

Jerzy GROBELNY\*, Rafał MICHALSKI\*

## ZASTOSOWANIE MODELI MARKOWA Z UKRYTYMI STANAMI DO ANALIZY AKTYWNOŚCI WZROKOWEJ W PROCESIE OCENY WIRTUALNYCH OPAKOWAŃ TECHNIKĄ PORÓWNYWANIA PARAMI

DOI: 10.21008/j.0239-9415.2017.073.08

W artykule przedstawiono próbę zastosowania stochastycznych modeli Markowa z ukrytymi stanami do analizy aktywności wzrokowej człowieka. Dane wejściowe do eksperymentalnych badań symulacyjnych zgromadzono podczas eksperymentu polegającego na porównywaniu parami różnych wariantów wirtualnych opakowań produktów. Symulacje polegające na wielokrotnej estymacji parametrów modeli Markowa z ukrytymi stanami przeprowadzono dla każdego rodzaju porównania zakładając różne ilości ukrytych stanów. Analiza wyników symulacji umożliwiła określenie optymalnych, w sensie miary AIC, liczby ukrytych stanów. Najlepsze uzyskane modele zostały następnie szczegółowo przeanalizowane w celu zidentyfikowania wykorzystywanych podczas porównań parami strategii wzrokowych.

**Słowa kluczowe:** ergonomia, marketing, *digital signage*, zachowanie człowieka, interakcje człowieka z komputerem.

### 1. WPROWADZENIE

Rejestracja ścieżki skanowania wzrokowego w trakcie badań okulograficznych jest precyzyjną metodą analizy aktywności wizualnej człowieka. Ścieżka wzrokowa jest sekwencją sakad i fiksacji. Sakady są to szybkie zmiany położenia oka, podczas których przetwarzanie wizualne jest zasadniczo ograniczone. Fiksacje z kolei to przerwy między sakadami, kiedy oko jest względnie nieruchome. W tym stanie moż-

---

\* Wydział Informatyki i Zarządzania Politechniki Wrocławskiej.

liwe jest przetwarzanie informacji. Sakady i fiksacje budujące ścieżkę skanowania dają wgląd w proces przenoszenia uwagi w trakcie wykonywania zadań wzrokowych. Długość ścieżki oraz parametry geometryczne i czasowe sakad i fiksacji, traktowane statycznie i deterministycznie, są podstawą do formułowania wskaźników charakteryzujących jakość komunikatów wizualnych. Na przykład, Goldberg i Kotval (1999) pokazali w prostym eksperymencie, że długość ścieżki koreluje dodatnio z jakością użytkową interfejsu wyrażaną stopniem funkcjonalnego grupowania obiektów graficznych.

Prawdopodobnie jednymi z pierwszych badaczy, którzy zaproponowali opis ścieżki skanowania w kategoriach procesu Markowa pierwszego rzędu byli Ellis i Stark (1986). Założyli oni, że pozycja danej fiksacji zależy stochastycznie od pozycji poprzedniej fiksacji. W ostatniej dekadzie coraz szersze zastosowanie znajduje modelowanie i analiza aktywności wizualnej w kategoriach modeli Markowa z ukrytymi stanami (*hidden Markov models* – HMM). Zainteresowanie takim podejściem wynika ze stanu wiedzy i badań z obszaru psychofizjologii procesów wizualnych. W naturalnym działaniu człowieka ruch gałek ocznych jest najbardziej wyrazistym efektem przenoszenia uwagi. Jest on wynikiem jawnych i ukrytych procesów uwagowych. (*overt i covert attention* – Findlay i Gilchrist, 2003). Parametry ścieżki wzrokowej są obserwowalne i opisują przenoszenie uwagi jawnej. Ukryte procesy uwagowe natomiast zazwyczaj kojarzy się z ukrytymi stanami modelu HMM. Ponieważ narzędzia analizy modeli Markowa pozwalają odkrywać ukryte stany i ich konfiguracje, takie podejście stwarza perspektywę zarówno rozszerzenia wiedzy podstawowej o sterowaniu uwagą w procesach wizualnych, jak i identyfikacji relacji między charakterem przekazu wizualnego a jego odbiorcą w różnych kontekstach.

Badania przeprowadzone przez Liechty et al. (2003) pokazały np., że rejestrowana długość sakad w trakcie analizy wzrokowej może być wyjaśniona za pomocą dwustanowego HMM. Dwa stany modelu odpowiadają 2 stanom uwagi ukrytej, które określili oni jako, odpowiednio, lokalny i globalny. Przetwarzanie w stanie lokalnym koncentruje się na specyficznych aspektach szczegółów przekazu graficznego. W stanie globalnym przetwarzane są wyraziste elementy całej sceny i prawdopodobnie dokonuje się integracja zawartych w tych elementach informacji.

Hayashi (2003) w swoim artykule pokazał, że ukryte stany estymowane na podstawie fiksacji pilotów na wskaźnikach kokpitu mogą być kojarzone z zadaniami wykonywanymi w trakcie lądowania samolotu w trybie ILS (*instrument landing system*). Ilość stanów uzyskiwanych z HMM wskazuje, że piloci organizują proces przenoszenia uwagi w różny sposób. Ten sposób zależy od doświadczenia. Zachowania bardziej doświadczonych pilotów lepiej wyjaśniają modele o większej ilości ukrytych stanów. Autor kojarzy ten wynik z większą precyzją doświadczonych pilotów i szybszym przetwarzaniem informacji. Podobne podejście zastosowane do analizy rozpoznawania twarzy przez poszczególnych uczestników badania także pozwoliło zidentyfikować różnice w indywidualnych strategiach wyszukiwania wzrokowego (Chuk i in., 2014). Uzyskanie takiego wyniku było możliwe dzięki analizie klaste-

ringowej parametrów modeli HMM otrzymanych dla różnych uczestników eksperymentów.

