

Politechnika Wrocławska
Wydział Informatyki i Telekomunikacji

Kierunek: Informatyka Algorytmiczna (INA)

PRACA DYPLOMOWA
MAGISTERSKA

Zastosowanie modelowania agentowego do
symulacji rynku

Agata Cieřlik

Opiekun pracy
dr inř. Jakub Lemiesz

słowa kluczowe: modelowanie agentowe

WROCLAW 2024

Wstep

Spis treści

1 Rynek jako przedmiot symulacji	5
1.1 Zasady obrotu na giełdzie papierów wartościowych	5
1.1.1 Realizacja transakcji	7
1.2 Stylizowane fakty	10
2 Konstrukcja modelu agentowego	13
2.1 Odwzorowanie instytucji	14
2.1.1 Komunikacja i język	14
2.1.2 Reguły sprzedaży i kupna	18
2.1.3 Aktywność agentów	20
2.2 Agenci	23
2.2.1 Agenci typu <i>Heuristic Belief Learning</i>	25
2.2.2 Agenci typu <i>Zero Intelligence Plus</i>	26
3 Model referencyjny	28
3.1 Rozwiązania techniczne	28
3.1.1 Chronologia zdarzeń	28
3.1.2 Wyrocznia	28
3.1.3 Implementacja	28
3.2 Konfiguracja referencyjna	29
4 Modelowanie przewagi informacji	30
4.1 InformedAgent	30
4.2 FollowerAgent	30

5	Analiza wpływu przewagi informacji (tytuł roboczy)	31
5.1	Plan symulacji	31
5.2	Analiza wyników	31

Rozdział 1

Rynek jako przedmiot symulacji

Ideą modelu agentowego jest obserwacja, w jaki sposób interakcje między graczami (członkami populacji) przyczyniają się do ukształtowania pewnych konwencji i tendencji w danym środowisku [13]. W kontekście, ogólnie rozumianego, rynku naturalnym zastosowaniem tego podejścia jest badanie, w jaki sposób indywidualne cele graczy (inwestorów) wpływają na kształtowanie się ceny obiektu handlu. By przybliżyć możliwe motywacje i decyzje graczy budowę modelu agentowego poprzedzimy sprecyzowanym opisem badanego rynku i obowiązujących na nim reguł.

Badanym przez nas obiektem jest rynek realizujący transakcje kupna i sprzedaży w oparciu o arkusz zleceń z limitem ceny (ang *limit order book*; LOB), który jest aktualnie dominującym systemem obrotu w sektorze kapitałowym i walutowym [9]. W szczególności jest to system stosowany na giełdach papierów wartościowych, które traktujemy jako główny punkt odniesienia przy konstrukcji modelu.

1.1 Zasady obrotu na giełdzie papierów wartościowych

Giełda papierów wartościowych zapewnia możliwość obrotu instrumentem finansowym (akcją) w postaci ciągłej obustronnej aukcji (ang. *continuous double auction*, CDA)[17], tzn. przez cały czas trwania sesji giełdowej (aukcji) można składać równolegle oferty kupna i sprzedaży, które są realizowane na bieżąco. Narzędziem składania ofert kupna i sprzedaży na giełdzie są zlecenia[9]:

Definicja 1.1.1. Zlecenie sprzedaży (ASK) $x = (p_x, \omega_x, t_x)$ złożone w czasie t_x jest zobowiązaniem sprzedaży $\omega_x > 0$ jednostek aktywa po cenie co najmniej p_x .

Definicja 1.1.2. Zlecenie kupna (BID) $x = (p_x, -\omega_x, t_x)$ złożone w czasie t_x jest zobowiązaniem kupna $\omega_x > 0$ jednostek aktywa po cenie co najwyżej p_x .

W momencie złożenia zlecenia giełda w pierwszej kolejności próbuje dopasować je do aktywnych (aktualnych) przeciwnych zleceń. Jeśli nie jest to możliwe, zlecenie jest umieszczane w arkuszu zleceń:

Definicja 1.1.3. Arkuszem zleceń $\mathcal{L}(t)$ nazywamy zbiór wszystkich aktywnych zleceń w chwili t .

Zwyczajowo arkusz zleceń $\mathcal{L}(t)$ przedstawia się w formie dwóch kolejek priorytetowych, ze zleceniami uszeregowanymi według korzystności ceny:

- $\mathcal{A}(t)$ - kolejki aktywnych zleceń sprzedaży, posortowanej po cenie rosnąco,
- $\mathcal{B}(t)$ - kolejki aktywnych zleceń kupna, posortowanej po cenie malejąco.

Oferty kupna (BID)		Oferty sprzedaży (ASK)	
wolumen	cena	wolumen	cena
10	99,5	8	100
5	98,75	6	100,5
5	98,5	3	101
4	98	2	110

Rysunek 1.1: Przykładowy fragment arkusza zleceń

Arkusz zleceń jest podstawowym źródłem informacji o bieżącym stanie rynku. Przede wszystkim wyznaczamy na jego podstawie dwa kluczowe wskaźniki obserwowane przez graczy - cenę sprzedaży oraz cenę kupna:

Definicja 1.1.4. Cena kupna (*ask price*) w chwili t to najniższa cena spośród cen aktywnych zleceń sprzedaży:

$$a(t) := \min_{x \in \mathcal{A}(t)} p_x.$$

Definicja 1.1.5. *Cena sprzedaży* (*bid price*) w chwili t to najwyższa cena spośród cen aktywnych zleceń kupna:

$$b(t) := \max_{x \in \mathcal{B}(t)} p_x.$$

Innymi słowy: aktualna cena kupna $a(t)$ to najlepsza cena po jakiej można zrealizować transakcję kupna w chwili t (aktualnie najniższa cena, po której sprzedający są gotowi sprzedać posiadane jednostki instrumentu), analogicznie $b(t)$ to najlepsza cena po jakiej można zrealizować transakcję sprzedaży w chwili t .

1.1.1 Realizacja transakcji

Giełda dysponuje publiczną procedurą dopasowywania zleceń (ang. *trade-matching algorithm*, *order matching system*), która określa w jaki sposób paruje się zlecenia kupna ze zleceniami sprzedaży doprowadzając do realizacji transakcji. Najpowszechniejszymi systemami dopasowywania zleceń są dwa podejścia:

- *First-in-First-out* - procedura dopasowująca nowo złożone zlecenia do istniejących w kolejności zależnej od korzystności ceny,
- *Pro-Rata* - procedura rozbijająca kwotę nowo złożonego zlecenia proporcjonalnie między wszystkie istniejące zlecenia o cenie mieszczącej się w limicie ceny.

W tej pracy rozważamy jedynie rynki korzystające ze standardowego wariantu *First-in-First-out*, jego działanie w szczegółach przedstawia algorytm 1.1.

