

Francuz, P. (2007). Wyobrażenia, jako wytwór aktywności mózgowego emulatora procesów motorycznych i percepcyjnych. W: P. Francuz (red.), *Obrazy w umyśle. Studia nad percepcją i wyobrażeniami* (s. 207-230). Warszawa: Wydawnictwo Naukowe SCHOLAR.

Piotr Francuz

## VII. Wyobrażenia jako wytwór aktywności mózgowego emulatora procesów motorycznych i percepcyjnych\*

Celem niniejszego artykułu jest omówienie i krytyczna analiza teorii emulacji<sup>1</sup> reprezentacji, opracowanej przez Ricka Grusha. Teoria ta to jedno z najnowszych rozwiązań, w ramach którego łączy się problematykę procesów kontroli zachowań motorycznych z percepcją wzrokową oraz z wyobrażeniem motoryczną i wyobrażeniem wizualną. Rdzeniem teorii Grusha jest pojęcie emulatora, hipotetycznego mechanizmu neuronalnego, który na poziomie centralnym wiernie realizuje kopie programów motorycznych i percepcyjnych podczas wykonywania przez organizm ruchu. Wyniki aktywności emulatora na bieżąco są korygowane przez tak zwany filtr Kalmana. Chociaż emulator jest mechanizmem, który stale towarzyszy pracy systemów kontroli zachowania motorycznego oraz systemów wykonawczych i sensorycznych, może również pracować w trybie offline i wówczas jego działanie jest równoznaczne z procesami wyobrażeniowymi.

Bezpośrednią inspiracją do napisania niniejszego artykułu stała się lektura publikacji, jaka ukazała się na łamach *Behavioral and Brain Sciences* (dalej

Bardzo dziękuję Annie Szatkowskiej, Piotrowi Markiewiczowi, Pawłowi Fortunie i Magdalenie Szubielskiej za krytyczne uwagi do pierwszej wersji niniejszego artykułu.

<sup>1</sup> Emulacja to wykonywanie jakiegoś procesu, który jest wierną kopią innego procesu. Oba procesy: emulowany i emulujący przebiegają dokładnie w takich samych warunkach, ale są wykonywane na różnych urządzeniach. Emulacja zasadniczo różni się od symulacji. Symulacja to wykonywanie jakiegoś procesu, którego efekty są podobne do rezultatów procesu symulowanego. Komputerowy symulator lotu samolotem prezentuje na ekranie monitora obraz z kabiny pilota oraz pozwala na wykonywanie pewnych czynności przypominających sterowanie samolotem, ale procesy niezbędne do przełożenia czynności wykonywanych przez gracza na obraz wyświetlony na monitorze w niewielkim stopniu przypominają procesy zachodzące w naturalnych warunkach lotu. Przykładem zastosowania emulacji w informatyce jest komputerowy kalkulator, który wykonuje dokładnie takie same procesy obliczeniowe, jakie zostały opracowane dla kalkulatorów Texas Instruments. Program obliczeniowy napisany dla jednego systemu informatycznego (komputera) duplikuje funkcje programu napisanego dla innego systemu (kalkulatora). Układy biologiczne także tworzą identyczne kopie niektórych swoich procesów, dzięki czemu mogą na przykład kompensować funkcje zaburzone w wyniku uszkodzeń organicznych.

w tekście *BBS*) w 2004 roku. Autorem artykułu był Rick Grush, profesor filozofii z Uniwersytetu Kalifornijskiego w San Diego. Zasadniczym celem rozprawy uczynił on nakreślenie ram teoretycznych do rozważań na temat kontroli zachowań motorycznych, wyobraźni motorycznej i wzrokowej oraz percepcji. Poddając pod dyskusję swoje propozycje teoretyczne nie zamierzał bynajmniej przekonywać czytelników, że stoją za nimi niekwestionowane świadectwa empiryczne. Podjął raczej próbę syntetycznego ujęcia wiedzy w interesującym go obszarze badawczym.

W swoim artykule Grush postawił sobie cztery cele. Pierwszym była prezentacja samej teorii emulacji reprezentacji, której rdzeń stanowi koncepcja filtrów Kalmana. Drugim celem było zastosowanie przedstawionej konceptualizacji do zrozumienia niektórych aspektów kontroli motoryki i wyobraźni ruchowej. Celem trzecim uczynił syntezę różnych zagadnień związanych z percepcją i wyobraźnią wzrokową w ramach prezentowanej teorii emulacji reprezentacji. Ostatnim zaś celem było odniesienie przedstawionej teorii do zagadnień z zakresu rozumowania, teorii umysłu i języka.

Tego rodzaju syntetyczne opracowania z jednej strony narażają ich autorów na zarzuty uproszczenia, powierzchowności, a czasem nawet ignorancji - najczęściej bowiem są one formułowane przez specjalistów prowadzących badania eksperymentalne w wąskich dziedzinach wiedzy. Z drugiej jednak strony syntezy są dla nauki jak strumień ożywczej wody, źródło inspiracji generujące nowe hipotezy i kierunki badań.

Siedząc teoretyczne opracowania i towarzyszące im wyniki eksperymentów dotyczących kontroli zachowań motorycznych, wyobraźni i percepcji, Grush dostrzegł, iż większość badaczy podejmujących tę problematykę sugeruje, że łączą je nierozwalne związki. Zauważył jednak również, że za tymi sugestiami nie kryje się żadna wspólna płaszczyzna teoretyczna. Zaproponowana więc przez niego koncepcja emulacji reprezentacji stanowi syntetyczne ujęcie różnych perspektyw teoretycznych i zdaniem jej autora wypełnia zastaną lukę. Teoria bynajmniej nie jest zamknięta, zaś jej weryfikację Grush pozostawia badaczom w różnych dziedzinach wiedzy.

Referując poglądy autora teorii emulacji, czerpałem informacje na jej temat z różnych źródeł. Przede wszystkim oparłem się na jego artykule opublikowanym w *BBS* (2004) oraz na najważniejszych odniesieniach bibliograficznych, na które wskazał. Chcąc wiernie oddać najważniejsze - moim zdaniem - tezy teorii, nie unikałem włączania do niniejszego artykułu ich bardziej lub mniej literalnych tłumaczeń. Niezwykle cennym źródłem informacji były także głosy w dyskusji oraz na riposty autora. Wobec niektórych tez formułowanych przez Grusha zająłem również własne stanowisko krytyczne. Niniejsze opracowanie jest więc wypadkową wszystkich wskazanych źródeł informacji. Zachowuję w nim założenia teorii emulacji, a zarazem akcentuję

te elementy, które dla mnie są najbardziej interesujące z punktu widzenia problematyki wyobraźni.

Główna idea teorii emulacji sprowadza się do stwierdzenia, że mózg, oprócz zaangażowania w aktywność organizmu w środowisku zewnętrznym, wytwarza neuronalne mechanizmy, działające jako wirtualne modele tej aktywności. Są one kopiami różnych procesów, na przykład sensomotorycznych, które warunkują zachowania motoryczne w określonym środowisku zewnętrznym. Modele te pełnią wiele funkcji, ale dwie z nich są szczególnie ważne. Po pierwsze, umożliwiają one formułowanie oczekiwań (hipotez) dotyczących przebiegu procesu (na przykład sensomotorycznego i po drugie, znacznie przyspieszają przetwarzanie informacji sensorycznej. Modele te na ogół działają w trybie online, ale mogą także pracować w trybie offline, i wówczas pełnią funkcję wyobraźni, w której „na sucho” są wytwarzane i oceniane różne plany motoryczne lub percepcyjne.

Teoria emulacji zasadniczo jest rozwijana w kontekście procesów kontroli zachowania motorycznego (*motor control*) i stanowi próbę wyjaśnienia trudności, z którymi nie radzą sobie inne koncepcje w tym obszarze wiedzy. Podstawowym problemem, na który natrafiają badacze mechanizmów kontroli motoryki, jest wyjaśnienie, w jaki sposób mózg może na bieżąco monitorować procesy sensomotoryczne. Czas przesyłania sygnału z mózgu do narządów efektorowych, na przykład mięśni, i *vice versa*, oraz czas niezbędny do przetwarzania informacji sensorycznej jest na tyle długi, że niemożliwe byłoby precyzyjne wykonywanie ruchów z szybkością, z jaką faktycznie są one wykonywane.