Chowdhury et al. (2012) przedstawili rezultaty badań ścieżki skanowania w zadaniach identyfikacji podrabianych znaków firmowych spośród opakowań umieszczonych na półkach sklepowych. Przedstawione w tej pracy przykładowe ścieżki sakad i fiksacji potwierdzają wykorzystanie porównania obiektów parami jako podstawowego mechanizmu dominującego w procesie wyboru obiektów w środowiskach graficznych. Ten mechanizm po raz pierwszy zidentyfikował Van Raaij (1977).

Omówione wyniki stanowiły inspirację badań, podjętych przez autorów tej pracy. W zaprojektowanym eksperymencie podjęto próbę identyfikacji wpływu wybranych atrybutów opakowań na przebieg i charakterystyki procesów jawnej uwagi, w porównywaniu tych opakowań parami, podczas podejmowania decyzji zakupowych. Szczególnym przedmiotem zainteresowania opisanych w tej pracy badań jest analiza aktywności wizualnej, w trakcie wykonywania porównań parami w perspektywie HMM. Głównym celem analizy jest próba uzyskania odpowiedzi na fundamentalne pytanie, inspirowane opisanymi wyżej badaniami: jakie strategie (wzorce) przeniesienia uwagi są stosowane przez ludzi w realizowanych zadaniach porównań parami i jak zależą one od konstrukcji interfejsu? Odpowiedź na to pytanie, w przyjętej perspektywie ukrytych modeli Markowa (HMM), jest możliwa poprzez identyfikację i analizę parametrów tych modeli, czyli macierzy  $\mathbf{A}$  i  $\mathbf{B}$  oraz prawdopodobieństw  $\mathbf{\Pi}$ .

Poszukiwanie parametrów dla poszczególnych eksperymentów oparto, jak w pracy Hayashi (2003), na estymacji w oparciu o ciągi fiksacji w poszczególnych obszarach zainteresowania (*area of interest* – AOI) badanych typów wirtualnych opakowań. Estymacje wykonano dla założonych różnych ilości potencjalnych ukrytych stanów. W kolejnych sekcjach omówiono najpierw krótko ideę modeli Markowa z ukrytymi stanami, projekt eksperymentu, a następnie wyniki badań empirycznych oraz symulacyjnych. Artykuł kończy dyskusja uzyskanych rezultatów i konkluzje.

## 2. MODELE MARKOWA Z UKRYTYMI STANAMI (*HIDDEN MARKOV MODELS* – HMM)

Definicja modeli Markowa z ukrytymi stanami najczęściej obejmuje następujące składowe (porównaj np. (Rabiner, 1989) lub (Visser, 2011)):  $\mathbf{Q} = \{q_1, q_2, \dots, q_N\}$  – zbiór  $N$  stanów,  $\mathbf{A} = \{a_{11}, a_{12}, \dots, a_{n1}, \dots, a_{nn}\}$ , czyli macierz prawdopodobieństw przejść między stanami, gdzie  $a_{ij}$  określa prawdopodobieństwo przejścia ze stanu  $i$  do stanu  $j$ ,  $\mathbf{O} = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$ , oznaczające sekwencję  $T$  obserwacji, z których każda pochodzi ze słownika  $\mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_V\}$ ,  $\mathbf{B} = b_i(o_i)$  stanowiąca sekwencja prawdopodobieństw obserwacji nazywanych prawdopodobieństwami emisji i określających prawdopodobieństwo, że  $o_t$  jest generowane w stanie  $i$  oraz  $\mathbf{\Pi} = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  określające prawdopodobieństwo, że model Markowa rozpocznie się w danym sta-

nie. W prezentowanych badaniach poszukiwano parametrów macierzy  $\Pi$ ,  $A$ ,  $B$  dla sekwencji fiksacji zarejestrowanych dla różnych typów zadań i poszczególnych badanych  $O$  i zakładając określoną liczbę stanów  $N$  dla zdefiniowanego słownika  $V$ , opisującego obszary zainteresowania wizualnego.

### 3. OPIS EKSPERYMENTU OKULOGRAFICZNEGO

Modele Markowa z ukrytymi stanami, przedstawione w tej pracy, zostały przygotowane w oparciu o okulograficzne dane eksperymentalne opublikowane w pracy Michalskiego i Grobelnego (2016). Z tego względu w tej części artykułu zostanie przedstawione krótkie streszczenie projektu eksperymentu i otrzymanych zasadniczych rezultatów.

Dane dotyczące aktywności wzrokowej pochodziły od 23 studentów (17 kobiet i 6 mężczyzn) i zostały zarejestrowane przez przenośne urządzenie okulograficzne w postaci okularów oraz odpowiednie oprogramowanie sterujące i wspomagające. Badani na ekranie komputera porównywali parami różne warianty opakowań produktów w celu określenia postrzeganej chęci zakupu. Cała procedura odbywała się zgodnie z metodologią *analytic hierarchy process* (Saaty, 1977).