Algorytm 1.1: *First-in-First-out Matching*

Data: $x := (p_x, \omega_x, t)$

```

1  if  $\omega_x > 0$ ;                                //  $x$  jest zleceniem sprzedaży
2  then
3      while  $(p_x \leq b(t)) \wedge (\omega_x > 0)$  do
4           $(b(t), \omega_b(t)) \leftarrow \mathcal{B}(t).pull()$ ;           // najlepsza oferta kupna
5          if  $\omega_x < \omega_b(t)$  then
6              transactionRealized( $b(t), \omega_x, t$ );
7               $\mathcal{B}(t).insert((b(t), \omega_b(t) - \omega_x))$ ;
8          else
9              if  $\omega_x \geq \omega_b(t)$  then
10                 transactionRealized( $b(t), \omega_b(t), t$ );
11                  $\omega_x \leftarrow \omega_x - \omega_b(t)$ ;
12 if  $\omega_x > 0$  then
13      $\mathcal{A}(t).insert((p_x, \omega_x))$ ;           // partial fill
14 else
15     if  $\omega_x < 0$ ;                                //  $x$  jest zleceniem kupna
16     then
17         while  $(p_x \geq a(t)) \wedge (\omega_x < 0)$  do
18              $(a(t), \omega_a(t)) \leftarrow \mathcal{A}(t).pull()$ ;           // najlepsza oferta sprzedaży
19             if  $\omega_x > \omega_a(t)$  then
20                 transactionRealized( $a(t), \omega_x, t$ );
21                  $\mathcal{A}(t).insert((a(t), \omega_a(t) - \omega_x))$ ;
22             else
23                 if  $\omega_x \leq \omega_a(t)$  then
24                     transactionRealized( $a(t), \omega_a(t), t$ );
25                      $\omega_x \leftarrow \omega_x - \omega_a(t)$ ;
26 if  $\omega_x < 0$  then
27      $\mathcal{B}(t).insert((p_x, \omega_x))$ ;           // partial fill

```

Zgodnie z systemem *First-in-First-out* po złożeniu zlecenia (przy założeniu, że spełnia kryteria formalne narzucone przez giełdę) w chwili t możliwe są trzy scenariusze:

- *filled* - zlecenie zostało zrealizowane w całości,
- *partial fill* - część zlecenia została zrealizowana (rys. 1.2),
- *unfilled* - zlecenie nie zostało zrealizowane, w całości zostało dodane do arkusza zleceń $\mathcal{L}(t)$.

Oferty kupna (BID)		Oferty sprzedaży (ASK)	
wolumen	cena	wolumen	cena
10	99,5	8	100
5	98,75	6	100,5
5	98,5	3	101
4	98	2	110

⇓

Oferty kupna (BID)		Oferty sprzedaży (ASK)	
wolumen	cena	wolumen	cena
2	100	6	100,5
10	99,5	3	101
5	98,75	2	110
5	98,5		
4	98		

Rysunek 1.2: Realizacja zlecenia kupna 10 sztuk z limitem ceny (ceną maksymalną) wysokości 100: kupowana jest liczba sztuk mieszcząca się w limicie ceny, reszta zlecenia dodawana jest jako nowe zlecenie oczekujące do książki zleceń.

Zauważmy, że w takich warunkach realizacji problem wyznaczenia maksymalnej ceny oferty p_x i jej wielkości ω_x nie jest trywialny. Graczom może przysparzać trudności w szczególności czas realizacji zlecenia - zbyt restrykcyjna cena może sprawić, że zlecenie nie zostanie zrealizowane lub zostanie zrealizowane jedynie częściowo w planowanym czasie. Większość współczesnych giełd jako rozwiązanie tego problemu proponuje dodatkowo szczególny rodzaj zlecenia: zlecenie po każdej cenie:

Definicja 1.1.6. Zlecenie po każdej cenie (zlecenie typu *market*) $\tilde{x} = (\omega_x, t_x)$ złożone w chwili t_x to zobowiązanie sprzedaży (kupna) ω_x jednostek po aktualnie najlepszej możliwej cenie.

Zlecenie po każdej cenie jest realizowane zgodnie z procedurą dopasowywania zleceń (analogicznie jak w algorytmie 1.1), z tą różnicą, że nie obowiązuje limit ceny: korzystamy kolejno z istniejących ofert do momentu sprzedaży (kupna) planowanej liczby jednostek. Zlecenia po każdej cenie są traktowane przez giełdę priorytetowo: w przypadku gdy w tym samym czasie zostało złożone klasyczne zlecenie z limitem ceny i zlecenie po każdej cenie, w pierwszej kolejności wykonywane jest zlecenie po każdej cenie. Zatem zlecenie po każdej cenie gwarantuje graczowi możliwie najszybszą realizację jego oferty.

Oferty kupna (BID)		\Rightarrow	Oferty kupna (BID)	
wolumen	cena		wolumen	cena
10	99,5		3	98,5
5	98,75		4	98
5	98,5			
4	98			

Rysunek 1.3: Realizacja zlecenia sprzedaży 17 sztuk po każdej cenie

Zlecenie po każdej cenie wprawdzie niweluje ryzyko niewykonania w planowanym czasie, ale równocześnie też pozbawia gracza kontroli nad ceną zrealizowanych transakcji, dodatkowo często jest obciążone wyższą prowizją za obsługę ze strony brokera lub giełdy. Przede wszystkim zlecenia tego typu mogą być niekorzystne przy realizacji operacji sprzedaży lub kupna dużej liczby jednostek. Dobór ceny oraz wielkości zlecenia oraz ewentualny podział planowanej dużej operacji sprzedaży (kupna) na cząstkowe zlecenia pozostaje szeroko badanym problemem bez jednoznacznego rozwiązania (problem *optimal order execution*).

1.2 Stylizowane fakty

Procesy decyzyjne graczy oraz ich udział w całej populacji uczestników rynku zwykle są trudne do bezpośredniego odtworzenia. W modelowaniu agentowym przyjmu-

jemy liczne uproszczenia i założenia dotyczące przyjmowanych przez nich kryteriów decyzyjnych. Do oceny czy przyjęte założenia, algorytmy oraz proporcje agentów są dobrym przybliżeniem rzeczywistości wykorzystywane są tzw. *stylizowane fakty* - zaobserwowane ogólne prawidłowości w codziennym funkcjonowaniu rynku. Stylizowane fakty są niemożliwe do udowodnienia, natomiast często mają racjonalne uzasadnienie i ze względu na powszechne występowanie na rzeczywistych rynkach przyjmowane są za cechy charakterystyczne rynku.

W tej sekcji przytoczymy wybrane stylizowane fakty dotyczące rozważanego rynku opartego na arkuszu zleceń z limitem ceny, które pozwolą nam nakreślić pełniejszy obraz funkcjonowania rynku oraz posłużą nam do uzasadnienia niektórych rozwiązań w modelu rozważanym w późniejszych rozdziałach. W pierwszej kolejności omówimy stylizowany fakt kluczowy w kontekście modelu prezentowanego w tej pracy:

Fakt 1.2.1. Wrażliwość na wydarzenia makroekonomiczne: wydarzenia makroekonomiczne (np. publikacja rocznych sprawozdań z wyników firmy) wpływają bezpośrednio na cenę, powodując jej gwałtowne spadki i wzrosty [10].

Fakt 1.2.1 jest w pełni uzasadniony w kontekście rozważanych rynków akcji - wartość udziałów jest ściśle zależna od wyceny spółki. W momencie upublicznienia pozytywnej (negatywnej) informacji pojawia się więcej kupujących (sprzedających) oczekujących wzrostu (spadku) wartości udziałów. Zależność ceny od planowanych wydarzeń (publikacji) jest obecna w konstrukcji niektórych modeli ceny (*event-based price models*). Kolejne interesujące nas fakty opisują zbiorczo przeciętne zachowanie uczestników rynku - intensywność ich aktywności oraz wielkość składanych przez nich zleceń:

Fakt 1.2.2. Aktywność graczy w czasie: aktywność uczestników rynku jest największa na początku oraz pod koniec trwania sesji giełdowej. Wolumen (suma wielkości) zrealizowanych transakcji w jednostce czasu ma U-kształtny rozkład w czasie [4].

