w wyniku ogrzania w całości zamienia się w opary ulegające spalaniu. W przypadku drewna, poza oparami spalaniu ulega także węgiel. Jest to jednak reakcja bardzo powolna. Na szczególną uwagę zasługuje fakt wytwarzania energii cieplnej w procesie spalania, co powoduje samoistne podtrzymanie ognia. Płomień będący wizualną postacią spalania ogrzewa sąsiadujące cząsteczki paliwa, dzięki czemu nie gaśnie.

Bardzo istotnym reagentem w procesie spalania jest tlen. Atomy gazów, oparów powstałych w wyniku podgrzania paliwa w wyniku zapłonu łączą się z tlenem. Aby mogło dojść do reakcji spalania bardzo ważne jest zachowanie odpowiednich proporcji między substratami reakcji. Lower Explosive Limit (LEL) określa minimalne stężenie oparów w powietrzu, konieczne aby mogło dojść do zapłonu. Odpowiednio, Upper Explosive Limit (UEL) oznacza maksymalne stężenie oparów, powyżej którego nie dojdzie do zapłonu. Przykładowo: dla tlenku węgla  $LEL = 12$ , natomiast  $UEL = 75$ , co oznacza w powietrzu musi być między 12% – 75% aby mogło dojść do jego zapalenia.  $LEL$  oraz  $UEL$  określają



także pośrednio wymaganą ilość tlenu. Dla większości paliw ilość tlenu wymaganego do zapłnu wynosi ok. 15%.

## 2.2. Propagacja ciepła

Jak zostało wspomniane w rozdziale ?? jednym z czynników niezbędnych do podtrzymania ognia jest ciepło. Ciepło podczas pożaru jest propagowane na trzy różne sposoby:

- Przewodnictwo
- Konwekcja
- Radiacja

### 2.2.1. Przewodnictwo

Przewodnictwo cieplne jest procesem, który polega na wymianie ciepła pomiędzy nierównomiernie ogrzаныmi ciałami będącymi w kontakcie. Zachodzi ono we wszystkich stanach skupienia: ciałach stałych, cieczach i gazach, jednak sposób i skala tego zjawiska jest bardzo zróżnicowana. Najczęściej mówimy o przewodnictwie w ciałach stałych. W cieczach i gazach występuje ono niezmiernie rzadko i polega na zderzeniach cząsteczek podlegających nieorganizowanym, przypadkowym ruchom i ich dyfuzji. W ciałach stałych przenoszenie ciepła odbywa się na dwa sposoby:

- dzięki drganiom atomów
- poprzez ruch elektronów

Celem omawianego przewodnictwa jest osiągnięcie równowagi cieplnej. Podczas przewodnictwa ciepło jest zawsze przenoszone od ciała o większej temperaturze do ciała o niższej. Zgodnie z zasadą zachowania energii, głoszącą że w układzie izolowanym suma wszystkich energii jest stała, ilość energii uzyskanej przez ciało chłodniejsze jest równa ilości energii oddanej przez cieplejszy obiekt. Energia przenoszona jest wraz z ruchem cząsteczek wewnętrznych. Nie wszystkie ciała przewodzą ciepło w takim samym sposób. Zależność między ilością ciepła przewodzonego przez ciało, a jego zmianą temperatury najlepiej opisuje prawo Fouriera. Przyjmuje ono następującą postać:

$$q(r, t) = -k * gradT \quad (2.2)$$

gdzie:  $k$  - współczynnik przewodzenia ciepła [ $W/(m * K)$ ]  $T$  - temperatura [ $K$ ]  $q$  - natężenie strumienia ciepła [ $W/(m^2)$ ] Prawo Fouriera oznacza, że gęstość strumienia ciepła przekazywana w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię jest proporcjonalna do gradientu temperatury. Minus we wzorze wynika ze wspomnianego wyżej kierunku przepływu ciepła: od ciała cieplejszego do zimniejszego. Strumień ciepła jest mierzony w kierunku zgodnym z jego przepływem, zatem przyrost temperatury będzie miał wartość ujemną.

