AUTOMATYKA • 2007 • Tom 11 • Zeszyt 1–2

Joanna Kwiecień*, Bogusław Filipowicz*

Zastosowanie teorii kolejek do modelowania podstawowych procesów mentalnych człowieka

1. Wprowadzenie

Teoria kolejek, która pierwotnie ściśle powiązana była z techniką, dzięki swojej skuteczności i elastyczności wzbudza szerokie zainteresowanie wśród matematyków, techników i ekonomistów. W ostatnich latach wśród badaczy zajmujących się teorią kolejek wzrosło zainteresowanie modelowaniem zachowań człowieka. Połączenie elementów GOMS/HPMA (*Goals, Operators, Methods, Selection/Human Performance Modeling Approaches*) ze strukturą bazującą na matematycznych podstawach sieci kolejkowych stało się podstawą tworzenia nowego rodzaju sieci QN-MHP (*Queueing Network – Model Human Processor*) umożliwiających modelowanie elementarnych procesów mentalnych człowieka [1, 2]. MHP pozwala na modelowanie czasu reakcji człowieka jako opóźnienia powstałego wskutek wędrowania bodźca przez wszystkie trzy etapy przetwarzania informacji (etap percepcji, poznania i reakcji). Taka struktura zasugerowała, że MHP może posłużyć jako wzorzec w teorii kolejek, bowiem każdy etap przetwarzania informacji można zastąpić siecią kolejkową z parametrami zaczerpniętymi z MHP. Systemy wchodzące w skład sieci QN-MHP reprezentują główne pola kory mózgowej, natomiast jednostki informacji mogą tworzyć kolejki do serwerów/systemów aktualnie zajętych. W sieciach QN-MHP jednostki informacji mogą być przetwarzane równolegle, dana jednostka może wzbudzać aktywność w innym miejscu model. Ponadto podczas rywalizacji o dostęp do zasobów, jednostki informacji mogą wpływać na przetwarzanie pozostałych.

Do głównych zastosowań QN-MHP przedstawianych w literaturze światowej można zaliczyć modelowanie zachowania człowieka w czasie procesu przepisywania tekstu na maszynie/komputerze [3], modelowanie zachowania kierowcy [4], modelowanie okresu niewrażliwości na bodźce [5] czy też modelowanie przeszukiwania i wyboru elementów menu [6]. Sieci QN-MHP pozwalają wyjaśnić i przewidzieć charakterystyki czasowe i obciążeniowe wydajności systemów jedno- i wielozadaniowych.

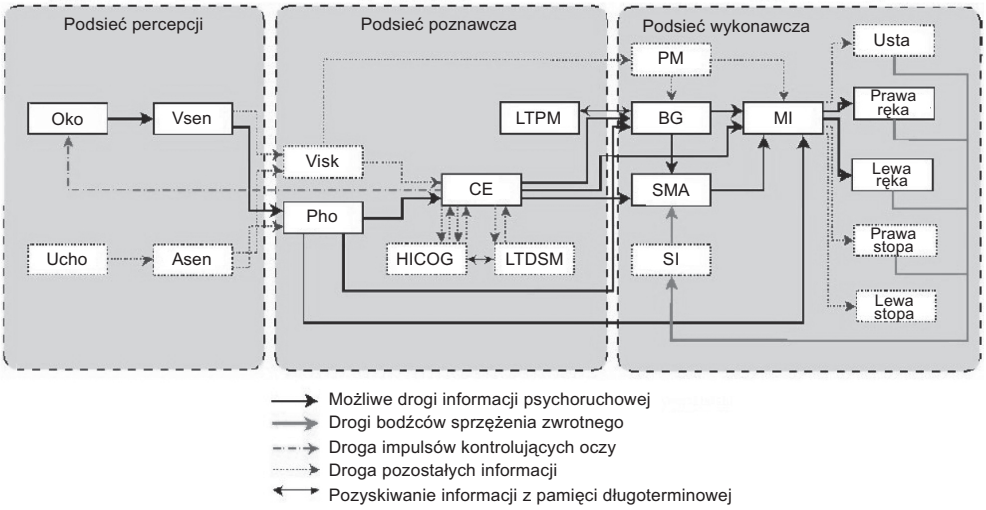
* Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

2. Charakterystyka sieci QN-MHP

Sieć QN-MHP złożona jest z trzech podsieci reprezentujących fazy (rys. 1):

1) percepcji,
2) poznania,
3) reagowania.