Zgodnie z teorią emulacji procesy planowania i kontroli ruchu nie są prowadzone bezpośrednio na linii: centralne ośrodki ruchu - narządy efektorowe, ale w ramach wytwarzanych przez mózg modeli tych procesów, czyli wirtualnych emulatorów zachowania motorycznego w danym środowisku. Ponieważ proces kontroli motoryki obejmuje również procesy sensoryczne, a zwłaszcza widzenia, dlatego teoria nie ogranicza się wyłącznie do problematyki kontroli zachowania motorycznego (choćby chodzenia lub manipulacji przedmiotami), ale obejmuje również zagadnienia związane z percepcją i wyobraźnią wzrokową, w tym również wyobraźnią przestrzenną. To właśnie procesy percepcyjne stanowią podstawę formowania oczekiwań pod adresem systemu sensorycznego i interpretowania napływających za jego pośrednictwem danych. Wirtualne modele ruchu emulują zatem całą pętlę motoryczno-wizualną (*motor-visual loop*).

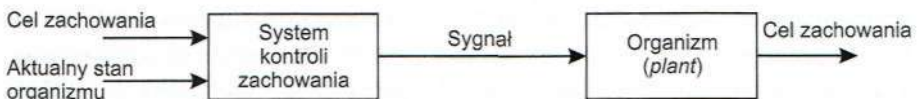
Idea, zgodnie z którą jednym z najważniejszych zadań wykonywanych przez mózg jest wytwarzanie wewnętrznych modeli zewnętrznych stanów i procesów, nie jest nowa. Jako pierwszy sformułował ją Kenneth Craik (1943), a później nawiązywał do niej m.in. Philip Johnson-Laird (1983)

w ramach teorii modeli umysłowych, oraz Stephen Kosslyn (1994) w odniesieniu do wyobraźni. Jak dotąd nie doczekała się ona jednak syntetycznego opracowania.

## 1. Tradycyjne modele kontroli zachowań motorycznych

Najtrudniejszym do wyjaśnienia zjawiskiem związanym z kontrolą zachowania motorycznego jest problem szybkości procesów umożliwiających skuteczne i efektywne wykonywanie zadań motorycznych (zob. Desmurget, Grafion 2000). W odniesieniu do tego zagadnienia wyłoniły się dwie zasadnicze grupy teorii.

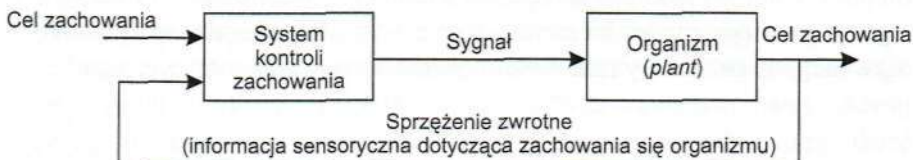
Zgodnie z modelami sprzężenia wyprzedzającego (*feed-forward models*), mózgowie wytwarza całkowity plan ruchu na podstawie informacji o aktualnym stanie ciała oraz zamierzonym celu działania. Plan ten, w formie sekwencji impulsów neuronalnych, jest przekazywany do narządów wykonawczych, które z kolei realizują go w taki sposób, by możliwie jak najdokładniej osiągnąć zamierzony cel (zob. ryc. 1). Dopiero w ostatniej fazie zachowania motorycznego mogą włączyć się systemy kontroli wizualnej, proprioceptywnej i kinestetycznej w celu doprecyzowania zakończenia ruchu zgodnie z zamierzeniem (por. Czarkowska-Bauch 2000). Przedstawione stanowisko opiera się więc na założeniu, że mózg wytwarza całkowity plan ruchu, zaś kontrola dotyczy tylko ostatniej jego fazy na podstawie informacji zwrotnej z narządów zmysłowych. W ten sposób liczba procesów kontrolnych jest ograniczona do niezbędnego minimum, co umożliwia wykonanie ruchu w czasie rzeczywistym.



Ryc. 1. Schemat kontroli zachowań motorycznych zgodnie z modelami sprzężenia wyprzedzającego (*feed-forward models*). Organizm (*plant*) jest systemem kontrolowanym i oznacza system szkieletowo-mięśniowy oraz systemy sensoryczne: proprioceptywne (czucia wewnętrzne) i kinestetyczne (równowagi), a także obejmuje prawidłową aktywność tych systemów oraz losowe zaburzenia ich pracy, na przykład skurcze mięśni lub szum w narządach zmysłowych; na podstawie: Grush R. (2004). *The emulation theory of representation: Motor control, imagery, and perception. Behavioral and Brain Sciences, 27, 378*

Zgodnie z koncepcjami sprzężenia zwrotnego (*feedback models*) mózg nie wytwarza skończonego planu zachowania motorycznego, które w cało-

ści przekazuje do wykonania, lecz je tylko inicjuje w kierunku zgodnym z zamierzonym celem i na bieżąco koryguje na podstawie informacji zwrotnej uzyskiwanej z systemów sensorycznych. Przebieg ruchu jest zatem stale kontrolowany przez systemy sensoryczne (wizualny, proprioceptywny i kinestetyczny), które przekazując zwrotnie informacje do mózgu przyczyniają się do redukcji rozbieżności między zachowaniem motorycznym a jego celem (zob. ryc. 2).



Ryc. 2. Schemat kontroli zachowań motorycznych zgodnie z modelami sprzężenia zwrotnego informacji z systemów sensorycznych do systemu kontroli zachowań motorycznych (*feedback models*). Po inicjacji zachowania motorycznego system kontroli stale przekazuje sygnały w kierunku organizmu na podstawie informacji zwrotnej uzyskiwanej z sensorów (na podstawie: źródło jak wyżej, s. 378)

Niewątpliwie modele sprzężenia zwrotnego, w których zakłada się ciągły przekaz informacji zwrotnej z systemów sensorycznych do systemu kontroli zachowań motorycznych, mają tę przewagę nad modelami sprzężenia wyprzedzającego, że lepiej tłumaczą dokładność wykonania ruchu zgodnie z zamierzonym celem. Ich wadą jest jednak to, że zakładany przez nie system stałego monitoringu zachowania znacznie spowalnia przebieg całego procesu, co czyni takie rozwiązanie mało prawdopodobnym.

W obu przedstawionych koncepcjach proces kontroli zachowania motorycznego obejmuje tworzenie dwóch rodzajów map (planów) określających relacje między: (a) stanem aktualnym przed osiągnięciem celu a stanem zamierzonym (są to tzw. mapy wyprzedzające; *forward mapping*); oraz (b) stanem aktualnym po osiągnięciu celu lub zbliżeniu się do niego, a stanem zamierzonym (są to tak zwane mapy wsteczne; *inverse mapping*).

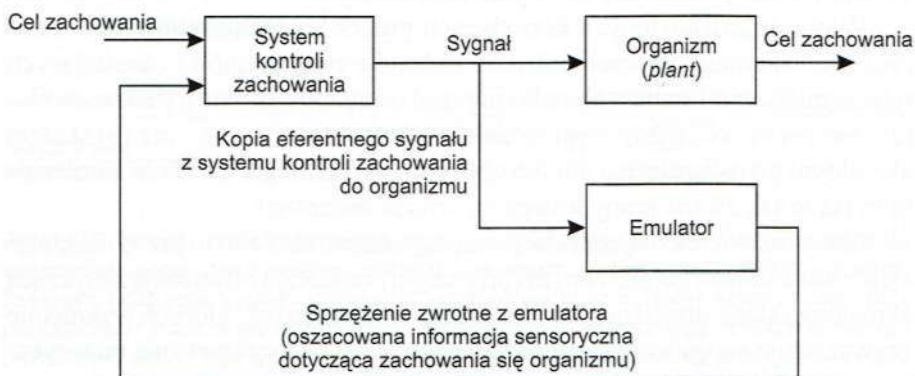
Mapy odzwierciedlające relacje między stanem aktualnym przed osiągnięciem celu a stanem zamierzonym (przyszłym) zawierają informację dotyczącą aktualnego stanu organizmu oraz procedur motorycznych, których wykonanie zagwarantuje osiągnięcie stanu pożądanego, czyli celu zachowania motorycznego. Z kolei mapy odzwierciedlające relacje między stanem aktualnym po osiągnięciu celu lub zbliżeniu się do niego a stanem zamierzonym zawierają informację dotyczącą stopnia, w jakim na obecnym etapie wykonania ruchu cel zachowania motorycznego jest osiągnięty. Krótko mówiąc mapy wyprzedzające (*forward*) są swego rodzaju planem, w jaki sposób przejść od stanu aktualnego do pożądanego, zaś mapy wsteczne (*inverse*) zawierają informację

o poziomie realizacji tego planu. W sytuacji, gdy zamierzony cel zachowania motorycznego jest osiągnięty w 100%, obie mapy powinny być identyczne.