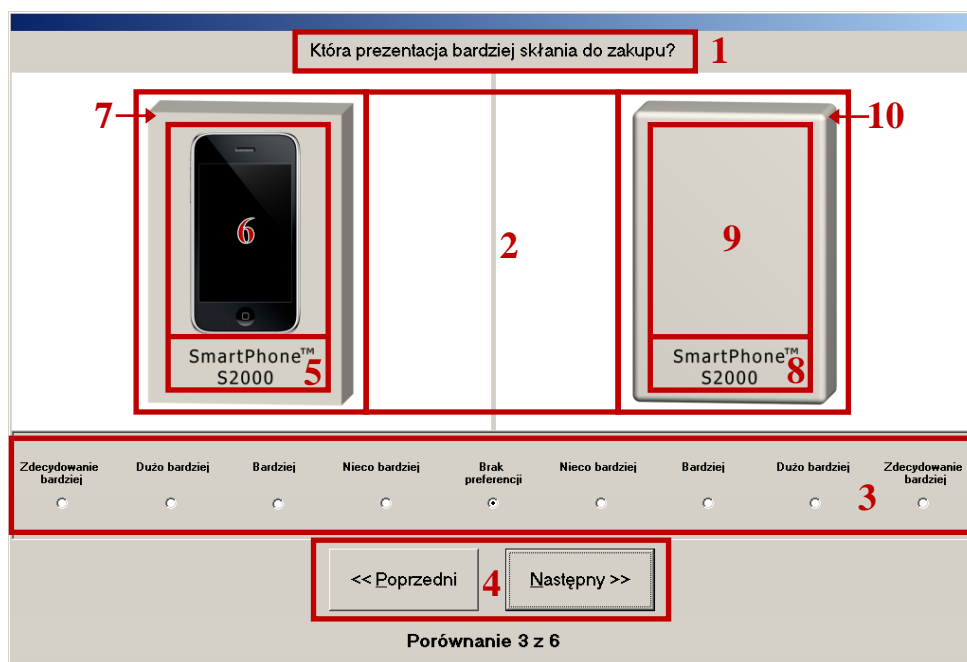
Oceniane cyfrowe prezentacje produktów różniły się pod względem dwóch czynników, z których każdy określono na dwóch poziomach. Pierwszy czynnik to kształt opakowania: klasyczny prostopadłościan i prostopadłościan z zaokrąglonymi krawędziami. Drugi czynnik dotyczył umieszczenia, bądź nie, zdjęcia przedstawiającego produkt. Pełnoczynnikowy projekt eksperymentu dotyczył wszystkich czterech możliwych wariantów opakowań, które wymagały od każdego z uczestników badania przeprowadzenia sześciu porównań parami. Takie przykładowe porównanie zostało pokazane na rysunku 1, a wszystkie możliwe kombinacje par zilustrowano na rysunku 2.

Uzyskana na podstawie przeprowadzonych ocen hierarchia preferencji wykazała najwyższą chęć zakupu w przypadku wariantu z obrazkiem produktu i zaokrąglonymi krawędziami cyfrowego opakowania. Najniżej oceniono model bez zdjęcia z ostrymi krawędziami. Przeprowadzona dwuczynnikowa analiza wariancji pokazała, że obydwa badane czynniki statystycznie istotnie wpływały na średnie oceny postrzeganej chęci zakupu, przy czym fakt umieszczenia obrazka miał dla badanych większe znaczenie niż efekt związany z zaokrągleniem krawędzi opakowania. Nie wystąpiła interakcja pomiędzy analizowanymi czynnikami.

## 4. MODELOWANIE AKTYWNOŚCI WZROKOWEJ ZA POMOCĄ MODELI MARKOWA Z UKRYTYMI STANAMI

### 4.1. Przygotowanie danych okulograficznych do modelowania

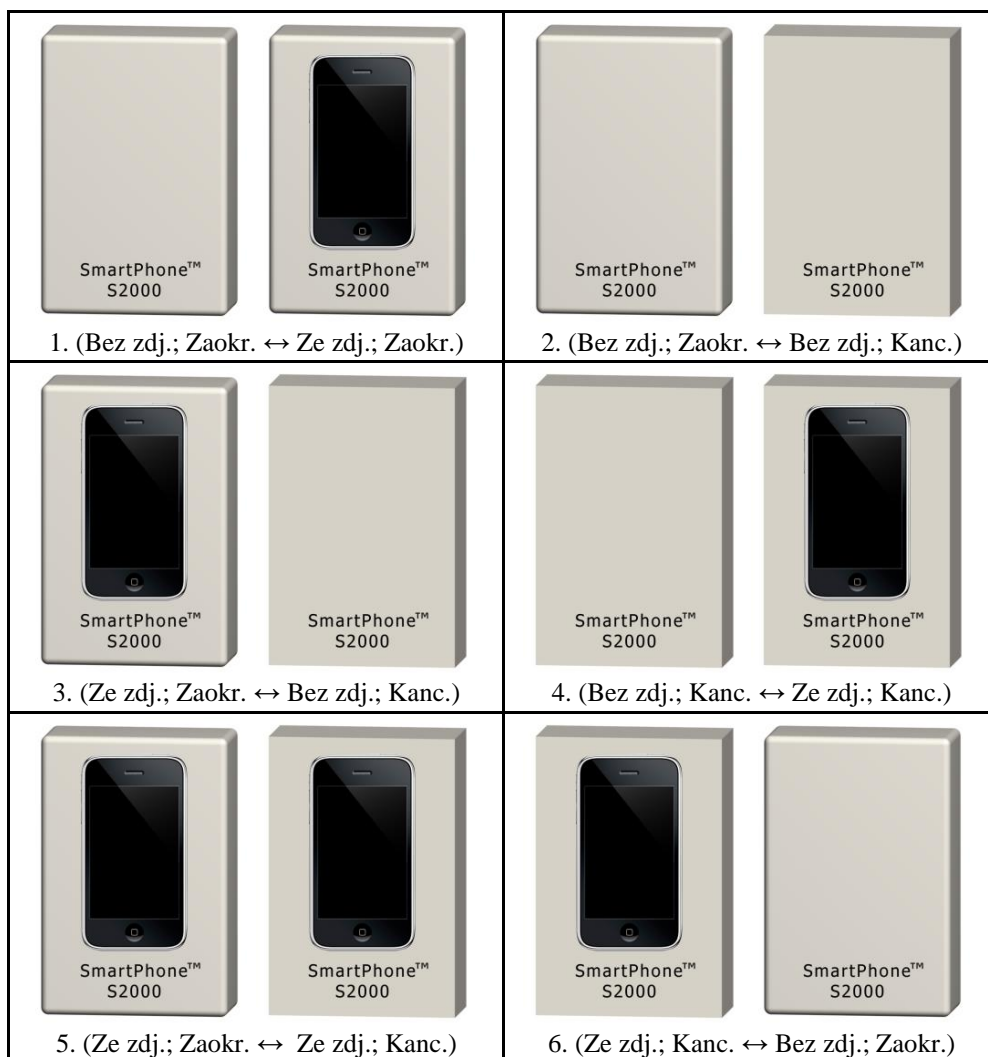
Zebrane podczas opisanego w poprzednim rozdziale eksperymentu, surowe dane okulograficzne zostały przetworzone w taki sposób, żeby można było wyestymować odpowiednie parametry modeli Markowa z ukrytymi stanami. W tym celu zastosowano tutaj ideę podobną do tej, którą wykorzystał w swojej pracy Hayashi (2003). Z całego ekranu programu wspomagającego proces porównawczy wyodrębniono obszary, które przypuszczalnie powodowały zatrzymanie się wzroku (rys. 1).