Posiada ona zarówno szeregowe, jak i równoległe trasy przetwarzania informacji. Podsieć percepcji reprezentuje systemy, które odpowiadają m.in. za odbiór bodźców wzrokowych i słuchowych. Percepcje wizyjna i słuchowa reprezentowane są jako oddzielne podsieci, bowiem przetwarzanie bodźców wzrokowych odbywa się oddzielnie od przetwarzania dźwięków. W systemie wizyjnym po odebraniu bodźca, informacja przekazywana jest równolegle celem jednoczesnego zlokalizowania i rozpoznania obiektu w polu widzenia. W systemie dźwiękowym na początku następuje lokalizacja źródła dźwięku, po czym dalej przełączany jest ciąg informacji skojarzony z nazwaniem i identyfikacją tego sygnału. Systemy reprezentujące etap percepcji posiadają na tyle dużą zdolność przetwarzania, że nie stanowią wąskich gardeł przetwarzania informacji.



Rys. 1. Przykładowy model sieci QN-MHP [7]. Oko – próbkowanie i transmisja obrazu, Vsen – pamięć wzrokowa i percepcja, Ucho – konwersja fal dźwiękowych, Asen – pamięć słuchowa i percepcja, Visk – bufor do przechowywania obrazów, Pho – pętla fonologiczna służąca do przechowywania informacji, CE – centralny układ zarządzający, HICOG – ocena fonologiczna, LTDSM – deklaratywna pamięć długoterminowa, LTPM – długoterminowa pamięć proceduralna, PM – wybór ruchu, BG – wytwarzanie programu ruchowego, SMA – składanie i koordynacja ruchów, SI – wysyłanie informacji, MI – wysyłanie bodźców do organów wykonawczych, Usta – odpowiedzi dźwiękowe, Ręka/Stopa – organ wykonawczy ruchu

Podsieć poznawcza reprezentuje specyficzne obszary mózgu powiązane z wybranymi funkcjami poznawania, a więc układy pamięci i wykonywania celów. Serwery wchodzące w skład układu pamięci zawierają obszar wizualno-przestrzenny, pętlę fonologiczną i centralny element wykonawczy, który koordynuje kontrolę konkretnego zadania i komunikuje się z innym obszarem mózgu w celu wykonania złożonych zadań, planowania, wyboru priorytetu i monitorowania przebiegu wykonania.

Podsieć reagowania/wykonawcza zawiera kilka systemów odpowiedzialnych m.in. za integrację sensoryczno-motoryczną, wycofanie elementu czynności, programowanie i wykonanie czynności oraz korektę ruchu. Człony wykonawcze przeprowadzające wykonanie odpowiedzi na dane bodźce ograniczone są do przetwarzania jednej jednostki informacji.

W zależności od charakteru pamięci (proceduralna, deklaratywna, epizodyczna), dla zadań wymagających długoterminowego przeszukiwania pamięci, aktywowane są różne regiony mózgu. Specyfikacje zadań oraz otoczenia kopiowane są do jednej z pięciu uaktualnianych tablic: bodźców, obiektów docelowych, akcji, celów i obiektów wykonawczych.

Wybór trasy podczas symulacji realizowany jest w oparciu o kryterium czasooptymalne F_T lub jakościowe F_E, przy czym wyższy priorytet ma kryterium jakościowe [7]. Każdy serwer należący do sieci QN-MHP charakteryzowany jest przez dwie wielkości – nagrody zaoszczędzania czasu i nagroda za omijanie błędów, wyliczane z zależności (1).

$$\begin{aligned} F_T^{t+1}(i,j) &= F_T^t(i,j) + \varepsilon \cdot \left(\frac{1}{\overline{t_q}} + \mu_{j,t} + \gamma \cdot \max_k \left(F_T^t(j,k) \right) - F_T^t(i,j) \right) \\ F_E^{t+1}(i,j) &= F_E^t(i,j) + \varepsilon \cdot \left(\frac{1}{N_{error(j,t)} + 1} + \gamma \cdot \max_k \left(F_E^t(j,k) \right) - F_E^t(i,j) \right) \end{aligned} \tag{1}$$

gdzie:

$F_{T/E}^{t+1}(i,j)$ – wartość nagrody, jeśli informacja w kolejnym kroku przejdzie z systemu i do j;

$\max_k(F_{T/E}^{t+1}(j,k))$ – maksymalna wartość nagrody za przejście z serwera j do serwera k;

ε, γ – współczynniki uczenia i zaoszczędzenia czasu przy przejściu do kolejnego serwera, $0 < (\varepsilon, \gamma) < 1$;

$\overline{t_q}, \mu_{j,t}$ – średni czas oczekiwania i szybkość obsługi serwera j;

$N_{error(j,t)}$ – liczba błędów w serwerze j.