Chociaż obydwa rodzaje map są włączane zarówno do koncepcji sprzężenia wyprzedzającego, jak i zwrotnego, to w obu rozwiązaniach teoretycznych są one konstruowane nieco inaczej. W przypadku modeli sprzężenia wyprzedzającego dominującą rolę odgrywa konstruowanie mapy wyprzedzającej, zaś mapy wsteczne są wytwarzane tylko na ostatnim etapie wykonania ruchu. Z kolei w modelach sprzężenia zwrotnego, akcentujących funkcję stałego monitoringu zgodności ruchu z jego celem, oba rodzaje map są tworzone sekwencyjnie przez cały czas wykonywania zachowania motorycznego.

## 2. Model kontroli zachowania motorycznego za pośrednictwem emulatora ruchu

Założenia obu tradycyjnych modeli kontroli zachowań motorycznych można uzgodnić w ramach rozwijanej od kilku lat koncepcji, zgodnie z którą informacja zwrotna o realizacji celu ruchu pochodzi nie bezpośrednio z narządów zmysłowych, kontrolujących system szkieletowo-mięśniowy, ale z wytworzonego przez mózg wirtualnego modelu, emulującego działanie systemów sensomotorycznych w określonych warunkach zewnętrznych (zob. ryc. 3). Rozwiązanie to łączy zasadnicze idee zawarte w modelach sprzężenia wyprzedzającego (*feed-forward models*) i w modelach sprzężenia zwrotnego (*feedback models*).



Ryc. 3. Uproszczony schemat kontroli zachowań motorycznych zgodnie z koncepcją ciągłego przekazu informacji zwrotnej z emulatora ruchu do systemu kontroli zachowań motorycznych (*emulation model*) (na podstawie: źródło jak wyżej, s. 379)

Wytworzony w systemie kontroli zachowania motorycznego plan ruchu, zakodowany w postaci sygnału, jest kierowany do organizmu (systemu mię-

śniowo-szkieletowego), zaś jego wierna kopia - do emulatora. Ponieważ oba programy ruchu są takie same, można oczekiwać, że wyniki ich działania (czyli zachowanie motoryczne), zarówno rzeczywiste *via* ciało, jak i wirtualne *via* emulator, także powinny być identyczne. Skoro jednak czas przesyłu informacji zwrotnej z emulatora do systemu kontroli ruchu jest nieporównywalnie szybszy (oba są realizowane w mózgu) niż z ciała, to właśnie ze względów czasowych możliwy staje się stały monitoring zachowania motorycznego ukierunkowanego na realizację określonego celu.

Różnice między tymi dwoma sposobami realizacji programu wykonania określonego zachowania motorycznego porównałbym do wykonania tego samego programu komputerowego na komputerze osobistym starej i nowej generacji. To, co przede wszystkim różni te komputery od siebie, to szybkość procesora i zakres pamięci operacyjnej. Ze względu na to, że rynek programów komputerowych (na przykład gier) jest coraz bardziej wymagający, ich twórcy prześcigają się w podnoszeniu jakości i złożoności grafiki. Korzystając z komputera starego typu, który miał niewielką pamięć operacyjną, byłibyśmy skazani na niezbyt szybką pamięć dyskową, a ze względu na stosunkowo wolną komunikację między twardym dyskiem a procesorem prawdopodobnie wiele zaawansowanych funkcji programu w ogóle nie byłoby dla nas dostępnych. Ten sam program uruchomiony na komputerze nowej generacji skorzysta z zasobów pamięci operacyjnej, do której w trakcie jego ładowania skopiuje się wiele użytecznych funkcji, a bywa, że nawet i cały program. Pamięć operacyjna jest w tym przykładzie odpowiednikiem emulatora, który czasowo przechowuje kopię programu ruchowego, zaś twardy dysk - odpowiednikiem mózgowego systemu kontroli motorycznej, który na stałe przechowuje informacje o różnych programach ruchowych wraz z systemami sensomotorycznymi. Oba te systemy zasadniczo różnią się ze względu na czas dostępu do danych oraz kontrolę działania.

Nawiasem mówiąc, Grush w swoim opracowaniu nie kojarzy *explicit*e funkcji emulatora z koncepcją pamięci operacyjnej (*working memory*). Nie odwołuje się również ani do teorii Johna R. Andersona (1983), ani Allana Baddeleya (1998; 2000), ani też Nelsona Cowana (1995), które to teorie wyznaczają współczesną wiedzę na temat struktury i funkcji pamięci pracującej. Jest to o tyle zaskakujące, że koncepcja emulatora, który w trybie online przeprowadza określone operacje pośredniczące między danymi sensorycznymi a systemem generowania sygnału na przykład motorycznego, idealnie wpisuje się w model pamięci operacyjnej. W dyskusji z poglądami Grusha zwrócili na to uwagę tylko japońscy neuronaukowcy Takashi Hanakawa, Manabu Honda, Mark Hallett (2004), zaś w moim przekonaniu teoria emulacji w gruncie rzeczy jest właśnie teorią pamięci operacyjnej.

Koniecznym doprecyzowaniem przedstawionej koncepcji emulatora jest ustalenie zakresu jego „wiedzy” o naturalnym środowisku, w którym naprawdę wykonywany jest program zachowania motorycznego. Bez tej wiedzy emulator nie mógłby realizować przesłanej mu kopii programu w taki sposób, w jaki najprawdopodobniej jest on realizowany „na żywo”. Czym innym bowiem jest program rozumiany jako ciąg instrukcji, a czym innym środowisko, w którym ma on być zrealizowany.

Grush sugeruje, że emulator jest modelem wielozmiennowym (*articulated model*). Zmiennymi (*articulants*) w tym modelu są różne charakterystyki działania systemu szkieletowo-mięśniowego (określające na przykład kąty zginania kości w stawie kolanowym lub zakres ruchu kciuka), które są rejestrowane przez systemy sensoryczne: proprioceptywny i kinestetyczny. Zakresy wartości rejestrowanych przez systemy sensoryczne w odniesieniu do różnych aspektów działania systemu szkieletowo-mięśniowego są zatem przejawami różnych zmiennych, definiujących możliwości i ograniczenia pracy emulatora. Co więcej, emulator zawiera również informację o działaniach samych systemów sensorycznych. Dopiero dysponując kompletnym zestawem informacji na temat zmiennych i ich zakresów, dotyczących funkcjonowania rzeczywistego systemu sensomotorycznego, emulator może wykonać program zachowania motorycznego w taki sam sposób, w jaki jest on wykonywany przez organizm.

Czasem dochodzi jednak do pewnych rozbieżności między działaniem fizycznego i wirtualnego systemu kontroli ruchu. Są dwa możliwe źródła takich rozbieżności. Pierwszym jest naturalna zmiana parametrów działania systemu sensomotorycznego, wywołana systematycznymi okolicznościami (na przykład długotrwałym zmęczeniem lub starzeniem się). Zmiany te Grush określa jako dryft organizmu (*plant drift*), czyli powolne zmienianie się charakterystyki działania, na przykład jakiejś grupy mięśni lub narządu zmysłowego. Drugim powodem rozbieżności między wykonaniem programu ruchu „na żywo” i w emulatorze są nieoczekiwane, przypadkowe zaburzenia pracy systemu sensomotorycznego, wynikające zarówno z wewnętrznych, jak i zewnętrznych (środowiskowych) okoliczności (na przykład nagły skurcz mięśni, zatrucie gazem lub niedostrzeżony w porę sygnał o zbliżającym się niebezpieczeństwie). Emulator musi więc charakteryzować się pewną elastycznością, którą powinien gwarantować mu odrębny system korekty emulowanych parametrów systemu sensomotorycznego. W teorii Grusha taką rolę odgrywa filtr Kalmana (Kalman 1960; Kalman, Bucy 1961).