Rys. 1. Kopia ekranu przykładowego porównania parami z naniesionymi obszarami zainteresowań wykorzystanymi do modelowania

Zidentyfikowane w ten sposób obszary wprowadzono następnie do oprogramowania, służącego do analizy danych okulograficznych (SMI BeGaze, 2016), w postaci tak zwanych obszarów zainteresowań. Dzięki temu, możliwe było uzyskanie informacji na temat ilości fiksacji oraz ich kolejności w poszczególnych porównaniach dla każdej z badanych osób. Te szczegółowe dane zostały wyeksportowane do pakietu statystycznego STATISTICA 64 w wersji 12 (StatSoft, 2014) w celu ich

przetworzenia na odpowiednie sekwencje przejść pomiędzy fiksacjami, zarejestrowanymi dla poszczególnych obszarów zainteresowań i pogrupowania ich pod względem rodzaju porównania. Tak przygotowane sekwencje danych umożliwiły szacowanie prawdopodobieństw w modeli Markowa z ukrytymi stanami.



Rys. 2. Układ sześciu rodzajów porównań, dla których przeprowadzono symulacje i uzyskano modele Markowa z ukrytymi stanami

## 4.2. Estymacja HMM

Wszystkie rodzaje prawdopodobieństw wykorzystywanych w modelach Markowa z ukrytymi stanami, to jest: początkowe (startowe), przejściowe pomiędzy stanami oraz emisyjne, były estymowane z wykorzystaniem algorytmu Bauma-Welcha (Baum, 1972), który został zaimplementowany przez Murphy'ego (1998, 2005). Maksymalna ilość iteracji tej procedury została ustalona na 1000, a próg konwergencji określono na poziomie 0.0001. Wszystkie estymacje i obliczenia wykonano za pomocą pakietu oprogramowania matematycznego MATLAB (The MathWorks, 2016) w wersji R2016a (9.0.0).

## 4.3. Badania symulacyjne

Dla każdego rodzaju porównania (rys. 2) wykonano eksperyment symulacyjny, mający na celu weryfikację, ile ukrytych stanów będzie najlepiej modelowało wizualne zachowanie się osoby badanej podczas analizy przedstawianych cyfrowych wersji opakowań. Całe badanie obejmowało 30 różnych wariantów eksperymentalnych uwzględniających 6 rodzajów porównań i 5 różnych liczb ukrytych stanów dla każdego z nich.

Ponieważ wyniki estymacji parametrów modeli Markowa z ukrytymi stanami zależą od wartości początkowych, dla każdego z tych 30 badanych modeli proces poszukiwania najlepszego dopasowania wartości prawdopodobieństw do empirycznych sekwencji danych został wykonany 100 razy. Każda z tych 3000 symulacji rozpoczynała się z losowymi początkowymi wartościami prawdopodobieństw dla stanów początkowych, przejść i emisji.

Jakość uzyskanych modeli była oceniana za pomocą kryterium informacyjnego (*Akaike's information criterion* – AIC) zademonstrowanego przez Akaike (1972) i Baysowskiego kryterium informacyjnego (BIC) zaproponowanego przez Schwarz (1978). Uzyskane wyniki symulacyjne podsumowano w tabeli 1, która zawiera zarówno średnie, jak i najlepsze wartości dla AIC, BIC oraz poziomy log-likelihood. W nawiasach podano odchylenia standardowe.

Wskaźniki AIC oraz BIC penalizują wartość prawdopodobieństwa w taki sposób, aby ocena jakości modelu uwzględniała zasadę maksymalnej wiarygodności, przy możliwie niewielkiej liczbie parametrów objaśniających badane zjawisko. Wskaźnik BIC dokonuje tej penalizacji bardziej zdecydowanie. Jak widać z tabeli 1, według AIC najlepszym modelem w każdym przypadku jest model z 4 stanami ukrytymi, za wyjątkiem modelu dla porównania 2, gdzie najlepszą ocenę uzyskał model z 3 stanami. Poszukiwanie HMM dla optymalnej liczby stanów w zależności od zadań porównywania opakowań parami jest próbą odpowiedzi na postawione pytanie badawcze.