Do dobrych przewodników należą przede wszystkim:

- metale - do najlepszych należą srebro, miedź, złoto, aluminium

Źle przewodzą ciepło:

- drewno
- papier
- ciecze
- gazy

Materiał	Temp. [C]	Wspł. przewodnictwa [ $W/(m * K)$ ]
Beton	20	0.84-1.3
Drewno	-	0.1-0.17
Szkło crown	20	0.22-0.29
Azbest	20	0.16-0.37
Guma wulkanizowana	20	0.22-0.29
Miedź	20	400
Stal	20	10
Ołów	20	30
Powietrze	20	0.025

Tablica 2.1: Współczynniki przewodnictwa materiałów

Zła przewodność cieczy i gazów wynika z istoty procesu przewodnictwa w tych stanach skupienia. Za wysoką wartość współczynnika przewodnictwa odpowiada ruch elektronów. Dlatego też, we wszystkich dielektrykach wartość ta przyjmuje wartości z przedziału  $[0,001 - 3][W/(m * K)]$ , podczas gdy w metalach może sięgać ona nawet  $400[W/(m * K)]$ .

Na uwagę zasługuje też fakt, że przewodność metali maleje wraz ze wzrostem ich temperatury. Tabela 2.1 zawiera współczynniki przewodnictwa przykładowych materiałów, które zostały wykorzystane przy testowaniu algorytmu symulacji.

### 2.2.2. Konwekcja

Konwekcja, zwana też unoszeniem lub wnikanem jest to zgodnie ze szkolną definicją sposób przewodnictwa ciepła polegający na "unoszeniu prąbranej energii cieplnej przez cząsteczki substancji i dzięki swojej wędrówce przekazywaniu energii innym cząsteczkom". Jak się znajdzie jakaś inna przystępna definicja to podmienić Konwekcja zachodzi we wszystkich płynach, czyli zarówno ciecach jak i gazach. Nie zachodzi natomiast w ciałach stałych. Konwekcja ze względu na połączenie w sobie dwóch zjawisk:

- przekazywania ciepła
- ruchu płynów

jest zjawiskiem niezwykle skomplikowanym do teoretycznego ujęcia. Przenoszenie ciepła w konwekcji zachodzi wskutek ruchu płynu, tak więc warunkiem niezbędnym do wystąpienia zjawiska konwekcji jest ruch ośrodka. Można wyróżnić dwa podstawowe typy konwekcji, dzielące zjawisko wnikania ze względu na przyczynę ruchu ośrodka:

- konwekcja naturalna - w tym przypadku ruch płynu wywołany jest różnicami gęstości substancji znajdujących się w polu grawitacyjnym
- konwekcja wymuszona - ruch płynu spowodowany jest działaniem urządzeń zewnętrznych (wentylatorów, pomp)

Przykładem konwekcji naturalnej jest unoszenie ciepłego powietrza w pomieszczeniu. Ogrzane powietrze zmniejsza swoją gęstość, w wyniku czego unosi się do góry. Jego miejsce wypełnia zimne powietrze, które w kolejnym etapie ulega ogrzaniu rozpoczynając kolejny cykl wędrówki powietrza. Ruchy powietrza wywołane zjawiskiem konwekcji tworzą tzw. prądy konwekcyjne. Konwekcja naturalna jest typem konwekcji występującym podczas pożaru.

### 2.2.3. Radiacja

Radiacja, czyli inaczej promieniowanie jest to sposób rozchodzenia ciepła w postaci fal elektromagnetycznych. Najważniejszym aspektem przewodnictwa ciepła przez promieniowanie jest możliwość

wymiany ciepła między ciałami nie stykającymi się. W bardzo niskich temperaturach ilość przekazywanego przy pomocy radiacji ciepła jest tak mała, że zjawisko to może być pomijane. Wzrost znaczenia promieniowania następuje wraz ze wzrostem temperatury ciał wymieniających ciepło. Przyjmuje się, że radiacja zachodzi dla ciał o temperaturach wyższych od 0° Kelvin. Promieniowanie jest rodzajem wymiany energii, która nie wymaga żadnego nośnika. Każde ciało emituje fale. W normalnych warunkach większość promieniowania zachodzi przy udziale fal podczerwonych. Należy jednak pamiętać że w radiacji mogą brać udział także fale świetlne czy ultrafioletowe. Poza emisją promieniowania każde ciało reaguje także na fale wysyłane przez innych. Dla każdego ciała jesteśmy w stanie określić wartości trzech współczynników opisujących reakcję ciała na wiązkę promieniowania. Należą do nich:

- Absorpcyjność czyli pochłanianiałość
- Refleksyjność czyli odbijalność
- Przepuszczalność