W opracowaniach empirycznych własności rynków z arkuszami zleceń nie podaje się jednoznacznie przyczyny powszechnego występowania rozkładów U-kształtnych lub J-kształtnych. Odnosnie wzmożonego zainteresowania na początku sesji jedną z

hipotez jest reakcja uczestników rynku na wydarzenia z czasu, gdy rynek był zamknięty. W kontekście wzrostu aktywności pod koniec sesji jako potencjalną przyczynę rozważa się odkładanie przez uczestników rynku planowanych na dany dzień transakcji w oczekiwaniu na korzystniejszą cenę.

Fakt 1.2.3. Czas między złożeniem dwóch zleceń: dla zleceń $x_0 = (p_{x_0}, \omega_{x_0}, t_{x_0})$ i $x_1 = (p_{x_1}, \omega_{x_1}, t_{x_1})$ różnica czasu między momentami ich złożenia $\Delta_t = t_{x_1} - t_{x_0}$ ma w przybliżeniu rozkład wykładniczy $\Delta_t \sim \text{Exp}(\lambda)$, gdzie parametr λ zależy od rynku.

W niektórych opacowaniach występują również przybliżenia rozkładu Δ_t przy pomocy rozkładu Weibulla lub rozkładu lognormalnego [3]. W tej pracy jednak korzystamy wyłącznie z przybliżenia rozkładem wykładniczym, zakładając przy tym że przypływ zleceń możemy reprezentować jako proces Poissona.

Fakt 1.2.4. Rozkład wielkości zleceń: wielkość zlecenia ω jest zmienną losową, ma rozkład typu *power law*, tzn. $P(\omega = \omega_x) = x^{-(1+\mu)}$, gdzie μ może być parametrem zależnym od rynku i typu zlecenia (obserwowano większe wartości μ dla wielkości zleceń po każdej cenie)[4].

Rzadkie występowanie zleceń dużej wielkości podobnie jak większość stylizowanych faktów zwykle nie ma wskazanej jednej przyczyny. W pewnym stopniu przewaga mniejszych zleceń może być uwarunkowana ograniczonym kapitałem większości uczestników rynku. Nie bez znaczenia jest również mechanizm realizacji zleceń opisany w sekcji 1.1.1 - podział planowanej transakcji na mniejsze zlecenia może zapewniać większą kontrolę nad kosztami niż złożenie jednego zlecenia na całą założoną kwotę.

Rozdział 2

Konstrukcja modelu agentowego

Opis metod budowy modelu agentowego rynku podporządkujemy notacji zaczerpniętej z teorii systemów mikroekonomicznych [14] - dziedziny podejmującej próbę usystematyzowania tworzenia syntetycznych rynków. Zgodnie z terminologią wprowadzoną przez tą dziedzinę model agentowy rynku $\mathcal{M}_{\text{LOB}} = (\mathbf{E}, \mathbf{I})$ jest przykładem *systemu mikroekonomicznego* złożonego z dwóch warstw:

- \mathbf{E} - *środowiska*: aktywów podlegających obrotowi oraz listy agentów z ustalonym uposażeniem, wiedzą oraz preferencjami,
- \mathbf{I} - *instytucji*: reguł "rzeczywistości", w której agenci funkcjonują - dopuszczalnej komunikacji między agentami oraz akcji, jakie mogą podjąć agenci.

Powyższy podział jest umotywowany przede wszystkim charakterem cech i informacji zawartych w obu składowych modelu. Elementy instytucji I są publiczne i nie podlegają modyfikacji przez agentów, analogicznie do rzeczywistego prawa, regulacji giełdowych lub też fizycznych ograniczeń. Z kolei środowisko E zawiera w sobie informacje natury prywatnej (zawartość portfela agenta, jego wierzenia i preferencje), które mogą ulegać zmianie pod wpływem decyzji agentów.

Takie rozbieżności elementów jest również zasadne w kontekście projektowania i implementacji modelu - reguły zawarte jako instytucja I zwykle w dużej części można zaplanować jako bezpośrednie odwzorowanie rzeczywistych systemów lub ich uproszczenie, tymczasem sformułowanie w ścisły sposób często nieracjonalnych przekonań i decyzji agentów jest najbardziej nieoczywistym aspektem budowy modelu agentowego.

2.1 Odwzorowanie instytucji

Instytucję I możemy sformalizować jako zbiór praw (precyzyjniej: praw własności, ang. *property rights*) wszystkich agentów uczestniczących w eksperymencie:

Definicja 2.1.1. Instytucja $I = \{I^1, \dots, I^i, \dots, I^N\}$ jest zbiorem praw przysługujących wszystkim agentom modelu. Zbiór praw i . agenta składa się z:

- i. M^i - możliwych wiadomości (akcji), którymi dysponuje agent,
- ii. $h^i(m)$ - funkcji alokacji, rozstrzygającej zmianę stanu posiadania w wyniku wiadomości m ,
- iii. $c^i(m)$ - funkcji kosztu, rozstrzygającej koszty poniesione w skutku wiadomości m ,
- iv. $g^i(t_0, t, T)$ - funkcji determinującej aktywność gracza w zależności od czasu, w szczególności:
 - $g^i(t_0, \dots, \dots)$: reguły startowe (ang. *starting rules*), określające zachowanie agenta w momencie rozpoczęcia aukcji (otwarcia rynku),
 - $g^i(\dots, t, \dots)$: reguły przejścia (ang. *transition rules*), określające zachowanie agenta w trakcie trwania aukcji (sesji giełdowej),
 - $g^i(\dots, \dots, T)$: reguły zatrzymania (ang. *stopping rules*), określające zachowanie agenta w momencie zakończenia aukcji (zamknięcia rynku).

2.1.1 Komunikacja i język

Kluczową składową instytucji jest *język* $M = \bigcup_{i: e_i \in E} M^i$ - zbiór wszystkich możliwych wiadomości, które mogą wysłać agenci modelu. Zgodnie z metodologią budowy mikroekonomicznych modeli agentowych [14] język modelu jest nie tylko narzędziem komunikacji, przede wszystkim wyznacza możliwe akcje agentów. Każde publiczne działanie agenta modelu jest wynikiem jego interakcji z innym agentem (wymiany wiadomości), w przypadku zastosowania do rynku z arkuszem zleceń agent zdecydowany na kupno lub sprzedaż musi dokonać transakcji poprzez interakcję z agentem reprezentującym giełdę.

Dla rynku opartego na arkuszu zleceń definiowanie języka M dla modelu opiera się na bezpośrednim odwzorowaniu rzeczywistych protokołów wiadomości stosowanych przez giełdy, udostępnianych publicznie. W tej pracy korzystamy z języka opartego na protokołach OUCH [2] i ITCH [1]. Oba protokoły zostały opracowane na potrzeby giełdy NASDAQ i stanowią współczesny standard wymiany wiadomości z giełdą. Język M podzielimy na dwa podzbiory $M_O, M_D : M_O \cup M_D = M$, analogicznie do podziału zadań między protokołami OUCH i ITCH:

- M_O - wiadomości odpowiedzialne za obsługę zleceń i transakcji (analogicznie do OUCH),
- M_D - wiadomości odpowiedzialne za obsługę dostarczania danych rynkowych (przez mechanizmy zapytań i subskrypcji, analogicznie do ITCH).