Tabela 1. Wyniki symulacji dla modeli Markowa z ukrytymi stanami. W nawiasach podano odchylenia standardowe

L.P.	Nr porównania	Liczba stanów	AIC		BIC		Log-likelihood	
			Średnia	Min.	Średnia	Min.	Średnia	Min.
1.	1	2	1365 (34)	1356	1467 (34)	1458	-657 (17)	-724
2.	1	3	1361 (8)	1354	1524 (8)	1518	-638 (4)	-652
3.	1	4	1371 (13)	1352	1605 (13)	1586	-626 (7)	-645
4.	1	5	1384 (13)	1360	1696 (13)	1672	-612 (6)	-630
5.	1	6	1403 (14)	1375	1801 (14)	1773	-600 (7)	-626
6.	2	2	1639 (48)	1620	1745 (48)	1726	-794 (24)	-858
7.	2	3	1624 (14)	1598	1795 (14)	1768	-770 (7)	-782
8.	2	4	1626 (13)	1600	1870 (13)	1844	-753 (6)	-774
9.	2	5	1641 (16)	1605	1966 (16)	1930	-740 (8)	-764
10.	2	6	1656 (15)	1626	2071 (15)	2040	-726 (7)	-744
11.	3	2	1361 (20)	1350	1462 (20)	1451	-654 (10)	-685
12.	3	3	1358 (12)	1343	1521 (12)	1506	-637 (6)	-661
13.	3	4	1368 (15)	1340	1601 (15)	1573	-624 (7)	-651
14.	3	5	1379 (13)	1352	1689 (13)	1662	-610 (6)	-631
15.	3	6	1398 (13)	1375	1793 (13)	1770	-597 (7)	-617
16.	4	2	1490 (74)	1449	1593 (74)	1552	-719 (37)	-785
17.	4	3	1453 (33)	1429	1619 (33)	1595	-684 (17)	-782
18.	4	4	1453 (19)	1424	1691 (19)	1662	-667 (10)	-697
19.	4	5	1461 (20)	1437	1778 (20)	1754	-650 (10)	-671
20.	4	6	1479 (16)	1458	1883 (16)	1862	-637 (8)	-660
21.	5	2	1728 (83)	1684	1835 (83)	1792	-838 (41)	-927
22.	5	3	1688 (39)	1656	1862 (39)	1831	-802 (19)	-920
23.	5	4	1685 (21)	1651	1933 (21)	1900	-782 (11)	-809
24.	5	5	1689 (19)	1656	2021 (19)	1988	-764 (9)	-788
25.	5	6	1708 (20)	1670	2131 (20)	2093	-752 (10)	-777
26.	6	2	1723 (57)	1700	1831 (57)	1807	-836 (28)	-907
27.	6	3	1700 (28)	1677	1874 (28)	1852	-808 (14)	-902
28.	6	4	1691 (19)	1668	1940 (19)	1917	-785 (9)	-809
29.	6	5	1708 (17)	1684	2040 (17)	2016	-774 (8)	-798
30.	6	6	1722 (13)	1696	2145 (13)	2119	-759 (6)	-777



#### 4.4. Analiza i dyskusja najlepszych modeli HMM

Najlepsze w kategoriach oceny miernikiem AIC modele dla badanych 6 porównań zaprezentowano w tabelach 2-7. Otrzymane w eksperymencie modele (macierze **A**, **B** i wektory **II**) są raczej jakościowo zróżnicowane. Pamiętając, że wyestymowane parametry modeli Markowa dotyczą fiksacji wzroku w poszczególnych obszarach ekranu (AOI z rys. 1), w trakcie porównywania obiektów parami można powiedzieć, że modele opisują (średnie) strategie przenoszenia uwagi jawnej – *overt attention* (Findlay, Gilchrist, 2003). Interpretacja poszczególnych stanów ukrytych polega na analizie prawdopodobieństw emisji, czyli prawdopodobieństw przenoszenia uwagi na poszczególne obszary zainteresowania (AOI z rys. 1). Nawet pobieżna analiza tych prawdopodobieństw pokazuje znaczące zróżnicowanie (szczególnie macierzy **B**) w tabelach 2-7. Takie wyniki sugerują, że modele sterowania uwagą w zadaniu porównywania parami są determinowane kontekstem, a szczególnie czynnikami różnicującymi porównywane obiekty.

Tabela 2. Model Markowa z ukrytymi stanami dla typu porównania 1

Porównanie 1	S1	S2	S3	S4
<b>II</b>	.73	.20	.07	.00
<b>S1</b>	.71	.13	.00	.16
<b>S2</b>	.00	.72	.17	.03
<b>S3</b>	.10	.09	.82	.21
<b>S4</b>	.19	.06	.02	.60
1. G_Task	.05	.01	.00	.00
2. G_Cent	.09	.02	.00	.00
3. G_Scal	.01	.23	.78	.00
4. G_Butt	.00	.61	.00	.00
5. L_Cap	.00	.08	.00	.20
6. L_Con_IN	.14	.00	.04	.00
7. L_Edg_Ro	.15	.00	.00	.08
8. P_Cap	.00	.02	.00	.59
9. P_Con_IY	.41	.03	.08	.00
10. P_Edg_Ro	.14	.00	.10	.14