Zanim przejdę do omówienia koncepcji filtrów Kalmana, warto w tym miejscu przypomnieć, że program zachowania motorycznego nie powstaje w emulatorze, lecz jest do niego kopiowany. Oznacza to, że centralny system kontroli zachowań motorycznych „wie” nie tylko, jak prawidłowo ma



być wykonywany określony ruch, ale „wie” również, w jakim celu ma on być wykonany. To przecież cel zachowania motorycznego na poziomie centralnym inicjuje pracę systemu kontroli zachowania, który generuje określony program wykonawczy. Emulator także „wie”, jak wykonać określony ruch (ta informacja jest zawarta w przesłanej mu kopii programu zachowania motorycznego), „nie wie” natomiast, czemu ten ruch ma służyć. Logika modelu emulacji jest jednak taka, że to właśnie emulator otrzymuje informację dotyczącą zmieniających się parametrów aktywności systemu szkieletowo-mięśniowego, a nie bezpośrednio system kontroli zachowania. Uzyskana informacja pozwala mu na przewidywanie kierunków zmieniających się okoliczności zewnętrznych. Nadal więc, choć „nie wie”, w jakim zmierza kierunku, może działać poprawnie.

Koncepcja tak działającego mechanizmu umysłowego przypomina nieco model automatycznych procesów motywacyjnych (*auto-motive model*) Johna A. Bargha (1999), zgodnie z którym bodźce zewnętrzne mogą bezpośrednio aktywizować cel, a ten następnie bez udziału świadomości (kontroli) będzie sterował przebiegiem procesów poznawczych i zachowaniem się człowieka w świecie. Ponieważ urządzenie odpowiedzialne za emulację rzeczywistego przebiegu na przykład zachowania motorycznego jest „głuche i ślepe” na cel, który właśnie realizuje pod dyktando centralnego systemu generującego sygnał, to może również się zdarzyć, że informacja o stanie systemu wykonawczego zostanie przez niego błędnie zinterpretowana i w informacji zwrotnej do systemu centralnego podsunie mu sugestię dotyczącą innego niż właśnie realizowany cel zachowania motorycznego. Sądzę, że na tego rodzaju błędne interpretacje liczą twórcy komunikatów perswazyjnych, kierujący się zasadą: „zrealizuj cel, który ci sugeruję, a nie ten, który ty chciałbyś zrealizować”.

Innymi słowy może się zdarzyć, że na wyjściu z emulatora pojawią się informacje o takich zachowaniach motorycznych, które są nieadekwatne do sytuacji zewnętrznej. Wystarczy, że emulator otrzyma błędną informację o stanie któregoś z podzespołów systemu sensomotorycznego. Ponieważ „nie wie”, w jakim kierunku zmierza dane zachowanie, uzgodni tę informację z aktualnie wykonywanym programem, odpowiednio go modyfikując. Co więcej, taką zmodyfikowaną informację prześle najszybszą pocztą do centralnego systemu kontroli zachowania i od tej pory o wypadek już nietrudno. System sensomotoryczny otrzyma bowiem do wykonania niewłaściwe instrukcje i zanim cała sytuacja zostanie skorygowana, może pojawić się ruch w niewłaściwą stronę.

Ten aspekt modelu Grusha wydaje mi się szczególnie wartościowy. Tłumaczy on bowiem nie tylko, w jaki sposób mogą być wykonywane prawidłowe zachowania sensomotoryczne ukierunkowane na realizację określonego celu, ale również i to, w jaki sposób dochodzi do zachowań błędnych. Gdyby

przyjąć hipotezę opartą na modelu informacji zwrotnej (*feedback model*), to prowadzona na bieżąco korekta zachowania powinna usuwać wszystkie niedokładności motoryczne. Tak jednak przecież nie jest. Nieraz wykonujemy jakiś ruch z poczuciem, że wykonujemy go poprawnie, podczas gdy wszystko wskazuje na to, że wykonujemy go zgodnie ze stanem emulatora, a nie ze stanem rzeczywistym. Bywa, że ta rozbieżność ma dla nas fatalne skutki.

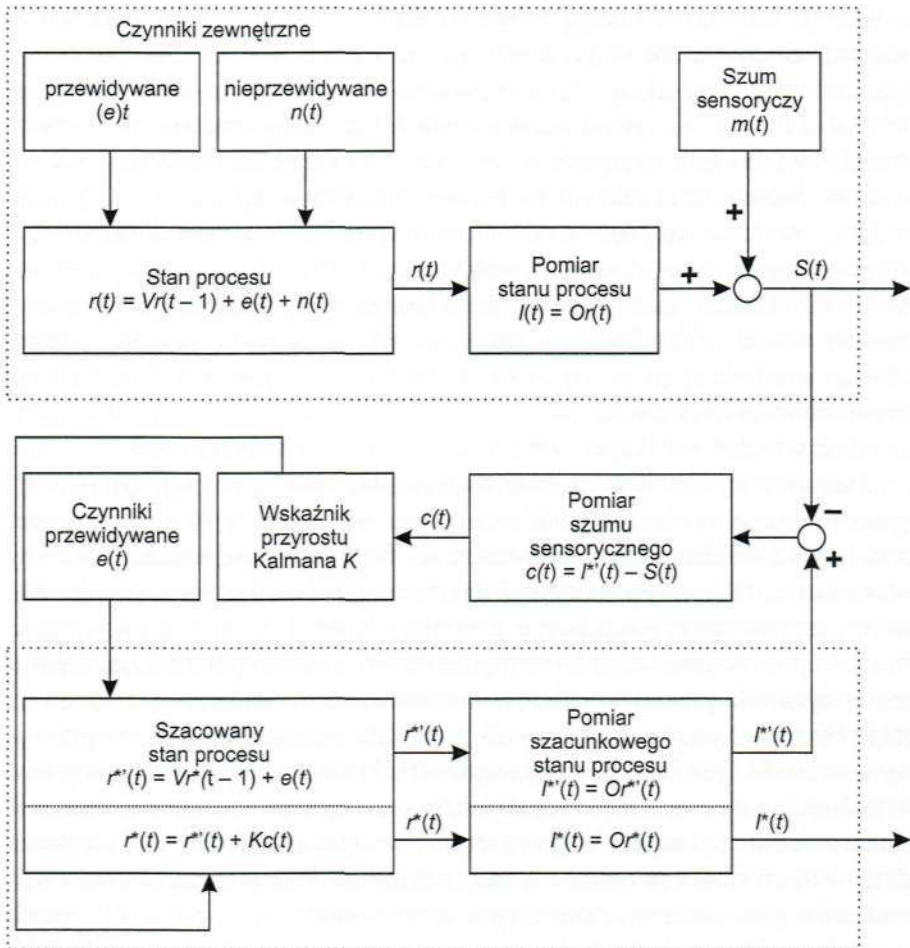
### 3. Filtr Kalmana

Wprowadzenie do modelu emulacji zachowań motorycznych elementów wywodzącej się z inżynierii koncepcji filtra i teorii predykcji Kalmana (Kalman 1960; Kalman, Bucy 1961) może budzić pewne zdziwienie. Grush korzysta jednak z rozwiązań proponowanych przez Kalmana raczej powierzchownie, czerpiąc z nich podstawową formalizację, a przede wszystkim inspirowanie do własnych poszukiwań badawczych.