Radiacja następuje we wszystkich kierunkach aż do momentu zablokowania drogi promieni przez ciało pochłaniające je. Większość ciał stałych o rozmiarach większych od kilku mikrometrów nie przepuszcza promieniowania. Na wspomnianej głębokości pod powierzchnią ciała następuje całkowita absorpcja promieniowania cieplnego. Ponadto ciała stałe mogą przepuszczać fale tylko o określonej długości. Przykładem jest szkło, które przepuszcza jedynie fale świetlne. Ilość promieniowania emitowanego przez ciało szare można obliczyć ze wzoru 2.3

$$\dot{Q}_{emit} = \sigma * \varepsilon * A_s * T_s^4 \quad (2.3)$$

gdzie

- $\varepsilon \in (0, 1)$  - emisyjność powierzchni.  $\varepsilon = 1$  - dla ciała doskonale czarnego. Określa jak bardzo dane ciało jest podobne do ciała doskonale czarnego.
- $\sigma = 5.67 * 10^{-8} [W/(m^2 * K^4)]$  - stała promieniowania
- $A_s [m^2]$  - powierzchnia
- $T_s [K]$  - temperatura

Przeanalizujmy przykład promieniowania między rzeczywistymi obiektami znajdującymi się w pewnym pomieszczeniu np. stół w pokoju. W przypadku jednej powierzchni zamkniętej w innej (w omawianym przypadku wewnętrzną powierzchnią będzie powierzchnia stołu, natomiast zewnętrzną ściany pokoju) zakłada się, że wewnętrzna powierzchnia nie opromienia siebie. Innymi słowy całe promieniowanie ciała wewnętrznego przechodzi do powierzchni zewnętrznej. W drugim kierunku następuje tylko częściowe przejście energii z ciała zewnętrznego do wewnątrz. Ponadto, w przypadku gdy otaczająca powierzchnia jest znacząco większa od powierzchni wewnętrznej i obie powierzchnie są oddzielone gazem, który nie promieniuje (powietrze) zjawisko promieniowania zachodzi równolegle ze zjawiskiem konwekcji i oba te zjawiska należy wziąć pod uwagę równocześnie. W takim przypadku wymianę ciepła można określić za pomocą wzoru 2.4

$$\dot{Q}_{cak} = c_{ak} * \sigma * A_s * (T_s^4 - T_{inf}^4) \quad (2.4)$$

gdzie:

- $c_{ak}$  — *całkowity współczynnik wymiany ciepła*  $T_{inf}$  — *temperatura powietrza w znacznej odległości* Omówione powyżej procesy podowują, że promieniowanie jest zjawiskiem szczególnie skomplikowanym.

### 2.2.4. Zależność temperatury od dostarczonej energii

Opisane w podrozdziałach 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 metody obrazują różne sposoby przekazywania energii między cząsteczkami materii. Po ich poznaniu należy zadać sobie pytanie w jaki sposób ta energia wpływa na temperaturę substancji? Wielkością reprezentującą zależność między dostarczoną energią a temperaturą substancji jest ciepło właściwe. Ciepło właściwe jest wielkością charakterystyczną dla materiału i informuje ono o tym ile ciepła należy dostarczyć aby ogrzać 1kg substancji o  $1^{\circ}C$ . Opisaną powyżej zależność przedstawia wzór 2.5

$$c = Q / (m * \Delta T) \quad (2.5)$$

gdzie:

- $c$  - ciepło właściwe [ $J/(kg * K)$ ]
- $m$  - masa ciała [ $kg$ ]
- $T$  - temperatura [ $K$ ]

Znając ilość ciepła dostarczonego do ciała w wyniku procesów przekazywania energii oraz dokonując przekształcenia powyższego wzoru można w bardzo prosty sposób policzyć zmianę temperatury badanego ciała.

## 3. Projekt

Głównym celem projektu jest stworzenie i weryfikacja modelu rozprzestrzeniania się ognia wykorzystując niehomogeniczne automaty komórkowe. Nacisk z pracy został położony na opracowanie algorytmu najdokładniej oddającego rzeczywistość. Aplikacja, nazwa Sparkle została zaprojektowana tak, aby zapewnić użytkownikowi wysoką ergonomię pracy i łatwość nauki. Podczas projektowania i implementacji szczególna uwaga została poświęcona dalszym możliwościom rozbudowy programu.