Tabela 3. Model Markowa z ukrytymi stanami dla typu porównania 2

Porównanie 2	S1	S2	S3
<b>II</b>	.68	.25	.07
<b>S1</b>	.74	.15	.17
<b>S2</b>	.23	.83	.00
<b>S3</b>	.03	.02	.83
1. G_Task	.00	.00	.18
2. G_Cent	.04	.02	.00
3. G_Scal	.00	.73	.03
4. G_Butt	.00	.17	.00
5. L_Cap	.14	.04	.00
6. L_Con_IN	.10	.01	.40
7. L_Edg_Ro	.12	.01	.38
8. P_Cap	.10	.00	.00
9. P_Con_IN	.23	.02	.00
10. P_Edg_Sh	.27	.00	.00

Tabela 4. Model Markowa z ukrytymi stanami dla typu porównania 3

Porównanie 3	S1	S2	S3	S4
<b>II</b>	.62	.23	.08	.06
<b>S1</b>	.58	.26	.08	.27
<b>S2</b>	.00	.69	.07	.00
<b>S3</b>	.39	.00	.71	.00
<b>S4</b>	.03	.05	.14	.73
1. G_Task	.00	.31	.00	.00
2. G_Cent	.00	.00	.00	.04
3. G_Scal	.00	.00	.83	.33
4. G_Butt	.00	.00	.00	.40
5. L_Cap	.00	.35	.14	.00
6. L_Con_IY	.44	.09	.00	.01
7. L_Edg_Ro	.26	.00	.00	.00
8. P_Cap	.14	.19	.02	.00
9. P_Con_IN	.10	.03	.00	.17
10. P_Edg_Sh	.06	.03	.01	.05

Tabela 6. Model Markowa z ukrytymi stanami dla typu porównania 5

Porównanie 5	S1	S2	S3	S4
<b>II</b>	.85	.11	.00	.04
<b>S1</b>	.80	.28	.09	.12
<b>S2</b>	.05	.68	.02	.00
<b>S3</b>	.16	.04	.75	.32
<b>S4</b>	.00	.00	.14	.56
1. G_Task	.00	.28	.00	.00
2. G_Cent	.00	.26	.00	.00
3. G_Scal	.02	.00	.95	.04
4. G_Butt	.00	.23	.00	.96
5. L_Cap	.16	.02	.02	.00
6. L_Con_IY	.30	.00	.00	.00
7. L_Edg_Ro	.12	.01	.00	.00
8. P_Cap	.05	.21	.00	.00
9. P_Con_IY	.23	.00	.00	.00
10. P_Edg_Sh	.12	.00	.03	.00

Tabela 5. Model Markowa z ukrytymi stanami dla typu porównania 4

Porównanie 4	S1	S2	S3	S4
<b>II</b>	.54	.37	.10	.00
<b>S1</b>	.68	.21	.00	.12
<b>S2</b>	.23	.65	.03	.20
<b>S3</b>	.08	.14	.84	.00
<b>S4</b>	.01	.00	.13	.68
1. G_Task	.00	.02	.00	.00
2. G_Cent	.09	.01	.01	.00
3. G_Scal	.02	.00	.86	.17
4. G_Butt	.00	.00	.00	.68
5. L_Cap	.22	.00	.00	.00
6. L_Con_IN	.24	.04	.01	.00
7. L_Edg_Sh	.25	.00	.01	.15
8. P_Cap	.00	.32	.02	.00
9. P_Con_IY	.00	.54	.03	.00
10. P_Edg_Sh	.17	.07	.07	.00

Tabela 7. Model Markowa z ukrytymi stanami dla typu porównania 6

Porównanie 6	S1	S2	S3	S4
<b>II</b>	.90	.10	.00	.00
<b>S1</b>	.75	.00	.09	.12
<b>S2</b>	.00	.90	.12	.00
<b>S3</b>	.10	.05	.79	.26
<b>S4</b>	.15	.05	.00	.62
1. G_Task	.04	.00	.00	.06
2. G_Cent	.05	.05	.00	.00
3. G_Scal	.00	.20	.89	.12
4. G_Butt	.00	.46	.00	.01
5. L_Cap	.16	.04	.04	.00
6. L_Con_IY	.50	.04	.05	.05
7. L_Edg_Sh	.20	.07	.00	.00
8. P_Cap	.03	.10	.00	.16
9. P_Con_IN	.04	.03	.01	.38
10. P_Edg_Ro	.00	.01	.00	.22

Stałą cechą uzyskanych modeli czterostanowych jest występowanie w każdym z nich dwóch stanów, które mogą być kojarzone z analizą i porównywaniem cech oraz dwóch stanów związanych z podejmowaniem decyzji o ocenie i jej potwierdzeniu (w modelu dla porównania 2 jest to jeden stan S2). W obu tych stanach analitycznych, w różnych konfiguracjach pojawiają się prawdopodobieństwa emisji o wysokim poziomie dla wszystkich AOI, związanych z konstrukcją opakowań (obszary 5-10 w Tabelach 2-7). Oznacza to, że w każdym przypadku wszystkie cechy opakowań wpływają na przyjmowaną ocenę.

Dwa stany decyzyjne kształtują się bardzo podobnie. Pierwszy z nich obejmuje głównie uwagę skoncentrowaną na obszarze zainteresowania 3 (*G\_Scal* w Tabelach 2-7.), a drugi na obszarze 4 (*G\_Butt*), w którym umieszczony jest przycisk potwierdzenia. Analizując odpowiednie prawdopodobieństwa w tabelach 2-7 można zauważyć, że odpowiednio dla porównań 1 i 6 są to stany S3, S2 dla pozostałych S3, S4, a dla porównania 2 – jeden stan S2. W tych stanach największe prawdopodobieństwa skupienia uwagi uzyskują odpowiednio AOI 3 oraz 4.