Opis koncepcji filtra Kalmana Grush rozpoczyna od ogólnej definicji stanu, w jakim znajduje się pewien proces przetwarzania sygnału  $r$  w określonym czasie  $t$ . W każdym momencie stan tego procesu jest wyznaczony przez aktualne wartości zbioru  $k$  zmiennych, które określają względnie stałe warunki jego przebiegu. Jeżeli proces dotyczy przetwarzania sygnału sensomotorycznego, to zbiór  $k$  zmiennych charakteryzuje różne aspekty działania systemu szkieletowo-mięśniowego. Stan procesu jest reprezentowany w modelu teoretycznym jako wektor  $r(t)$ , na który wpływają trzy czynniki: dynamika własna procesu (oznaczona w modelu jako macierz  $V$ ) oraz nieprzewidywane [*process noise*;  $n(t)$ ] i przewidywane [*driving force*;  $e(i)$ ] czynniki zewnętrzne. Dynamika procesu  $V$  jest macierzą  $k \times k$  zmiennych, która w danym czasie  $t$  odwzorowuje wartości procesu  $r(t-1)$  w wartości  $r(t)$ . Jeżeli zatem w danym momencie  $t$  proces jest składową wszystkich trzech czynników, wówczas jego aktualny stan jest funkcją stanu, w jakim był poprzednio, zmodyfikowanego przez przewidywane i nieprzewidywane czynniki zewnętrzne, czyli  $r(t) = Vr(t-1) + e(t) + n(t)$  (zob. ryc. 4).

Miarą stanu procesu  $r(t)$  jest sygnał  $I(t)$  o określonej wielkości. Ze względu na to, że na proces przetwarzania sygnału  $r(t)$  wpływają nieprzewidywane warunki zewnętrzne  $n(i)$ , sygnał  $I(t)$  zawiera w sobie błąd o nieznannej wielkości. Oznacza to, że nieprzewidywane czynniki pojawiające się w zasadniczo stabilnym systemie pracującym w warunkach wyznaczonych przez zbiór  $k$  zmiennych, mogą w istotny sposób modyfikować pierwotny sygnał. Wartość sygnału  $I(t)$  jest zapisywana w macierzy  $O$ , czyli  $I(t) = Or(t)$ .

Sygnał  $I(t)$ , zawierający wszystkie informacje niezbędne do wykonania działania (na przykład reakcji ruchowej) jest przekazywany do urzędzeń



Ryc. 4. Filtr Kalmana (na podstawie: źródło jak wyżej, s. 380)

wykonawczych, które rejestrują go za pomocą własnego systemu sensorycznego. System ten również może być źródłem zniekształcenia wartości sygnału. System sensoryczny, podobnie jak każdy stan procesu  $r(t)$ , również podlega nieprzewidywalnym zakłóceniom [sensor noise;  $m(t)$ ]. Obydwa błędy sprawiają że informacja o wielkości sygnału  $I(t)$  może odbiegać nie tylko od faktycznie wygenerowanej jego wielkości, nieobciążonej żadnymi nieprzewidywanymi czynnikami  $n(t)$ , ale również może różnić się od obserwowanej wielkości tego sygnału, czyli  $S(t)$ , ze względu na szum sensoryczny. Problem polega na tym, że chociaż sygnał obserwowany  $S(t)$  powinien być identyczny z sygnałem  $I(t)$ , mierzonym za pomocą sensorów, to błąd pomiarowy sprawia, że  $S(t) = I(t) + m(t)$ .

System generujący sygnał  $S(t)$  „nie wie”, jaką wartość ma  $m(t)$ . Mamy zatem sytuację, w której system odpowiedzialny za wytworzenie sygnału  $S(t)$

dysponuje błędną informacją o jego wielkości, spowodowaną nieprzewidywanymi zakłóceniami w przebiegu samego procesu oraz pracy urządzeń pomiarowych (sensorów). Przed systemem wytwarzającym ten sygnał pojawia się zatem konieczność oszacowania informacji o rzeczywistej wielkości sygnału  $I(t)$  (tak naprawdę to przecież ten sygnał został wygenerowany w celu uruchomienia reakcji, na przykład motorycznej) poprzez ustalenie, w jakim zakresie wpłynęły nań zakłócenia procesu  $r(t)$ , czyli nieprzewidywane czynniki zewnętrzne  $n(t)$  i szum sensoryczny  $m(t)$ . Gdyby system nie dysponował takimi narzędziami, wówczas nie miałby kontroli nad wynikami swoich działań. Filtr Kalmana (FK) jest właśnie tym urządzeniem, które szacuje wielkość sygnału  $I(t)$ , oczyszczonego z modyfikującego go wpływu czynników zakłócających.

Ocena realnej wielkości sygnału  $I(t)$  przebiega w trzech fazach.

Pierwszy krok polega na oszacowaniu zakresu modyfikacji sygnału  $I(t)$  przez nieprzewidywane czynniki zewnętrzne  $n(t)$ , które wpływają na proces  $r(t)$ . Logika działania filtra Kalmana w tej fazie jest następująca. Po to, aby przewidzieć, jaki wpływ na sygnał  $I(t)$  mają nieprzewidywane czynniki  $n(t)$ , należy na podstawie informacji o przebiegu procesu  $r(t - 1)$ , czyli w czasie bezpośrednio poprzedzającym stan procesu  $r(t)$ , oraz w oparciu o znane parametry dynamiki procesu  $r$ , które są odwzorowane w macierzy  $V$ , oszacować, jaki powinien być stan procesu  $r(t)$ , gdyby nie zadziałały żadne nieprzewidywane zakłócenia tego procesu, czyli  $n(t)$ . Procedura ta, nazwana czasową aktualizacją (*time updated*) sygnału  $I(t)$ , generuje aprioryczne oszacowanie stanu procesu  $r(t)$ , czyli  $r^*(t) = Vr^*(t - 1) + e(t)$ , gdzie  $Vr^*(t - 1)$  oznacza dynamikę procesu  $r$  pozwalającą na przewidywanie jego stanu w czasie  $t$  na podstawie jego stanu w czasie bezpośrednio poprzedzającym ( $t - 1$ ), oraz na podstawie  $e(t)$ , czyli przewidywanych wpływów czynników zewnętrznych (*driving force*). Miarą procesu  $r^*(i)$  jest apriorycznie oszacowana wielkość sygnału  $I^*(t)$  pozbawiona wpływu nieprzewidywanych czynników zakłócających proces  $r(t)$ . Jest ona zapisywana w macierzy  $O$ , czyli  $I^*(t) = Or^*(t)$ .

Druga faza filtrowania informacji polega na porównaniu wyniku apriorycznego oszacowania sygnału  $I^*(t)$  z obserwowanym sygnałem  $S(t)$ . Różnica między tymi dwoma sygnałami nazywa się pozostałością sensoryczną (*sensory residual*) lub korektą resztową (*residual correction*) i jest oznaczona w modelu jako  $c(t)$ . Na jej wielkość wpływają już dwa czynniki o nieprzewidywanych wartościach, czyli zakłócenia w przebiegu procesu  $n(t)$  i szum sensoryczny  $m(t)$ , a ponadto nie wiadomo, który czynnik silniej oddziałuje na wartość sygnału  $S(t)$ . Rozdzielenie obu zmiennych zakłócających ma podstawowe znaczenie na przykład dla kontroli przebiegu zachowania ruchowego. Warto jednak w tym miejscu zwrócić uwagę na to, że z punktu widzenia systemu generującego sygnał, waga informacji na temat obu tych źródeł niekon-

trolowanej zmienności jest różna. Otóż mniej ważna jest informacja, w jakim stopniu nieprzewidywane czynniki zewnętrzne  $n(f)$  zakłóciły przebieg procesu  $r(t)$ , w wyniku którego do wykonania został przesłany sygnał  $I(t)$ . Znacznie ważniejsze jest natomiast to, że system generujący sygnał  $I(t)$  „nie wie”, jaki wpływ na pomiar tego sygnału miał szum sensoryczny  $m(t)$ , który nałożony na sygnał  $I(t)$  mógł spowodować, że sygnały  $S(t)$  i  $I(t)$  różnią się od siebie.