Wewnątrz obu zbiorów wyróżnimy kolejne podzbiory zależne od nadawcy wiadomości:

- $M_O = M_O^T \cup M_O^{EX}$:
 - M_O^T - dyspozycje złożenia zlecenia giełdowego (wysyłane do giełdy przez kupujących lub sprzedających, ang. *traders*),
 - M_O^{EX} - wiadomości informujące o stanie przetworzenia zlecenia, np. całkowitym lub częściowym zrealizowaniu (wysyłane wyłącznie przez agenta - giełdę);
- $M_D = M_D^T \cup M_D^{EX}$:
 - M_D^T - zapytania o wartości konkretnych wskaźników rynkowych lub prośby o subskrypcję danych (wysyłane do giełdy przez zainteresowanych),
 - M_D^{EX} - wiadomości zwracające żądane dane oraz potwierdzenia złożenia lub anulowania subskrypcji (wysyłane przez giełdę).

Zakładamy, że uczestnicy rynku operują na jednej giełdzie i mają równe możliwości handlu i komunikacji z giełdą (dysponują identycznymi zbiorami możliwych wiadomości $M^T = M_O^T \cup M_D^T$).

Wiadomości związane z obsługą zleceń

Każdy agent modelu (poza agentem specjalnym e_0 reprezentującym giełdę) może wykonać następujące akcje na rynku z arkuszem zleceń:

- **złożenie zlecenia:** wysłanie zlecenia kupna lub sprzedaży wybranego typu (zlecenia z limitem ceny lub zlecenia po każdej cenie),
- **anulowanie zlecenia:** wycofanie złożonej oferty kupna lub sprzedaży lub zredukowanie jej wielkości,
- **modyfikacja zlecenia:** przez modyfikację rozumiemy zmianę parametrów zlecenia, która nie wpływa na jego pozycję w arkuszu zleceń (np. zwiększenie ω_x - wielkości oferty),
- **zastąpienie zlecenia:** obejmuje wszystkie możliwe modyfikacje zlecenia, wpływając przy tym na jego pozycję w arkuszu zleceń (np. zmianę ceny).

Wiadomości w języku M modelu będące dyspozycjami powyższych czynności w większości tworzymy poprzez odtworzenie rzeczywistych komunikatów z protokołu OUCH (w tabeli 2.1 przedstawione jest zestawienie wiadomości języka M i ich odpowiedników w protokole). Wprowadzamy przy tym jedno istotne uproszczenie: ograniczamy możliwe typy składanych zleceń do dwóch bazowych (i zarazem najpowszechniej stosowanych) zleceń: zlecenia z limitem ceny (def. 1.1.1, 1.1.2) oraz zlecenia po każdej cenie (def. ??). Dla obu rozważanych typów zleceń zastępujemy rzeczywistą wspólną wiadomość *Enter Order*, w której typ zlecenia jest określany przez bardzo szeroką parametryzację wiadomości, osobnymi wiadomościami dla dwóch typów zleceń rozważanych w modelu (*LimitOrderMsg* i *MarketOrderMsg*). Agent reprezentujący giełdę w odpowiedzi na wiadomości agentów przeprowadza zlecone przez nich operacje: na życzenie nadawcy tworzy, modyfikuje i anuluje zlecenia. Dodatkowo po każdej transakcji z udziałem zlecenia aktualizuje jego stan, realizując całość kwoty zlecenia ω_x lub jego część. Każda z akcji zwieńczona jest wysłaniem komunikatu do agenta, który złożył dane zlecenie. Wiadomości powiązane z obsługą zleceń wysyłane przez agenta giełdy wraz z ich rzeczywistymi odpowiednikami opisane są w tabeli 2.2.

Tabela 2.1: Podstawowe wiadomości związane z obsługą zleceń wysyłane przez agentów-inwestorów

wiadomość	powiązana akcja agenta	odpowiednik w protokole OUCH
<i>LimitOrderMsg</i>	złożenie zlecenia z limitem ceny	<i>Enter Order Message</i> [typ "O"]
<i>MarketOrderMsg</i>	złożenie zlecenia typu <i>market</i> (zlecenia po każdej cenie)	<i>Enter Order</i> [typ "O"]
<i>CancelOrderMsg</i>	anulowanie zlecenia	<i>Cancel Order Request</i> [typ "X"]
<i>PartialCancelOrderMsg</i>	anulowanie części zlecenia	<i>Cancel Order Request</i> [typ "X"]
<i>ModifyOrderMsg</i>	modyfikacja zlecenia	<i>Modify Order Request</i> [typ "M"]
<i>ReplaceOrderMsg</i>	zastąpienie zlecenia nowym	<i>Replace Order Message</i> [typ "U"]

Tabela 2.2: Podstawowe wiadomości związane z obsługą zleceń wysyłane przez giełdę

wiadomość	powiązana akcja giełdy	odpowiednik w protokole OUCH
<i>OrderAcceptedMsg</i>	poprawne utworzenie zlecenia (spełnione zostały wymogi formalne) i umieszczenie w arkuszu zleceń	<i>Order Accepted Message</i> [typ "A"]
<i>OrderExecutedMsg</i>	zrealizowanie całej kwoty lub części zlecenia	<i>Order Executed Message</i> [typ "E"]
<i>OrderCancelledMsg</i>	anulowanie zlecenia i usunięcie z arkusza zleceń	<i>Order Canceled Message</i> [typ "C"]
<i>OrderPartialCancelledMsg</i>	anulowanie części zlecenia	<i>Order Canceled Message</i> [typ "C"]
<i>OrderModifiedMsg</i>	dokonanie modyfikacji zlecenia	<i>Order Modified Message</i> [typ "M"]
<i>OrderReplacedMsg</i>	zastąpienie zlecenia nowym	<i>Order Replaced Message</i> [typ "U"]

Wiadomości związane z obserwacją rynku

Oprócz wiadomości dających agentom możliwość kupna i sprzedaży na giełdzie oraz informujących o przebiegu tych czynności, język M jest również wyposażony w wiadomości M_D regulujące dostęp agentów do danych rynkowych: aktualnego stanu arkusza zleceń, statystyk zrealizowanych dotychczas transakcji (np. łącznej wartości transakcji, liczby transakcji, ceny ostatniej zrealizowanej transakcji). Zebranych danych agent może użyć jako wskaźnika przy podejmowaniu decyzji o kupnie lub sprzedaży albo do wyznaczenia ceny planowanego zlecenia.

Zakładamy, że giełda może udostępnić agentowi dane z użyciem jednego z dwóch mechanizmów: odpowiedzi na zapytanie lub regularnego wysyłania danych w ramach zapisania się agenta do subskrypcji na dane.

W naszym modelu zakładamy, że arkusz zleceń i jego charakterystyki (np. liczba aktywnych zleceń, ich ceny oraz sumaryczna wielkość) są publicznie dostępne dla wszystkich agentów poprzez zapytania i subskrypcje. Nie omówimy wszystkich danych udostępnianych przez giełdę, ograniczając się jedynie do przytoczenia kluczowych charakterystyk, które agenci modelu wykorzystują w procesie decyzyjnym:

- aktualnej ceny kupna $a(t)$ (def.1.1.4),
- aktualnej ceny sprzedaży $b(t)$ (def. 1.1.5),
- zrealizowanych dotychczas transakcji rynkowych (kupna i sprzedaży): $Y(t) = \{y = (p_y, \omega_y, t_y) : t_y \leq t\}$, w szczególności ostatniej zrealizowanej transakcji $y(t)$ ($y(t) : t_{y'} = \max_{t_y : (p_y, \omega_y, t_y) \in Y(t)} t_y$).

Wymianę wiadomości odpowiedzialną za dostarczenie wyżej wymienionych danych przedstawia tabela 2.3.