Dwa stany analityczne są bardziej zróżnicowane, ale można wyróżnić jak się wydaje 3 strategie uwagowe. Pierwsza z nich polega na wykonywaniu osobnych porównań cech graficznych w jednym stanie i napisów w drugim. Łatwo wywnioskować taki sposób postępowania w modelach porównań 1 i 3. Odpowiednie stany to S1, S4 dla porównania 1 i S1, S2 dla porównania 3.

Modele uzyskane dla porównań 2, 4 i 6 sugerują stosowanie strategii rozdzielania (bardziej lub mniej wyraźnego) procesu porównania na osobne stany analizy całych obiektów. Stany S1, S3 dla porównania 2 uzyskują największe prawdopodobieństwa skupiania uwagi na cechach graficznych odpowiednio prawego i lewego opakowania. S1 i S2, z kolei, sugerują analizę odpowiednio lewej i prawej strony ekranu porównań dla modelu porównania 4, podobnie jak S1 i S4 dla porównania 6.

Porównanie 5, w którym oba opakowania zawierały obraz graficzny telefonu, reprezentuje model specyficzny. Sugeruje on strategię analityczną złożoną ze stanu S1, w którym następują porównania cech obu opakowań oraz S2, w którym dokonuje się ogólnego porównania obu obiektów, co sugeruje prawdopodobieństwo spoglądania na środek ekranu, czyli w obszary (AOI) 1 i 2. Takie zachowanie pozwala przypuszczać, że w tym przypadku strategia uwagowa zawiera fazę zgodną z hipotezą (modelem) *zoom lens* (Eriksen i James, 1986), według której wzrokowe wyszukiwanie obiektów przebiega w 2 etapach – w pierwszym przetwarza się ogólnie strukturę całego obrazu, ustalając interesujące miejsca, w drugim przetwarza szczegóły. Tak wyraźnego elementu strategii *zoom lens* nie da się zaobserwować w pozostałych modelach, gdzie stany analityczne sugerują dominację hipotezy *spot light*. W tym modelu uwaga jest skupiana sekwencyjnie na szczegółach graficznych sceny (Posner et al. 1980).

Analiza prawdopodobieństw przejść między stanami zawartych w macierzach **A** poszczególnych modeli sugeruje, że pomimo opisanego zróżnicowania, strategie uwagowe mają jednak pewne cechy stabilne. Po pierwsze – w każdym przypadku najbardziej prawdopodobny stan początkowy S1 charakteryzuje się największymi

prawdopodobieństwami emisyjnymi, czyli skupiania uwagi na określonych AOI, najczęściej związanymi z opakowaniem umieszczonym po lewej stronie ekranu lub/i posiadającym zdjęcie produktu. Po drugie – największe prawdopodobieństwa występują na przekątnej macierzy, a to sugeruje częste pozostawanie w danym stanie. Po trzecie – prawdopodobieństwo przejścia ze stanu S1 do drugiego stanu analitycznego jest największe (po prawdopodobieństwie pozostania) dla większości modeli, za wyjątkiem porównania 3, gdzie jest nieco mniejsze, ale porównywalne z kolejnym. Taki stan rzeczy sugeruje, że strategia sterowania uwagą w zadaniach porównania parami w większości przypadków może polegać na dokładnym rozpoznaniu bardziej wyrazistego obiektu, wstępnym porównaniu z drugim (S1) i następnie porównaniu uzupełniającym (S4, S3, S2, S2, S2, S4 – dla kolejnych modeli z tabeli 2). Być może zatem procesy uwagowe w tego typu zadaniach mają charakter hierarchiczny i ciekawym kierunkiem badawczym byłaby tutaj analiza wykorzystująca warstwowe modele ukryte Markowa (Nguyen et al., 2005; Courtemanche, 2011).

## 5. PODSUMOWANIE

Uzyskane w badaniach modele są obiecujące. Modele Markowa pozwoliły uzyskać szczegółowy, ilościowy opis sposobów sterowania uwagą w badanych zadaniach porównywania obiektów parami. Przedstawione wyniki sugerują istnienie zróżnicowanych strategii sterowania uwagą w tych zadaniach. Te strategie mogą być interpretowane w kategoriach rzeczywistych, możliwych działań.

Nie można niestety jednoznacznie powiązać uzyskanych parametrów modeli z cechami porównywanych obiektów. Brak jednoznacznych relacji w tej mierze może wynikać zarówno z projektu eksperymentu, jak i z cech badanej grupy. W pokazanych modelach zaobserwowano na przykład (naturalną) dominację lewej strony ekranu w postaci wyższych prawdopodobieństw emisji dla obszarów zainteresowania (AOI), leżących po lewej stronie sceny. W przyjętych badaniach każdy obiekt występował losowo z lewej lub/i prawej strony, ale warto by w kolejnych badaniach zapewnić realizację podwójnych, symetrycznych porównań.

Badana grupa reprezentowała specyficzną populację, znacząco zróżnicowaną pod względem wiekowym i doświadczenia związanego z komputerami. Byli to studenci Akademii Sztuk Pięknych uczący się zarówno w trybie stacjonarnym, jak i zaocznym i charakteryzujący się ponadprzeciętną wrażliwością na atrybuty estetyczne. W badaniu, które posłużyło do przeprowadzenia modelowania badaniu nie uwzględniono zależności międzyosobniczych. Niewątpliwie interesujące byłyby także badania zależności strategii uwagowych od płci, wieku i innych cech osobniczych.