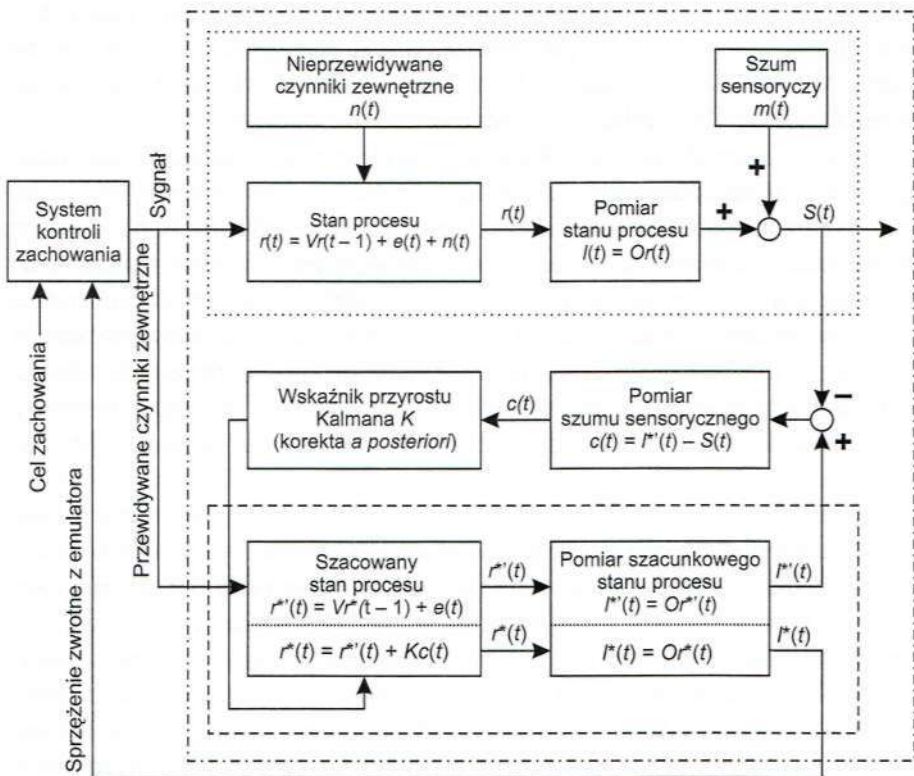
Ostatnia, trzecia faza filtrowania informacji sprowadza się do podjęcia decyzji. Gdyby nieprzewidywane zakłócenia procesu  $r(t)$  były mniejsze niż szum sensoryczny, wówczas aprioryczne oszacowanie sygnału  $I^*(t)$  byłoby bardziej rzetelne niż wielkość obserwowanego sygnału  $S(t)$ . Krótko mówiąc, gdyby  $n(t) = 0$ , wówczas  $c(t) = m(t)$  i  $I^*(t) = I(t)$ . Decyzja, że bardziej rzetelne jest aprioryczne oszacowanie wartości sygnału na wyjściu, oznacza dominację procesu „góra-dół” (*top-down*). Gdyby nieprzewidywane zakłócenia procesu  $r(t)$  były większe niż szum sensoryczny, wówczas aprioryczne oszacowanie sygnału  $I^*(t)$  byłoby mniej rzetelne niż wielkość obserwowanego sygnału  $S(t)$ . Czyli gdyby  $m(t) = 0$ , wówczas  $c(t) = n(t)$  i  $S(t) = I(t)$ . Tym razem decyzja, że bardziej rzetelny jest pomiar sygnału na wyjściu, oznacza uznanie dominacji procesu „dół-góra” (*bottom-up*). Problem polega na tym, że nie wiadomo, która interpretacja jest bardziej prawdopodobna.

Filtr Kalmana dysponuje jednak dodatkowymi wskazówkami, które pomagają mu w rozwiązaniu tego dylematu. Są nimi: szacowana rzetelność informacji sensorycznej oraz rzetelność samego systemu predykcji. W normalnych warunkach działania system sensoryczny na ogół ma niewielką tendencję do „przekłamań” w rejestrowaniu wielkości sygnału. Oznacza to, że informacja o obserwowanym sygnale jest wystarczająco rzetelna do kontroli zachowania. Drugim czynnikiem podnoszącym wartość predykcji jest rzetelność samego systemu wytwarzania apriorycznych oszacowań. Jest to bowiem system uczący się, który w zależności od różnych okoliczności decyzyjnych rejestruje ich trafność.

Ostateczna decyzja, który czynnik w większym stopniu odpowiada za wartość korekty resztowej  $c(t)$ , określa wielkość tak zwanego przyrostu Kalmana (*Kalman gain*). Im niższa jest wartość wskaźnika przyrostu Kalmana, tym bardziej prawdopodobne, że lepszym oszacowaniem sygnału  $I(t)$ , czyli  $I^*(t)$ , jest obserwowany sygnał  $S(t)$ . Wyższy wskaźnik Kalmana oznacza większy wpływ szumu sensorycznego nad nieprzewidywanymi zakłóceniami procesu i prowadzi do wniosku, że lepszym oszacowaniem sygnału  $I(t)$  jest aprioryczny sygnał  $I^*(t)$ . Niezależnie od przyjętego rozwiązania, informacja o wielkości sygnału  $I^*(t)$  jest przekazywana zwrotnie do systemu, który generuje sygnał  $I(t)$ .

Przedstawiony na ryc. 5 model stanowi połączenie dwóch omówionych rozwiązań teoretycznych: modelu emulatora procesów motorycznych

i percepcyjnych (zob. ryc. 3) oraz filtra Kalmana (zob. ryc. 4). Działanie tej hybrydy można zilustrować na przykładzie zjawiska generowania i kontroli zachowania motorycznego. Mózgowy system kontroli zachowania motorycznego przekazuje sygnał z zakodowanym planem zachowania motorycznego do systemu szkieletowo-mięśniowego oraz do emulatora tego systemu, którego zasady funkcjonowania są mu znane. W kolejnych momentach na przebieg i pomiar następujących po sobie stanów procesu przebiegającego w systemie wykonawczym wpływają nieprzewidywane okoliczności zewnętrzne (*process noise*) oraz niedoskonałości urządzeń pomiarowych (*sensor noise*). Czynniki te sprawiają, że sygnał wygenerowany przez korowe ośrodki ruchu i informacja o tym sygnale na wyjściu z systemu wykonawczego mogą się znacznie od siebie różnić. Usuwaniem negatywnych skutków działania czynników zakłócających, a zwłaszcza szumu sensorycznego, zajmuje się filtr Kalmana, który na podstawie przewidywań kolejnych stanów procesu prze-



Ryc. 5. Filtr Kalmana (obwiedziony linią złożoną z punktów i kresek) wprowadzony do modelu emulatora (por. ryc. 3). Linią kropkowaną oznaczono moduły procesu przetwarzania i pomiaru sygnału w organizmie (*plant*), linią przerywaną - w emulatorze (na podstawie: źródło jak wyżej, s. 382)

prowadzanych w zlokalizowanym również w mózgu emulatorze szacuje najbardziej prawdopodobny stan sygnału na wyjściu, nieobciążony „przekłamaniami” generowanymi przez system sensoryczny. Informacja o wielkości tego sygnału jest przekazywana na zasadzie sprzężenia zwrotnego z powrotem do systemu kontroli zachowania, który na tej podstawie na bieżąco koryguje aktualnie realizowany plan zachowania motorycznego.

Na rycinie 5 warto zwrócić uwagę na to, że sygnał z mózgowego systemu kontroli zachowania przekazany zarówno do organizmu, jak i do emulatora jest odpowiednikiem kalmanowskich modułów przewidywanych czynników zewnętrznych  $e(t)$ , które wpływają na kolejne stany procesu  $r(t)$  oraz na kolejne stany szacowanego w emulatorze procesu  $r(t)$ , czyli  $r^*(t)$ .

#### 4. Wyobraźnia motoryczna

Wynik działania filtra Kalmana wyrażony za pomocą wskaźnika przyrostu (*Kalman gain*) może być zinterpretowany w terminach metafory procesów „góra-dół” i „dół-góra”. W zależności od tego, czy system generujący sygnał otrzyma informację zwrotną, że stan sygnału na wyjściu jest zgodny z apriorycznym jego oszacowaniem czy też z obserwowanym pomiarem, mamy do czynienia odpowiednio z procesami „odgórnymi” lub „oddolnymi”. O ile jednak na ogół nie mamy trudności z zaakceptowaniem tezy, że mózg może skutecznie kontrolować nasze zachowanie, ponieważ otrzymuje informację zwrotną z narządów zmysłowych (proces „dół-góra”), o tyle trudniej jest nam się zgodzić z tym, że mózg mógłby kontrolować zachowanie na podstawie wytworzonych przez siebie hipotetycznych stanów tych narządów („góra-dół”).