Systemy wchodzące w skład sieci QN-MHP są systemami jednokanałowymi z dyscypliną FIFO. Informacja dociera do sieci zgodnie z rozkładem Poissona. W większości systemów czas obsługi informacji podlega rozkładowi wykładniczemu. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry poszczególnych systemów.

Tabela 1
Pojemność i czas przetwarzania informacji w systemach należących do sieci QN-MHP [7]

System	Rozmiar systemu	Czas przetwarzania
Oko	∞	50 ms (ruch oka)
Ucho	∞	10 ms
Vsen	17	rozkład normalny
Asen	5	50 ms
Visk	3	włączony w CE
Pho	3	włączony w CE
CE	3	70 ms
LTPM	∞	włączony w BG
HICOG	1	Zmienny
LTDSM	∞	włączony w HICOG
PM	1	zmienny
BG	1	zmienny
SMA	2	188 ms
SI	2	80 ms
MI	2	70 ms
Usta	1	10 ms
Prawa/Lewa ręka	1	$26{,}3\log_2(D/1{,}3+0{,}5)$; D – długość ruchu
Prawa/Lewa stopa	1	82 ms

Czasy przetwarzania informacji w systemach HICOG, BG oraz PM opisane są zależnością (2)

$$t_i = A_i + B_i \cdot e^{-\alpha_i N_i} \tag{2}$$

gdzie:

A_i – minimalny czas przetwarzania w systemie i po okresie uczenia: A_{BG} = 314 ms, A_{HICOG} = 180 ms, A_{PM} = 47 ms;

B_i – zmiana czasu przetwarzania w trakcie procesu uczenia: B_{BG} = 628 ms, B_{HICOG} = 170 ms, B_{PM} = 443 ms;

α_i – współczynnik uczenia: α_{BG} = 0,00142, α_{HICOG} = 0,00025, α_{PM} = 0,0000625;

N_i – liczba przetworzonych jednostek (dowolna, zależna od eksperymentu).

3. Wybrane zastosowania sieci QN-MHP

W rozdziale tym przedstawione zostaną zagadnienia modelowania reakcji kierowcy [4] oraz zachowania człowieka podczas przepisywania tekstu na maszynie [3].

3.1. Zagadnienie modelowania kierowcy

Głównym celem przeprowadzanych eksperymentów było zamodelowanie zachowania kierowcy, który w czasie jazdy wykonuje dodatkowo proste czynności wewnątrz pojazdu oraz określenie czasów reakcji i sposobu hierarchizacji zadań. Kierowca miał za zadanie utrzymywać położenie pojazdu na drodze, między liniami ograniczającymi pas ruchu zarówno na prostej, jak i na zakręcie, oraz naciskać określone przyciski na panelu sterowania. Do przeprowadzenia tego eksperymentu, autorzy w [4] wykorzystali środowisko programu ProModel, sprzęgając go za pomocą interfejsów sieciowych z symulatorem pojazdu. Symulator ten przekazywał do sieci QN-MHP parametry jazdy, takie jak prędkość i położenie na drodze. Wyniki przeprowadzonych doświadczeń potwierdziły skuteczność QN-MHP w modelowaniu zachowania człowieka prowadzącego pojazd.

Rozważając perspektywy rozwoju tego modelu, można stwierdzić, że interesujące byłoby rozszerzenie funkcjonalności o zmianę zachowania w zależności od ruchu ulicznego, wykonywanie drugorzędnych czynności takich jak słuchanie radia czy rozmowa przez telefon w czasie prowadzenia pojazdu. Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań można przypuszczać, że sieci QN-MHP będzie można również zastosować do modelowania zachowania pilota samolotu.