Zbieżność algorytmu Bauma-Welcha oraz możliwe interpretacje uzyskanych stanów ukrytych pokazują potencjał podejścia HMM w badaniu procesu porównywania parami. Ponieważ taki proces jest szczególnie ciekawy dla sfery komunikacji wizu-

alnej, wyniki tego rodzaju badań mogą być interesujące w wielu sferach aktywności człowieka, takich jak marketing, informatyka czy ergonomia. Szczególnie atrakcyjny wydaje się kierunek poszukiwania relacji parametrów HMM z czynnikami kształtującymi obiekty i cechami osób je porównujących.

## PODZIĘKOWANIA

Praca została częściowo wsparta finansowo w ramach grantu Narodowego Centrum Nauki numer: UMO-2011/03/B/HS4/03925. Dane okulograficzne dla modelowanego eksperymentu zostały zarejestrowane za pomocą systemu udostępnionego przez Laboratorium Jakości Użytkowej Systemów Informacyjnych, które jest częścią projektu BIBLIOTECH współfinansowanego przez Unię Europejską poprzez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego, w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013.

## LITERATURA

- Akaike, H. (1973). Information theory as an extension of the maximum likelihood theory. In: B.N. Petrov, F. Csaki (ed.) *Second International Symposium on Information Theory*. Budapest: Akademiai Kiado, 267-281.
- Baum, L.E. (1972). An inequality and associated maximization technique in statistical estimation for probabilistic functions of Markov processes. In: O. Shisha (ed.) *Proceedings of the 3rd Symposium on Inequalities*, Los Angeles: University of California, 1-8.
- BeGaze Manual, Version 3.6, February (2016). *SMI SensoMotoric Instruments*, document number: 091222-P-1400-001-000-A.
- Chuk, T., Chan, A. B., Hsiao, J. H. (2014). Understanding eye movements in face recognition using hidden Markov models. *Journal of Vision*, 14 (11) : 8, 1-14.
- Chowdhury, A., Karmakar, S., Reddy, S.M., Sanjog, J., Ghosh, S., Chakrabarti, D. (2012). Visual attention analysis on mutated brand name using eye-tracking: a case study. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering*, 6(8), 1132-1135.
- Courtemanche, F., Aïmeur, E., Dufresne, A., Najjar, M., & Mpondo, F. (2011). Activity recognition using eye-gaze movements and traditional interactions. *Interacting with Computers*, 23(3), 202-213.
- Ellis, S. R., Stark, L. (1986). Statistical Dependency in Visual Scanning. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 28(4), 421-438.
- Eriksen, C. W., James, J. D. S. (1986). Visual attention within and around the field of focal attention: A zoom lens model. *Perception & Psychophysics*, 40(4), 225-240.
- Findlay, J.M. and Gilchrist, I.D. (2003). *Active vision. The psychology of looking and seeing*, New York: Oxford University Press.
- Goldberg, J.H., Kotval, X.P. (1999). Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics* 24(6), 631-645.

- Hayashi, M. (2003). Hidden Markov Models to identify pilot instrument scanning and attention patterns. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 3, 2889-2896.
- Liechty, J., Pieters, R., Wedel, M. (2003). Global and local covert visual attention: Evidence from a bayesian hidden markov model. *Psychometrika*, 68(4), 519-541.
- Michalski, R., Grobelny, J., (2016). An eye tracking based examination of visual attention during pairwise comparisons of a digital product's package. In: M. Antona, C. Stephanidis (ed.) *Universal Access in Human-Computer Interaction. Methods, Techniques, and Best Practices, Chapter No: 41, Part I, HCII 2016, Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 9737*, Springer, 430-441.
- Murphy, K. (1998, 2005), *Hidden Markov Model (HMM) Toolbox for Matlab*, Pobrano z: <http://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Software/HMM/hmm.html> (15.03.2017).
- Nguyen, N. T., Phung, D. Q., Venkatesh, S., Bui, H. (2005). Learning and detecting activities from movement trajectories using the hierarchical hidden Markov model. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '05)*, 2, 955-960.
- Posner, M.I., Snyder, C.R., Davidson, B.J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109(2), 160-174.
- Rabiner, L.R. (1989). A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. *Proceedings of the IEEE*, 77(2), 257-286.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the Dimension of a Model. *The Annals of Statistics*, 6(2), 461-464.
- StatSoft (2014). STATISTICA (data analysis software system), version 12. <http://www.statsoft.com>.
- The MathWorks (2016), Matlab, R2016a (9.0.0), Pobrano z: <http://www.mathworks.com/products/matlab/> (15.03.2017).
- Van Raaij, F.W. (1977). Consumer Information Processing for Different Information Structures and Formats. In: W.D. Perreault (ed.) *Advances in Consumer Research*, 4. Atlanta: Association for Consumer Research, 176-184.
- Visser, I. (2011). Seven things to remember about hidden Markov models: A tutorial on Markovian models for time series. *Journal of Mathematical Psychology*, 55(6), 403-415.

**AN APPLICATION OF HIDDEN MARKOV MODELS TO THE ANALYSIS OF  
VISUAL ACTIVITY REGISTERED DURING VIRTUAL PACKAGES  
ASSESSMENT BY MEANS OF PAIRWISE COMPARISONS**

**Summary**

The article presents an attempt of applying stochastic Hidden Markov Models (HMM) to the analysis of human visual activity. The input data for simulation experiments were taken from the empirical investigation concerned with pairwise comparisons of diverse

---

product virtual packages. Simulations involving multiple estimations of HMM parameters were conducted for all distinctive types of comparisons and assuming different quantities of hidden states. The analysis of simulations' results allowed to determine the optimal, in terms of AIC measure, numbers of hidden states. The best models were next analyzed and discussed in the perspective of visual strategies used during pairwise comparisons.

**Keywords:** ergonomics; marketing, digital signage, human behavior, human-computer interactions.