Zgodnie z przedstawionym na rycinie 5 modelem emulacji reprezentacji należałoby przyjąć, że tak naprawdę zachodzi tylko ta druga możliwość. System generujący sygnał jest powiadamiany o stanie receptorów pośrednio, a wiadomość ta jest wynikiem porównania obserwowanego i szacowanego stanu procesu. Jednocześnie warto zauważyć, że znajomość zasad funkcjonowania systemu emulacji procesu przetwarzania sygnału generowanego przez mózg, który skutecznie wpływa na pracę tego systemu, otwiera ogromne pole dla badań nad wyobraźnią, i to nie tylko wyobraźnią motoryczną. Najpierw warto jednak nieco dokładniej przyjrzeć się zagadnieniom poruszonym w obszarze badań nad wyobraźnią motoryczną.

Dominującą teorią wyjaśniającą funkcję wyobraźni motorycznej w procesie kontroli zachowań motorycznych jest teoria symulacji. Zgodnie z tą teorią wyobraźnia motoryczna jest uwewnętrznioną operacją przebiegającą w korowych ośrodkach motorycznych, symulującą w trybie offline (tzn. bez

angażowania systemu szkieletowo-mięśniowego) przebieg określonego ruchu ciała. Wyobraźnia motoryczna jest formą podprogowej aktywizacji systemu motorycznego (Jeannerod 2001; Jeannerod, Frak 1999; Johnson 2000).

Pomimo pewnych podobieństw, teoria symulacji oraz teoria emulacji reprezentacji stanowią zasadniczo różne rozwiązania teoretyczne. Obie koncepcje są wspierane przez podobne dane empiryczne, zgodnie z którymi wyobraźnia motoryczna aktywizuje ośrodki w mózgu odpowiedzialne za generowanie sygnału motorycznego, a zwłaszcza korę przedruchową, dodatkową (*supplementary*) okolicę ruchową (MII) i mózdzek. Wyobraźnia motoryczna nie aktywizuje więc tylko pierwotnej kory ruchowej (przegląd zob. Jeannerod 2001). Scott H. Johnson (2000) stwierdził, że planując w wyobraźni możliwe najdogodniejszy uchwyt przedmiotu ludzie na ogół korzystają z takich rozwiązań, które byłyby komfortowe w sytuacji, w jakiej aktualnie znajduje się ich ciało. Oznacza to, że zachodzi ścisły związek między wyobrażeniem sobie reakcji ruchowej a aktualnymi wartościami zmiennych definiujących stan urządzeń wykonawczych.

Teoria symulacji nie proponuje jednak żadnego rozwiązania wyjaśniającego, w jaki sposób przebiega wewnętrzny proces wyobrażeniowy; krótko mówiąc, nie postuluje żadnego odpowiednika emulatora. Głosi jedynie, że proces wyobrażeniowy jest rodzajem swobodnej aktywności (*free-spinning*) mózgowych ośrodków przedruchowych, nieangażujących systemu szkieletowo-mięśniowego. Oznacza to, że z punktu widzenia tej teorii sama aktywność ośrodków motorycznych jest warunkiem wystarczającym dla wyjaśniania procesu wyobrażeniowego.

Zgodnie z założeniami teorii emulacji, proces wyobrażeniowy przebiega wewnątrz emulatora, dysponującego kompletną informacją dotyczącą zakresów działania systemu wykonawczego. W tym sensie sama aktywność ośrodków korowych odpowiedzialnych za ruch tutaj nie wystarcza. Konieczny jest jeszcze jeden moduł - mózgowy emulator systemu szkieletowo-mięśniowego.

Obrońcy teorii symulacji utrzymują, że wyobrażeniowe planowanie ruchu koniecznie obejmuje zarówno generowanie sygnału w postaci komend do wykonania przez system motoryczny, jak i sensoryczny pomiar wykonania tych komend. Z kolei zgodnie z teorią emulacji, umysłowa reprezentacja ruchu oraz proprioceptywne i kinestetyczne jego odczucia mają nie tylko inny format, ale są także oddzielone od siebie czasowo (wyobrażenie ciągu komend następuje wcześniej, zaś pomiary sensoryczne - później).

Tę odmienną zjawisk obserwuje się u pacjentów z kończynami fantomowymi. Grush, powołując się na rozmowę z Vilayanurem Ramachandranem, dyrektorem Center for Brain and Cognition w Uniwersytecie Kalifornijskim w San Diego twierdzi, że pacjenci, którzy niedawno mieli amputowaną kończynę, mogą planować i odczuwać ruch w wyobraźni, natomiast pacjenci, któ-



rzy mieli dawno amputowaną lub od dawna sparaliżowaną kończynę, mogą bez trudu planować ruch, ale utracili zdolność do jego odczuwania. O ile teoria symulacji nie jest w stanie wyjaśnić tego efektu, o tyle dobrze tłumaczy go teoria emulacji. U pacjentów, którzy od dawna mają usuniętą kończynę, emulator utracił dostęp do tej części parametrów systemu wykonawczego, które opisywały zasady funkcjonowania nieużywanych już sensorów. Z powodu braku kończyny wygasła procedura porównywania sygnału na wyjściu z szacowaną wielkością sygnału w emulatorze, ponieważ nie generowała już żadnych wyników. Procedura ta służy przecież przede wszystkim ocenie wielkości szumu sensorycznego, a od czasu amputacji kończyny (wraz z całym jej systemem sensorycznym) wartość szumu wynosi 0. Grush sugeruje w tym przypadku coś w rodzaju mentalnego paraliżu systemu sensorycznego. Amputacja kończyny nie musi jednak prowadzić do zaniechania wykonywania procedury przekazywania sygnału zawierającego komendy ruchu z ośrodków korowych do emulatora. Dlatego właśnie ci pacjenci zachowali zdolność do wyobrażeniowego planowania ruchu. Możliwość wyobrażeniowej emulacji procesów motorycznych i sensorycznych stanowi jeden z powodów wprowadzonego przez Grusha podziału emulatorów na modalne i amodalne, będącego przedmiotem jednego z następujących podrozdziałów.

## 5. Wyobrażenia wzrokowa

Podobnie jak w przypadku wyobraźni motorycznej, jest wiele empirycznych danych wskazujących na to, że procesom wyobraźni wizualnej oraz widzeniu towarzyszy aktywność tych samych pól w mózgu, a zwłaszcza tak zwanej pierwotnej kory wzrokowej. Posługując się terminologią teorii emulacji, umysłowy obraz, który określamy jako wyobrażenie wzrokowe, jest wytworem modalnego emulatora wzrokowego. Podczas percepcji wzrokowej emulator służy do konstruowania modelu tego, co spostrzegamy. Jest on więc mózgowym mechanizmem neuronalnym, przeznaczonym do stawiania hipotez percepcyjnych, aktywnym zarówno podczas zewnętrznej stymulacji, jak i wtedy, gdy jej nie ma, a tylko chcemy sobie coś wyobrazić.

Wiele danych empirycznych wskazuje na to, że kontrola procesu widzenia przebiega w podobny sposób, jak kontrola zachowań motorycznych. Oba systemy pracują na apriorycznie oszacowanych wielkościach sygnału generowanego przez odpowiednie ośrodki korowe. W przypadku wyobraźni wzrokowej modelem procesu przetwarzanym na „wyobrażeniowym ekranie” w emulatorze jest sekwencja jego stanów w kolejnych jednostkach czasu (zob. Kosslyn 1994; 2005). W tym znaczeniu widzenie jest ciągiem sygnałów, które można opisać za pomocą kolejnych stanów procesu skaningu „wyobrażeniowego

ekranu" (przesunięcia uwagi wzrokowej) lub stanów procesu wytwarzania kolejnych obrazów umysłowych o określonej rozdzielczości. Można więc oczekiwać, że procesy odpowiedzialne za wyobraźnię wzrokową i motoryczną nie tylko przebiegają w podobny sposób, ale są ze sobą funkcjonalnie związane. Innymi słowy, procesom percepcyjnym powinna towarzyszyć aktywność w polach ruchowych (w zależności od procesu odpowiedzialna za skaning ekranu lub ruchy gałek ocznych).