2.1.2 Reguły sprzedaży i kupna

Przebieg realizacji zleceń, podobnie do wiadomości, jest jednym z elementów, które możemy odwzorować bezpośrednio, zgodnie z mechanizmami opisanymi w sekcji 1.1.1. W oparciu o ustalony sposób przetwarzania działań agentów i zbiór ich możliwych akcji regulowanych opisanym wyżej językiem M możemy sprecyzować wymienione w definicji ?? $h^i(m)$ - funkcję alokacji oraz $c^i(m)$ - funkcję kosztów.

Tabela 2.3: Wybrane wiadomości powiązane z dostarczaniem przez giełdę charakterystyk rynku

wiadomości agenta	wiadomości giełdy	dane
<i>QuerySpreadMsg</i>	<i>QuerySpreadResponseMsg</i>	t - czas wygenerowania wiadomości, $a(t)$ - cena kupna, $b(t)$ - cena sprzedaży, $y(t) = (p_{y'}, \omega_{y'}, t_{y'})$ - ostatnia zrealizowana transakcja
<i>MarketDataSubReqMsg</i>	<i>MarketDataMsg</i>	t - czas wygenerowania wiadomości $y(t) = (p_{y'}, \omega_{y'}, t_{y'})$ - ostatnia zrealizowana transakcja

W bazowym modelu przyjmujemy założenie, że gracze, bez względu na typ wiadomości, nie ponoszą dodatkowych kosztów w związku z jej wysłaniem lub odebraniem. Zatem jedynymi wiadomościami, które będą zmieniały stan własności i majątek agentów będą potwierdzenia kupna lub sprzedaży wysyłane przez giełdę, czyli wiadomości typu *OrderExecutedMsg* (opisane szerzej w sekcji 2.1.1). Poniżej formalizujemy ich zawartość:

Definicja 2.1.2. Potwierdzenie wykonania zlecenia (*OrderExecutedMsg*) $m_Y \in M$ to wiadomość wysyłana bezpośrednio po zrealizowaniu całości lub części kwoty zlecenia kupna (sprzedaży) przez agenta giełdy do nadawcy zlecenia. Zawiera następujące informacje:

- i. t - czas wykonania,
- ii. ω - liczba kupionych (sprzedanych) jednostek,
- iii. p - cena kupna (sprzedaży).

Na podstawie powyższego sformułowania możemy również sprecyzować format funkcji alokacji $h_i(m)$ i funkcji kosztów $c_i(m)$. Ze względu na to, że każdy z agentów (poza agentem-giełdą) ma równe możliwości handlu oraz dysponuje takim samym

zestawem możliwych wiadomości $M^T = M_O^T \cup M_D^T$, działanie funkcji $h^i(m)$ i $c^i(m)$ będzie niezależne od agenta wyboru agenta i ($\forall i \neq 0 : h^i(m) = h(m), c^i = c(m)$, gdzie 0 - indeks agenta-giełdy). Wspólne funkcja alokacji $h(m)$ i funkcja kosztów $c(m)$ są postaci:

$$h(m) = \begin{cases} -\omega, & (m = m_Y) \wedge (\omega > 0) \quad [\text{sprzedaż}] \\ \omega, & (m = m_Y) \wedge (\omega < 0) \quad [\text{kupno}] \\ 0, & m \neq m_Y \quad [\text{inne wiadomości}] \end{cases}$$

$$c(m) = \begin{cases} \omega \cdot p, & (m = m_Y) \wedge (\omega > 0) \quad [\text{sprzedaż}] \\ -\omega \cdot p, & (m = m_Y) \wedge (\omega < 0) \quad [\text{kupno}] \\ 0, & m \neq m_Y \quad [\text{inne wiadomości}] \end{cases}$$

gdzie t, ω, p zgodne z definicją m_Y (def.2.1.2).

Dla agenta-giełdy, który stanowi wyjątek, funkcje alokacji i kosztów nie będą zmieniały stanu własności giełdy: $g^0(m) = h^0(m) \equiv 0$. Przy założeniu braku opłat operacyjnych i prowizji giełda pełni jedynie rolę pośrednika między stronami. Innymi słowy, każdemu potwierdzeniu wykonania zlecenia kupna x_B musi równolegle towarzyszyć potwierdzenie wykonania zlecenia sprzedaży x_S , które zostało przyporządkowane x_B w drodze procedury dopasowywania zleceń (zgodnie z opisem w sekcji 1.1.1).

2.1.3 Aktywność agentów

Ostatni element instytucji I - funkcje aktywności agentów $g^i(t_0, t, T)$, jest najtrudniejszy do zaprojektowania. W przeciwieństwie do funkcji alokacji h^i i funkcji kosztów c^i wymaga indywidualnego sformułowania dla każdego z agentów. Funkcja g^i określa zachowanie gracza (agenta) przy rozpoczęciu, w trakcie trwania oraz przy zakończeniu aukcji (sesji giełdowej), łącząc w sobie równocześnie dwa aspekty: strategię gracza oraz jego fizyczne ograniczenia w kwestii obserwacji rynku i uczestnictwa w aukcji. W pierwszej kolejności rozpatrzmy fizyczne ograniczenia agenta, do tematu strategii wracając w dalszej części rozdziału.

Przez fizyczne ograniczenia gracza (agenta) rozumiemy narzucenie momentów w czasie $\mathcal{T}^i = \{t_0, t_1^i, t_2^i, \dots, T\}$ (tzw. obudzeń, ang. *wakeups*), w których gracz może

podjąć akcję. Wprowadzenie do modelu tego rodzaju ograniczeń wynika z założenia, że niektórzy agenci, naśladując zachowanie rzeczywistych inwestorów, nie są w stanie (lub nie mają potrzeby) obserwować rynku nieprzerwanie przez cały czas trwania sesji. Poniżej omówimy dwie metody wyznaczania zbioru obudzeń \mathcal{T}^i agenta oparte na stylizowanych faktach nt. rynku z arkuszem zleceń, odzwierciedlające różne intencje odnośnie roli agentów.

Momenty aktywności wyznaczone z rozkładu

Jednym z podejść do wyznaczenia momentów aktywności agentów jest skorzystanie z empirycznych rozkładów sumarycznej wielkości złożonych zleceń (lub, alternatywnie, liczby zleceń) w zależności od czasu trwania sesji giełdowej. W tej technice zakładamy, że każdy z agentów wysyła tylko jedno zlecenie w ciągu trwania sesji giełdowej. W kontekście giełdy papierów wartościowych, na której się wzorujemy, to założenie nie stoi w sprzeczności z rzeczywistymi strategiami inwestorów - inwestycje w papiery wartościowe zwykle mają charakter długoterminowy.

Wyznaczając moment obudzenia t^i agenta wykorzystujemy stylizowane fakty na temat aktywności agentów w zależności od czasu (Fakt 1.2.2), tzn. przyjmujemy, że suma wielkości zleceń $X(t) = \sum_{\{x=(p_x, \omega_x, t_x): t_x=t\}} \omega_x$ w czasie t ma rozkład U-kształtny. Na potrzeby tej pracy przyjmujemy rozkład U-kwadratowy (*U-quadratic??*), tj:

$$X(t) \sim f_{U_{t_0, T}}(t),$$

gdzie:

$$f_{U_{t_0, T, \alpha, \beta}}(t) = \alpha(t - \beta)^2, t \in [t_0, T],$$

parametry α, β zależne od przedziału $[t_0, T]$:

$$\alpha = \frac{T + t_0}{2}, \beta = \frac{12}{(T - t_0)^3}.$$

W opracowaniach stylizowanych faktów [3] przeważnie nie określa się konkretnej funkcji gęstości rozkładu sumy wielkości zleceń w czasie $X(t)$, podkreślając jedynie U-kształtność - bimodalność ze zwiększonym prawdopodobieństwem dla warto-

ści skrajnych (wykres ..), jako jego cechę charakterystyczną. Użycie rozkładu U-kwadratowego ma przede wszystkim uzasadnienie praktyczne. W celu wyznaczenia momentu obudzenia agenta t^i generujemy próbę losową z założonego rozkładu $X(t)$. Używając rozkładu U-kwadratowego możemy to zrobić z użyciem funkcji odwrotnej dystrybuanty rozkładu $F_{U_{i0,T}}$ (korzystając z własności $F^{-1}(U) \sim F, U \sim U(0, 1)$ [6]), której wzór jesteśmy w stanie wyznaczyć analitycznie.