### 3.1. Główne założenia

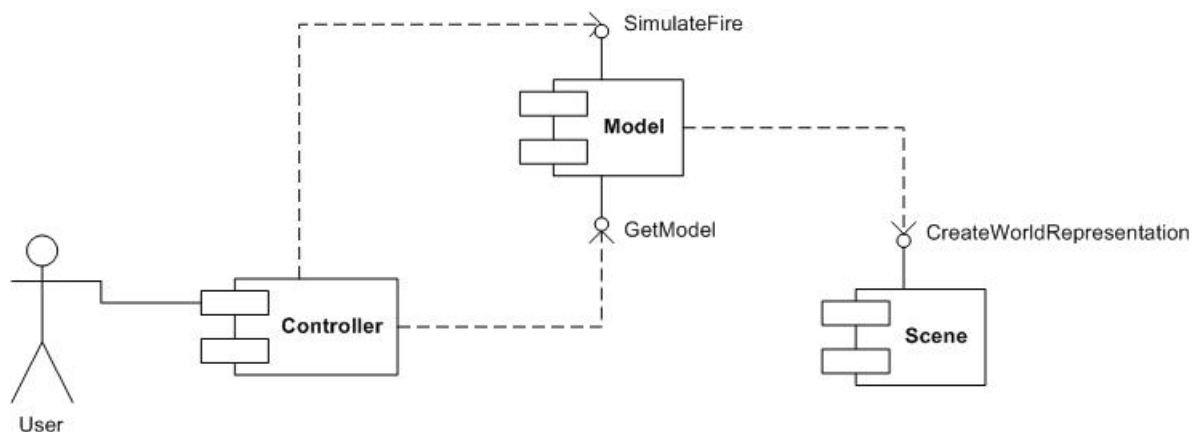
- Projekt obejmuje zarówno stworzenie modelu rozprzestrzeniania pożaru jak i uproszczonej wizualizacji oraz graficznego interfejsu użytkownika (GUI).
- Interfejs aplikacji powinien umożliwiać edycję budynku w którym przeprowadzana jest symulacja: dodawanie elementów konstrukcji, określanie materiałów z których zostały stworzone.
- Użytkownik powinien mieć możliwość określenia źródła ognia: zarówno jego miejsca jak i temperatury początkowej.
- Aplikacja powinna umożliwiać także kontrolę nad symulacją: możliwość zatrzymania symulacji, wznowienia, rozpoczęcia od początku, a także dostosowanie tempa symulacji umożliwiającego obserwację zjawisk fizycznych.
- Dodatkowym elementem jest zapis wyników w postaci rozkładu temperatury do pliku, umożliwiający dogłębną analizę rezultatów.
- Wizualizacja powinna obejmować zarówno rozkład temperaturowy jak i rozprzestrzenianie się dymu.

### 3.2. Architektura aplikacji

Aplikacja została podzielona na trzy główne moduły:

- Controller - odpowiada za interakcję z użytkownikiem, dostarcza GUI umożliwiające kontrolę symulacji
- Model - przechowuje model symulacji, realizuje algorytmy rozprzestrzeniania ognia
- Scene - odpowiada za wizualizację wyników

Zależności pomiędzy poszczególnymi komponentami przedstawia diagram komponentów 3.1. Zapewnienie bardzo prostych zależności między modułami pozwala niezależnie rozwijać kolejne części aplikacji, w łatwy sposób podmieniać i modyfikować ich zachowanie. Inną zaletą zastosowanego modelu jest łatwość testowania poszczególnych części aplikacji niezależnie.



Rysunek 3.1: Architektura aplikacji

Przedstawiony model powstał na bazie jednego z najpopularniejszych modeli tworzenia aplikacji wykorzystujących graficzny interfejs użytkownika: Model-View-Controller. Elementem różniącym przedstawiony powyżej model od tradycyjnej architektury Model-View-Controller jest rozdzielenie elementów GUI pomiędzy dwa moduły:

- Scene przedstawiającą wyniki aplikacji oraz
- Controller posiadający zestaw narzędzi dostarczających kontrolę użytkownikowi.

Dodatkowo w module Controller zostały połączone elementy widoku wraz z obsługującymi je listenerami.

### 3.2.1. Moduł: Controller

Moduł kontroler odpowiada za komunikację między użytkownikiem a silnikiem aplikacji. Jego podstawowym zadaniem jest dostarczenie łatwego w obsłudze, graficznego interfejsu użytkownika, oraz obsługi akcji użytkownika. Wspomniana obsługa akcji może obejmować zarówno zebranie danych ich przetworzenie i dostarczenie do modelu, pobranie z modelu danych jak i zapis lub kontrolę symulacji. Funkcjonalności dostarczane przez moduł Controller przedstawia diagram 3.2