3.2. Zagadnienie pisania na maszynie/komputerze

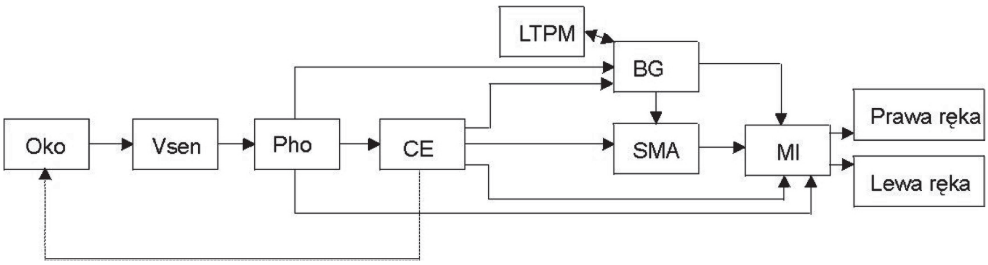
W trakcie badań nad modelowaniem zachowania człowieka w trakcie przepisywania tekstu, autorzy w [3] zaimplementowali wiele zjawisk behawioralnych związanych z przepisywanie tekstu. Główny nacisk położony został na zaimplementowanie zjawisk dotyczących reakcji na pojawienie się błędów oraz zjawisk związanych z procesem uczenia się, tj. ze zwiększaniem szybkości i bezbłędności pisania. Przedstawiono również algorytmy uczenia się całego systemu, bazujące na założeniu, że informacja w sieci QN-MHP wybiera początkowo drogę minimalizującą możliwość popełnienia błędu, a następnie stara się zminimalizować czas przejścia informacji. Podczas zdobywania praktyki w pisaniu występowała reorganizacja sieci kolejkowej, obejmująca dwa aspekty:

1) zmianę czasu przetwarzania przez pojedynczy system wskutek zdobywania nowej wiedzy,
2) wybór odpowiedniej drogi przetwarzania informacji spośród możliwych przejść od wejścia do wyjścia sieci.

Wyjściem sieci QN-MHP były reakcje człowieka w czasie procesu przepisywania tekstu. Dodatkowo w modelu uwzględniono drugi proces – proces naciskania pedału, który rywalizował o czas przetwarzania w poszczególnych systemach. Czynność ta nie wpłynęła jednak na prędkość wykonywania podstawowej, bowiem sygnały czynności podstawowej przybywały szybciej do serwerów. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów stwierdzono skuteczność QN-MHP. Wynik procesu uczenia zachodzącego w serwerze BG oraz odświeżania tablic pamięci proceduralnej w serwerze LTPM potwierdził m.in., że pary liter, które często występują obok siebie pisane są szybciej.

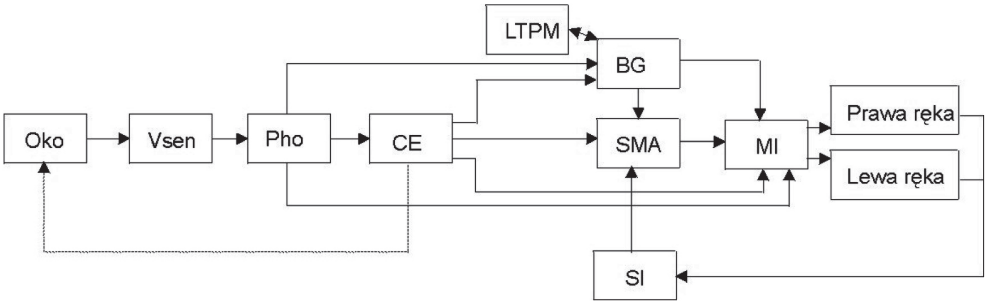
4. Modelowanie pisania na komputerze

Celem naszych badań było zamodelowanie przepływu informacji u osób z zaburzeniami funkcjonowania wybranych systemów, podczas pracy przy komputerze. Nasze rozważania ograniczymy tylko do kilku przypadków: zaburzenia systemu Oko, zaburzenia systemu CE, przy jednoczesnym pominięciu reakcji na sygnały dźwiękowe, co stanowi odzwierciedlenie całkowitego upośledzenia narządu słuchowego. Do zamodelowania tego typu zjawisk został napisany program w technice obiektowej, w związku z tym rozbudowa sieci QN-MHP oraz zastosowanie do modelowania innych zjawisk nie powinny nastręczać większych trudności. Do sieci przybywają zgłoszenia – litery, dla których wyznaczane są czasy przetwarzania oraz odstępy czasu między kolejnymi literami na wyjściu sieci, odpowiadające przerwie między naciśnięciami klawiszy przez osobę piszącą. Model, zbudowany z 10 systemów przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Model sieci QN-MHP, stosowany do modelowania pisania na komputerze