Momenty aktywności jako proces Poissona

Alternatywnym podejściem do problemu wyznaczenia momentów aktywności agentów \mathcal{T}^i jest interpretacja napływu zleceń na giełdę jako procesu Poissona. Takie rozwiązanie jest zgodne ze stylizowanymi faktami na temat rozkładu różnicy czasu między złożeniem dwóch zleceń. Zgodnie z faktem 1.2.3 czas między pojawieniem się na rynku dwóch kolejnych zleceń Δ_t ma rozkład wykładniczy $\text{Exp}(\lambda)$, stąd proces zliczający liczbę zleceń w trakcie sesji giełdowej $N(t) = |\{x = (p_x, \omega_x, t_x) : t_x \leq t\}|$ jest procesem Poissona z parametrem częstotliwości zdarzeń równym λ [11].

Parametr częstotliwości zleceń możemy wyznaczyć poprzez oszacowanie oczekiwanej liczby zleceń w jednostce czasu: $E[N(t)] = \frac{1}{\lambda}t$. Przy ustalonym parametrze λ możemy wyznaczyć czasy złożenia kolejnych zleceń, generując wartości Δ_t z rozkładu wykładniczego.

Opisaną powyżej procedurę indywidualizujemy dla każdego agenta, tzn. zakładamy że liczba obudzeń i . gracza $|\mathcal{T}^i|$ w czasie (równoważnie liczba zleceń złożonych przez gracza) jest realizacją procesu Poissona $N^i(t)$ i jest zależna od parametru agenta λ_i . W ten sposób rozwiązujemy problem przyporządkowania kolejnych czasów aktywności różnym agentom, równocześnie wprowadzając możliwość zróżnicowania graczy na mniej i bardziej aktywnych. Warto zauważyć, że uzyskany w efekcie proces zliczający momenty złożenia zleceń dla wszystkich agentów $N'(t) = \sum_{i \in \{1, \dots, m\}} N^i(t)$ również jest procesem Poissona: $N'(t)$ jest sumą m niezależnych procesów Poissona N^1, \dots, N^m parametryzowanych odpowiednio parametrami $\lambda_1, \dots, \lambda_m$, stąd $N'(t)$ jest procesem Poissona z parametrem $\lambda' = \sum_{i \in \{1, \dots, m\}} \lambda_i$ [11] i zachowana jest zgodność ze stylizowanymi faktami na temat napływu zleceń na giełdę.

2.2 Agenci

Agentów $e^i \in E$ będziemy charakteryzować trzema podstawowymi atrybutami:

- i. u^i - funkcją użyteczności, bazującą na indywidualnej wycenie instrumentu dokonanej przez agenta,
- ii. ω^i - ilością posiadanych jednostek instrumentu,
- iii. i - wielkością kapitału.

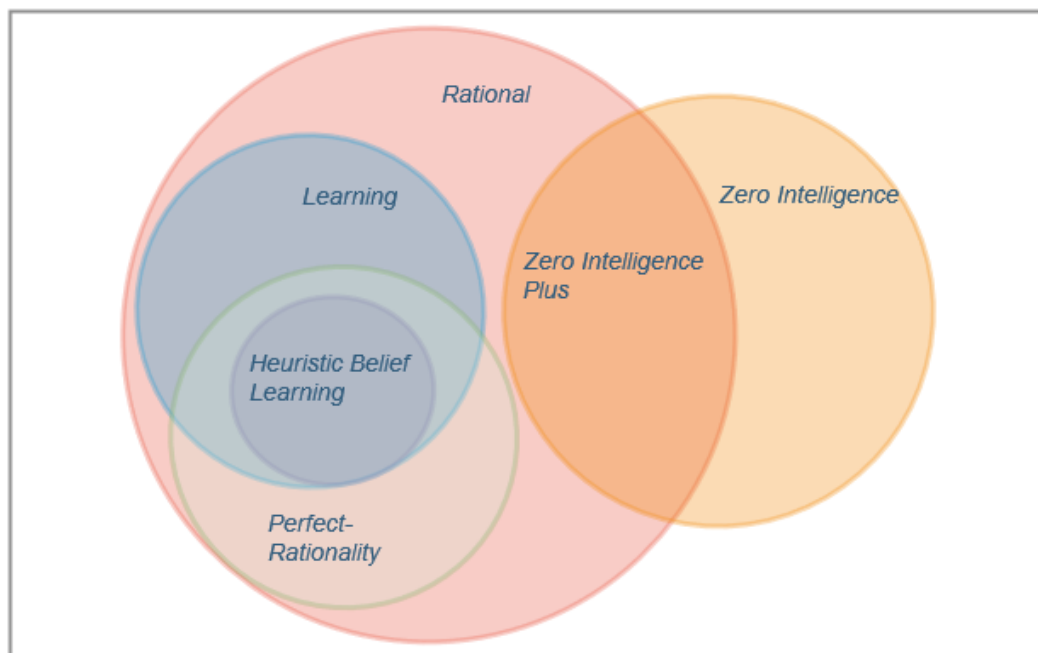
Historycznie ukształtowały się dwa nurty [15] projektowania agentów ekonomicznych syntetycznych rynków:

- I. Agenci w pełni racjonalni (ang. *Perfect-Rationality*)
- II. Agenci podejmujący losowe decyzje (ang. *Zero Intelligence*)

Pierwsze podejście wywodzi się z teorii ekonomii. Kluczowym w nim jest założenie, że wszyscy agenci działają w pełni racjonalnie, podejmując decyzje w taki sposób by zmaksymalizować u^i . Celem badań jest zrozumienie złożonego działania rynku - wyznaczenie potencjalnych strategii graczy i uzasadnienie efektywności rzeczywistych rynków, tzn. wytłumaczenie, w jaki sposób możliwy jest handel przy spotkaniu się dwóch stron o sprzecznych interesach (kupujący chcą kupić możliwie najtaniej, podczas gdy sprzedający chcą sprzedać możliwie najdrożej).

Drugi istotny kierunek badań - agenci typu *Zero Intelligence*, ma swoje korzenie w fizyce, a dokładniej w jej gałęzi wyspecjalizowanej w modelowaniu zjawisk ekonomicznych, ekonofizyce. Ekonofizycy kierują się inną motywacją niż ekonomiści - nadrzędnym celem rozwijanych przez nich modeli jest realistyczne odtworzenie napływu zleceń i stanu arkusza zleceń $\mathcal{L}(t)$ w czasie. Wychodzą przy tym od założenia, że indywidualne strategie uczestników rynku i ich optymalność mają marginalny wpływ na czas i rozkład wielkości przybywających zleceń [8].