### 3.2.2. Moduł: Scene

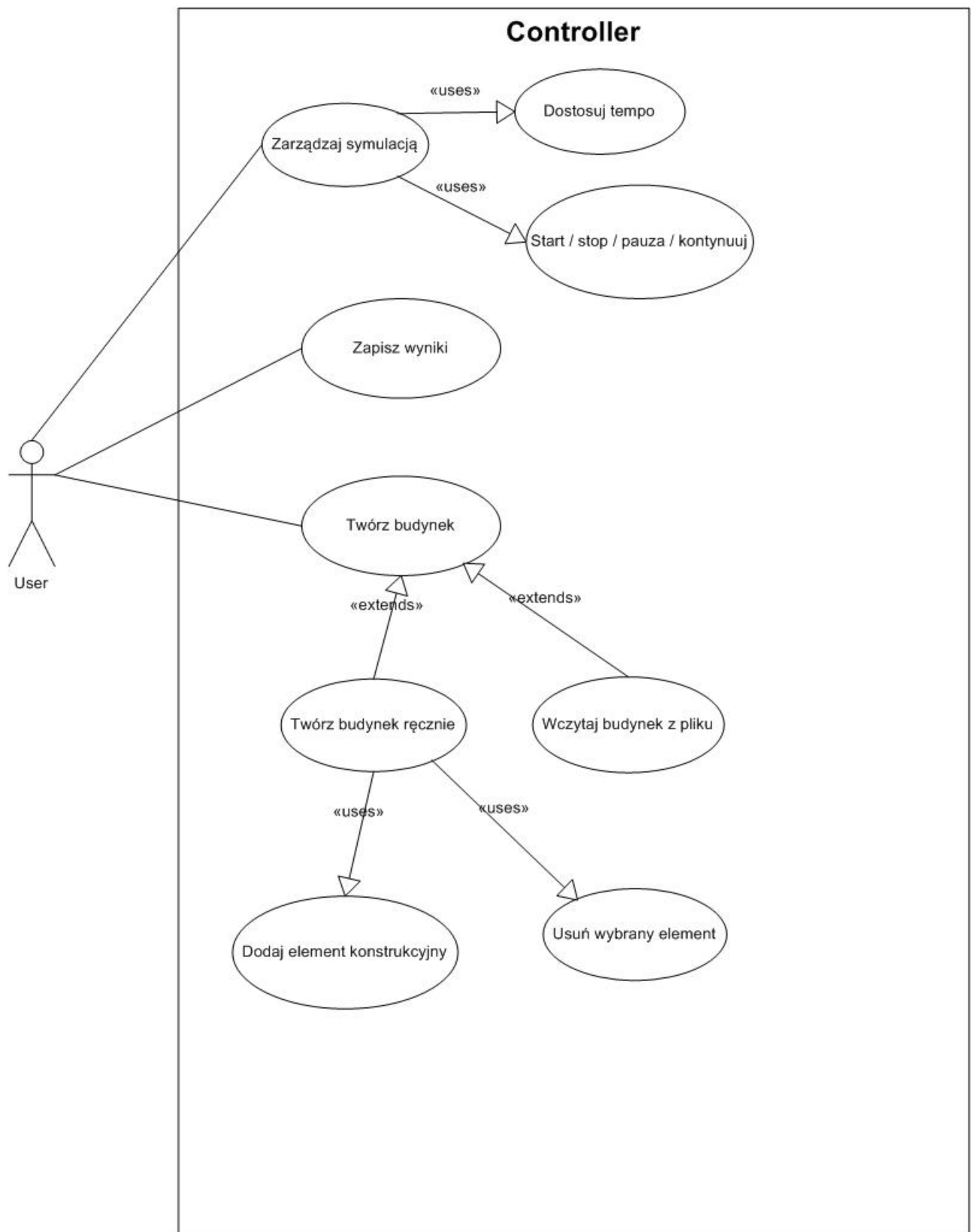
Jedynym zadaniem sceny jest graficzne przedstawienie dostarczonego modelu. Całkowite uniezależnienie widoku od innych modułów umożliwia późniejszą jego modyfikację.

### 3.2.3. Model

Został zastosowany przypadek aktywnego modelu, który potrafi zmieniać swój stan nie tylko w wyniku akcji użytkownika ale także samoczynnie. Aktywność modelu w przypadku symulacji polega na automatycznym uaktualnianiu swojego stanu co pewien, określony okres czasu, a także powiadamianie widoku o zachodzących zmianach.

## 3.3. Moduły

## 3.4. Obiekty



Rysunek 3.2: Przypadki użycia

## **Bibliografia**