Istnieje 18 możliwości przemieszczania się jednostki informacji w trakcie symulacji pisania na komputerze. Z systemu Pho może zostać wybrany serwer CE, BG lub MI, z CE jednostka informacji może przedostać się do BG, SMA lub MI, zaś z BG może pójść do SMA lub MI. W związku z tym przy modelowaniu przepływu informacji należy uwzględnić udoskonalanie całej sieci. Istnieją dwa rodzaje zwiększania efektywności modelu. Pierwszy polega na udoskonalaniu serwera BG zgodnie z zależnością (2), drugi na udoskonalaniu całej sieci według zależności (1). W badaniach połączone zostały te dwa sposoby. Przy prawidłowym działaniu wszystkich serwerów, na początku symulacji najpopularniejszymi trasami przepływu informacji są Pho→BG→SMA→MI oraz Pho→CE→BG→SMA→MI. Po zakończeniu symulacji optymalną trasę tworzą serwery Pho→CE→SMA→MI. Wykorzystanie serwera CE wynosiło 61%, serwera SMA – 52%, serwera MI – 100%. Według [7] dla systemu, do którego docierają bodźce wzrokowe i słuchowe, trasą optymalną jest Pho→BG→SMA→MI. Różnica może wynikać z dodatkowego obciążenia systemów CE i MI bodźcami słuchowymi i informacją zwrotną, które nie zostały uwzględnione. Przeprowadzono więc badania dla sieci QN-MHP składającej się z 11 systemów (rys. 3), w której uwzględnione zostały bodźce sprzężenia zwrotnego (SI).



Rys. 3. Model sieci QN-MHP uwzględniający bodźce sprzężenia zwrotnego

Podobnie jak w poprzednim przypadku, na początku symulacji informacja przechodzi wzdłuż Pho→BG→SMA→MI oraz Pho→CE→BG→SMA→MI. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów okazało się, że optymalną trasą przepływu informacji jest Pho→BG→SMA→MI. Po zakończeniu symulacji wykorzystanie serwera CE wynosiło 0%, serwera BG – 92%, serwera SMA – 57%, serwera MI – 100%. Po przetworzeniu 10 000 liter odstęp czasu między kolejnymi wciskanymi literami zmniejszył się dwukrotnie.

Do zbadania przepływu informacji u osób z zaburzeniami funkcjonowania pewnych struktur mózgowych wykonane zostały eksperymenty, gdy czasy przetwarzania informacji w systemach Oko i CE są większe oraz system CE ma mniejszą pojemność (2 jednostki). Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2
Trasy przepływu informacji bez bodźców sprzężenia zwrotnego

Model	Rozmiar systemu	Czas przetwarzania	Trasa początkowa (% badań)	Trasa optymalna
Oko CE	∞ 3	60 ms 90 ms	Pho→BG→SMA→MI (40%) Pho→CE→BG→SMA→MI (40%) Pho→MI (20%)	Pho→CE→SMA→MI
Oko CE	∞ 2	60 ms 90 ms	Pho→BG→SMA→MI (40%) Pho→CE→BG→SMA→MI (30%) Pho→MI (30%)	Pho→BG→SMA→MI

5. Wnioski

Modelowanie QN-MHP wydaje się obiecującym rozwiązaniem umożliwiającym badanie ludzkich zachowań w różnych sytuacjach, z uwzględnieniem zaburzeń funkcjonowania poszczególnych systemów. Sieć QN-MHP pozwala poznać i zrozumieć sposób przesyłania informacji. Dzięki samoorganizacji sieci, jednostki informacji wędrują jedną, najlep-

szą pod względem jakościowym lub czasowym, trasą. Na ostateczny wybór trasy również ma wpływ początkowa faza symulacji, kiedy to serwery docelowe wybierane są w sposób losowy. Aby zbadać sposób przepływu informacji u osób niepełnosprawnych, w eksperymentach pominięte zostało przetwarzanie bodźców słuchowych.

Literatura

[1] Liu Y.: *Queueing network modeling of elementary mental processes*. Psychological Review, 103, 1996

[2] Feyen R.G., Liu Y.: *Modeling task performance using the queueing network-model human processor*. Proceeding of the 4th International Conference on Cognitive Modeling, 2001

[3] Wu C., Liu Y.: *Modeling human transcription typing with queueing network-model human processor (QN-MHP).* Proceeding of the 47th Annual Meeting of Human Factors and Ergonomics Society, 2004

[4] Tsimhoni O., Liu Y.: *Steering a driving simulator using the queueing network-model human processor (QN-MHP)*. Proceeding of the 2nd Driver Assessment Symposium, 2003

[5] Wu C., Liu Y.: *Modeling psychological refractory period (PRP) and practice effect on PRP with queueing networks and reinforcement learning algorithms*. Proceedings of the 6th International Conference on Cognitive Modeling, 2004

[6] LIM J., LIU Y.: *A queueing network model for eye movement*. Proceedings of the 6th International Conference on Cognitive Modeling, 2004

[7] Wu C., Liu Y.: *Modeling behavioral and brain imaging phenomena in transcription typing with queueing networks and reinforcement learning algoithms.* Proceedings of the 6th International Conference on Cognitive Modeling, 2004