Modele agentowe rynku czerpią z dokonań obu grup, próbując zbudować model uniwersalny: równocześnie wiernie odtworzyć napływ zleceń i kształtowanie się ceny, i znaleźć uzasadnienie niektórych wzorców i tendencji występujących na rynku w racjonalnych zachowaniach agentów. Trudno przy tym jednoznacznie wskazać frakcję, która wywarła większy wpływ na współczesną formę modeli agentowych rynku [15].



Rysunek 2.1: Podstawowe klasy agentów na syntetycznych rynkach

Oprócz fizyków i ekonomistów, niejednokrotnie na kształt agentów wpływają również współtworzący modele praktycy, przekładający na projekty agentów swoje własne doświadczenia i obserwacje.

Finalnie modele agentowe często mają budowę będącą mieszanką koncepcji wywodzących się z rozwijanych wcześniej odrębnie wątków. Zbiór agentów w modelu ma charakter niejednorodny, zawiera różne typy agentów. Jest to uzasadnione istnieniem rzeczywistych grup graczy o odmiennych motywacjach (np. oczywistym podziałem jest podział na spekulantów i inwestorów długoterminowych). Dodatkowo zostało to również poparte analizą porównawczą, która wskazała, że modele ze zróżnicowanym zbiorem graczy znacząco lepiej odwzorowują stylizowane fakty nt. rynku niż modele oparte wyłącznie na agentach typu *Zero Intelligence* [16]. Spośród typów agentów występujących we współczesnych modelach agentowych możemy wyodrębnić kilka najbardziej istotnych klas (zobrazowanych również na rys. 2.1):

- agentów w pełni racjonalnych, których konstrukcja wywodzi się z teorii ekonomii lub jest bezpośrednim odwzorowaniem typowego działania wybranego uczestników rynku (*Rational Agents*),

- agentów składających zlecenia w sposób losowy, zdefiniowanych analogicznie do agentów modeli ekonofizycznych (*Zero Intelligence Agent*),
- agentów uczących się - zmieniających sposób działania na podstawie historii swoich dotychczasowych akcji (*Learning Agents*),
- agentów aplikujących racjonalne reguły decyzyjne, ale częściowo zależnych od czynników losowych, np. wyznaczających cenę zlecenia zależnie od losowego czynnika (*Zero Intelligence Plus Agents*).

2.2.1 Agenci typu *Heuristic Belief Learning*

Spośród agentów w pełni racjonalnych i uczących się szczególne znaczenie ma podklasa agentów typu HBL (*Heuristic Belief Learning*) [7]. Agenci typu HBL zostali wprowadzeni przez ekonomistów aspirujących do wyjaśnienia, w jaki sposób uczestnicy rynku z czasem uczą się wyznaczać cenę swoich ofert tak, aby możliwie szybko znaleźć kupca (sprzedawcę). Agent typu HBL wyznacza cenę planowanej oferty kupna i sprzedaży w oparciu o swoje oszacowanie szansy (przekonanie), że zlecenie wystawione po tej cenie jest najkorzystniejszym ruchem pod względem zysku i czasu realizacji. Formalizując, agent wyznacza cenę składanej oferty kupna lub sprzedaży na podstawie wzoru:

$$p_i^*(t) = \begin{cases} \operatorname{argmax}_p (p^i - p) f_t^i(p) & \text{dla kupna,} \\ \operatorname{argmax}_p (p - p^i) f_t^i(p) & \text{dla sprzedaży,} \end{cases}$$

gdzie:

- p^i - indywidualna wycena p^i handlowanego obiektu (instrumentu), może być zależna od czasu t i liczby aktualnie posiadanych jednostek ω^i ,
- $f_t^i(p)$ - funkcja przekonania (ang. *belief*) - heurystyka prawdopodobieństwa, że zlecenie zostanie z sukcesem zrealizowane po cenie p , wyznaczana na podstawie historii dotychczasowych zleceń.

Poważną wadą agentów typu HBL jest ich złożoność - ich konstrukcja wymaga stałego zapisywania i przechowywania wszystkich zleceń historycznych złożonych na

giełdzie. Nawet jeśli ograniczymy okres zapisywanej historii, do np. n ostatnich jednostek czasu, nadal jest to zadanie dosyć obciążające, szczególnie przy założeniu, że większość agentów (lub wszyscy, analogicznie do oryginalnego modelu [7]) niezależnie korzysta z tego mechanizmu wyznaczania ceny.

2.2.2 Agenci typu *Zero Intelligence Plus*

W tej pracy będziemy rozważać głównie agentów typu *Zero Intelligence Plus* - agentów, których akcje mogą być, w różnym stopniu, losowe. Zakres pojęcia *Zero Intelligence Plus* jest przy tym bardzo szeroki. Obejmuje minimalne modyfikacje agentów całkowicie losowych *Zero Intelligence*, ale też agentów stosujących rozbudowane racjonalne strategie, z elementem losowości wprowadzonym jedynie na etapie wyznaczenia ceny, wielkości lub czasu wysłania zlecenia[5].

W kontekście modeli rozważanych w tej pracy wyjątkowo ważne są dwa podtypy agentów *Zero Intelligence Plus*[12]:

- agenci podejmujący decyzje w oparciu o obserwację danych rynkowych (ang. *chartists* - "wykresisici"),
- agenci podejmujący decyzję w oparciu o oszacowanie wartości instrumentu na podstawie wyceny indywidualnej oraz informacji "z zewnątrz" (ang. *fundamentalists* - "fundamentalisci").

Powyższy podział jest odbiciem rzeczywistości - strategie graczy giełdowych możemy podzielić na bazujące głównie na wycenie instrumentu niezależnej od danych mikro-ekonomicznych (analiza fundamentalna) oraz na strategie polegające na wskaźnikach - funkcjach danych rynkowych mających identyfikować aktualne tendencje (analiza techniczna).

Strategie "wykresistów" są, przy założeniu wiernego odwzorowania elementu instytucji I , możliwe do bezpośredniego przeniesienia na projekt agenta modelu. Decyzje podejmowane są na podstawie wskaźnika - funkcji danych rynkowych, które gracz może pozyskać za pomocą zapytania lub subskrypcji od agenta-giełdy e^0 . Inaczej jest w przypadku drugiej grupy - "fundamentalistów", gdzie potrzebujemy do konstrukcji wprowadzić element subiektywnej wartości handlowanego obiektu dla

agenta, z uwzględnieniem oszacowania na podstawie wiedzy publicznej oraz osobistych preferencji. W tym celu wprowadzamy do modelu dwa nowe obiekty: wartość fundamentalną instrumentu r_t utożsamiającą wiedzę publiczną na temat wartości instrumentu oraz wektory wartości prywatnych agentów $\Theta = \{\theta^1, \dots, \theta^m\}$ określające ich preferencje (przekonania o potencjalnym zaniżeniu lub zawyżeniu wartości).

Wartość fundamentalna

Motywacją analizy fundamentalnej jest przekonanie, że cena rynkowa nie odzwierciedla dobrze rzeczywistej wartości instrumentu finansowego reprezentowanej przez r_t - wartość fundamentalną. Zgodnie z założeniami, r_t powinna utożsamiać całość aktualnej informacji publicznej na temat instrumentu, nie będąc przy tym podatną na spekulację powodującą fluktuacje ceny rynkowej. Teoretyczna wartość fundamentalna r_t nie jest znana, stąd szacujemy jej wartość \hat{r}_t korygując cenę rynkową w oparciu o zbiorczą informację z wielu źródeł.

Opisana powyżej logika przekłada się również na agentów realizujących strategie oparte na analizie fundamentalnej w ramach modelu: każdy z agentów tego typu ustala na swój użytek prywatną estymatę wartości fundamentalnej \hat{r}_t^i . Uściślenia wymaga jednak format informacji publicznej. Proces łączenia faktów z różnych źródeł jest pomijany: agenci za pośrednictwem dedykowanego obiektu - wyroczni O obserwują wartość $r_t + \epsilon_t^i$, czyli wartość fundamentalną obarczoną błędem losowym i na jej podstawie aktualizują prywatne oszacowane \hat{r}_t^i .

W dotychczasowych modelach agentowych nie wyłoniła się spójna konwencja generowania danych udostępnianych agentom przez wyrocznię O . Część modeli używa w charakterze wyroczni danych historycznych, część definiuje r_t jako proces stochastyczny. W tej pracy rozważamy jedynie drugie z podejść, przyjmując założenie że zawarta w modelu wyrocznia O reprezentuje realizację parametryzowanego procesu stochastycznego. Szczegóły założonego procesu stochastycznego i estymacji \hat{r}_t^i przez agentów opiszemy na przypadku modelu referencyjnego w kolejnym rozdziale.

Preferencje

[tutaj planuję opisać działanie tzw. wartości prywatnych agentów i ich korzenie w teorii aukcji]

Rozdział 3

Model referencyjny

[tutaj planuję opisać ogólnie działanie i założenia ABIDESA, odnosząc się do zasad opisanych w poprzednich rozdziałach]

3.1 Rozwiązania techniczne

3.1.1 Chronologia zdarzeń

[tutaj planuję opisać jak działa symulacja technicznie - jak zapewniona jest prawidłowa chronologia zdarzeń (discrete event-based kernel)]

3.1.2 Wyrocznia

[tutaj planuję opisać, w jaki sposób generowana jest cena z procesu stochastycznego typu mean reverting/procesu Ornsteina-Uhlenbecka z odwołaniem do sekcji wartość fundamentalna]

3.1.3 Implementacja

[tutaj planuję ogólnie opisać, jak elementy teoretycznego modelu opisanego we wcześniejszym rozdziale przekładają się (w uproszczeniu) na klasy, obiekty i metody w implementacji, np.: h^i , c^i odpowiada metoda *onReceive*]

3.2 Konfiguracja referencyjna

[tutaj planuję wstawić tabelkę z parametryzacją konfiguracji referencyjnej - sprowadza się to wymienienia liczby agentów każdego rodzaju, oraz opisać działanie tych agentów - większość odpowiada agentom opisanym w rozdziale wcześniej]

Rozdział 4

Modelowanie przewagi informacji

[celem jest wprowadzenie do modelu referencyjnego agenta, który ma przewagę informacji względem pozostałych; przyjmujemy założenie, że o ustalonej godzinie planowana jest publikacja kluczowego sprawozdania/ogłoszenia na temat spółki, a jeden z graczy zna jego treść z wyprzedzeniem]

[zakładamy, że poinformowany gracz (InformedAgent) może, ale nie musi dzielić się swoją wiedzą za opłatą z wybraną grupą innych graczy (FollowerAgent)]

[Schemat dzielenia informacji: follower wysyła zapytanie do poinformowanego agenta, w odpowiedzi poinformowany agent zwraca rekomendację BUY/SELL w zależności od swojego (z grubsza prawidłowego) oszacowania ceny w przyszłości]

4.1 InformedAgent

[tu opisuję działanie tego agenta i jego możliwe strategie (agent jest parametryzowany); przewagę informacji zawieram jako wartość prywatną agenta]

4.2 FollowerAgent

[tu opisuję działanie tego agenta, które ogranicza się do wysłania zapytania, odebrania informacji zwrotnej i postąpienia zgodnie z nią]

Rozdział 5

Analiza wpływu przewagi informacji (tytuł roboczy)

[opisuję motywację - podobne przypadki w historii itp.]

[cel 1: weryfikacja, czy (w zależności) od skali uprzywilejowana grupa z lepszą informacją ma negatywny wpływ na resztę graczy - czy tracą przez to więcej]

[cel 2: który scenariusz jest korzystniejszy dla poinformowanego gracza: dyskretne wykorzystanie informacji do własnych celów czy rozpowszechnienie w dużej grupie, za pobraniem opłaty; ewentualnie- jak duża może być opłata w zależności od wielkości grupy by followerzy byli skłonni ją płacić?]

5.1 Plan symulacji

[tutaj opisuję, jakie konfiguracje testowałam w ilu próbach i dlaczego takie]

5.2 Analiza wyników

Podsumowanie

Bibliografia

- [1] Specyfikacja protokołu itch, 2022. <https://www.nasdaqtrader.com/content/technicalsupport/specifications/> [dostęp: 16.01.2024].
- [2] Specyfikacja protokołu ouch, 2022. <http://nasdaqtrader.com/content/technicalsupport/specifications/> [dostęp: 16.01.2024].
- [3] Frédéric Abergel, Marouane Anane, Anirban Chakraborti, Aymen Jedidi, and Ioane Muni Toke. *Limit Order Books*. Physics of Society: Econophysics and Sociophysics. Cambridge University Press, 2016.
- [4] Jean-Philippe Bouchaud, Julius Bonart, Jonathan Donier, and Martin Gould. *Trades, Quotes and Prices: Financial Markets Under the Microscope*. Cambridge University Press, 2018.
- [5] David Byrd. Explaining agent-based financial market simulation. *CoRR*, abs/1909.11650, 2019.
- [6] Luc Devroye. *Non-Uniform Random Variate Generation*. Springer-Verlag, New York, NY, USA, 1986.
- [7] Steven Gjerstad and John Dickhaut. Price formation in double auctions. *Games and Economic Behavior*, 22, 03 2001.
- [8] Dhananjay K. Gode and Shyam Sunder. Allocative efficiency of markets with zero-intelligence traders: Market as a partial substitute for individual rationality. *Journal of Political Economy*, 101:119 – 137, 1993.

- [9] Martin D Gould, Mason A Porter, Stacy Williams, Mark McDonald, Daniel J Fenn, and Sam D Howison. Limit order books. *Quantitative Finance*, 13(11):1709–1742, 2013.
- [10] Zuli Hu and Li Li. Responses of the stock market to macroeconomic announcements across economic states. *IMF Working Papers*, 1998(079):A001, 1998.
- [11] G.F. Lawler. *Introduction to Stochastic Processes (2nd ed.)*. 2006.
- [12] Thomas Lux and Michele Marchesi. Volatility clustering in financial markets: A microsimulation of interacting agents. *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, 3, 08 1998.
- [13] Yoav Shoham and Kevin Leyton-Brown. *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*. Cambridge University Press, USA, 2008.
- [14] Vernon L Smith. Microeconomic Systems as an Experimental Science. *American Economic Review*, 72(5):923–955, December 1982.
- [15] Juan Trinidad Segovia, Fabrizio Di Sciorio, Raffaele Mattera, and Maria Spano. A bibliometric analysis on agent-based models in finance: Identification of community clusters and future research trends. *Complexity*, 2022, 09 2022.
- [16] Svitlana Vyetrenko, David Byrd, Nick Petosa, Mahmoud Mahfouz, Danial Derovic, Manuela Veloso, and Tucker Balch. Get real: realism metrics for robust limit order book market simulations. In *Proceedings of the First ACM International Conference on AI in Finance*, ICAIF '20, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [17] Michael Wellman. *Trading Agents*. Morgan & Claypool Publishers, 1st edition, 2011.