Grush omawia zagadnienie wyobraźni wzrokowej odwołując się do specyficznego przykładu badań nad procesami uczenia się systemów inteligentnych. Mówiąc dokładniej analizuje zachowanie się robota Murphy'ego, który nabywa umiejętność sprawnego poruszania się w przestrzeni na podstawie jej „obserwacji” za pomocą kamery wideo (Mel 1988). Dane uzyskiwane przez robota są magazynowane w formie dwuwymiarowej matrycy odpowiadającej wizualnej reprezentacji tej przestrzeni. Sposób konstruowania reprezentacji przestrzeni przez MURPHY'ego jest zdaniem Grusha podobny do kodowania w mózgu sekwencji ruchów, które umożliwiają organizmom żywym orientację w przestrzeni.

Szczególnie interesujące w tym kontekście są wyniki badań aktywnego mózgu, w których stwierdza się aktywność w polach ruchowych podczas wykonywania niektórych operacji wyobraźniowych, wymagających na przykład rotacji wizualnych i motorycznych (Richter i in. 2000; Lamm i in. 2001; Wexler, Kosslyn, Berthoz 1998). W eksperymentach przeprowadzonych przez Marka Wexlera, Stephena Kosslyna i Alaina Berthoza (1998) osoby badane musiały równocześnie wykonywać dwa zadania wymagające rotacji obiektu: w wyobraźni i manualnie. Jedna grupa rotowała obiekty w tym samym kierunku, druga - w przeciwnych. Wyniki w pierwszej grupie były znacząco wyższe (szybsze i dokładniejsze) niż w drugiej. Zdaniem Grusha jest to dana empirycznie wskazująca na istnienie emulatora ruchu. Jest on tym mechanizmem neuronalnym, który zaangażowany w wykonywanie zachowań motorycznych (zarówno na przedmiotach rzeczywistych, jak i wyobrażonych) nie może w tym samym czasie symulować dwóch zachowań, których kierunki są przeciwne. Jednocześnie wyniki tych badań potwierdzają sugestię, że system generowania planu ruchu (sekwencji komend) i system sensorycznej kontroli tego ruchu należą do dwóch oddzielnych faz procesu kontroli ruchu (zob. wyniki badań nad kończynami fantomowymi).

## 6. Modalny i amodalny emulator

Rozpoczynając rozważania nad wyobraźnią wzrokową Grush wprowadza rozróżnienie między wyobraźnią modalną i amodalną. Wyobraźnia

modalna opiera się na emulacji systemu sensorycznego, zaś wyobraźnia amodalna na emulacji stanu organizmu i środowiska. Aktywność obu rodzajów wyobraźni Grush przypisuje dwóm emulatorom: modalnemu i amodalnemu. Jednocześnie broni zasadności takiego podziału emulatorów argumentując, że przedmiot percepcji może nie być zmysłowo rozpoznawany, a zarazem być lokalizowany (na przykład czad unoszący się z pieca). System emulacji może też opracowywać sygnał dotyczący zachowania motorycznego, a zarazem nie odczuwać skutków jego działania (jak ma to miejsce w przypadku osób z fantomowymi kończynami). Grush twierdzi, że amodalny emulator może współpracować z różnymi modalnymi emulatorami, na przykład wzrokowym i słuchowym. Współpracując z każdym z nich szacowałby odpowiednio sygnał wizualny i słuchowy, uwzględniając specyfikę danej modalności.

Zdaniem Grusha centralny system nerwowy najprawdopodobniej wytwarza wiele emulatorów, które mogą ze sobą współdziałać. Z drugiej jednak strony niektóre emulatory mogą być od siebie zupełnie niezależne, na przykład emulator systemu szkieletowo-mięśniowego oraz emulator ruchów sakkadowych zlokalizowany w tylnej korze ciemieniowej. Teoria emulacji nie zakłada, że istnieje jeden system kontroli czy jedna strategia przetwarzania informacji. Kontrola zachowań motorycznych jest zaledwie przykładem być może wielu, ale z całą pewnością nie wszystkich procesów zachodzących w mózgu.

Niezależnie jednak od stanowiska Grusha w tej sprawie, zaproponowany przez niego podział emulatorów nie znalazł pełnej akceptacji w komentarzach do jego artykułu. Zarzucano mu brak odpowiednich podstaw empirycznych lub nadmierną komplikację modelu. Jedynie wspomniani już Hanakawa, Honda i Hallett (2004) uznali pomysł Grusha za interesującą perspektywę interpretacji własnych wyników badań. Z kolei Krish Sathian (2004) postulował, żeby zrezygnować z koncepcji amodalnego emulatora współpracującego z wieloma emulatorami modalnymi na rzecz emulatora multimodalnego, który w ramach jednego modułu realizowałby zadania przypisane emulatorowi określonego procesu psychicznego.

Jeśli amodalna emulacja odpowiadałaby za wirtualną reprezentację zbioru  $k$ -zmiennych (*articulants*) definiujących zakresy działania na przykład systemu szkieletowo-mięśniowego oraz za reprezentację stanów środowiska, to rozróżnienie emulatorów na modalne i amodalne wskazywałoby tylko na dwa funkcjonalnie różne aspekty struktury tego samego emulatora, a nie na dwa rodzaje emulatorów. Amodalność dotyczyłaby parametryzacji zbioru zmiennych i ich zakresów, wyznaczających warunki wirtualnego środowiska, w którym realizowany byłby określony program generowany na przykład przez korowe ośrodki ruchu. Z kolei modalność odnosiłaby się do określonej grupy sensorów, i ze względu na to, jaka byłaby to grupa, mówilibyśmy

o zachowaniach motorycznych (kontrola proprioceptywna i kinestetyczna), wzrokowych, słuchowych, smakowych itd. Innymi słowy postulowana przez Grusha amodalność, która miałaby odnosić się wyłącznie do zasad funkcjonowania urządzeń wykonawczych, nie jest możliwa do utrzymania, ponieważ bez kontroli sensorycznej urządzenia te funkcjonowałyby chaotycznie. System emulacji musi stale kontrolować parametry swojego działania, ponieważ mają one tendencję do zmieniania się w czasie, na przykład w wyniku wspomnianych procesów starzenia się czy zmęczenia.

Rozróżnienie emulatorów na modalne i amodalne uważam za najłabsze rozwiązanie w koncepcji Grusha. Niepotrzebnie komplikuje ono model systemu, tym bardziej, że wprowadzona przez niego formalizacja związana z opisem filtra Kalmana zawiera opis macierzy  $V$  niezbędnej do oceny dynamiki procesu na podstawie zmieniających się stanów w zbiorze  $k$  zmiennych. Macierz zdefiniuje zatem ten aspekt emulatora, który Grush nazywa emulatorem amodalnym i zupełnie niepotrzebnie oddziela strukturalnie od procesu. Propozycję Grusha w tym punkcie można by porównać do symulacyjnej gry komputerowej, na przykład jazdy samochodem, która składałaby się z dwóch oddzielnych gier: symulatora zakresu parametrów jazdy samochodem i symulatora samej jazdy. Jedna symulacja bez drugiej nie jest możliwa. Pierwsza wyznacza warunki przebiegu drugiej i dopiero obie razem tworzą grę.

## 7. Percepcja

W psychologii i w filozofii rozróżnia się pojęcie wrażliwości zmysłowej (*sensation*) od percepcji (*perception*). Pierwsze odnosi się do reakcji narządów zmysłowych, drugie do interpretacji tych stanów, którym odpowiada poznawcza reprezentacja rejestrowanych przez nie elementów środowiska. Percepcja jest interpretacją sygnałów sensorycznych. Dobrym przykładem ilustrującym różnicę między danymi sensorycznymi i percepcją jest sześcian Neckera, który dla tego samego zbioru danych zmysłowych generuje dwie różne interpretacje percepcyjne.

Zadaniem emulatora jest oszacowanie wartości zmiennych dla różnych aspektów środowiska, w którym znajduje się organizm, na podstawie rejestrów zmysłowych. W tym kontekście warto sobie uświadomić, że jeżeli system kontroli motorycznej ma skutecznie działać, to cel zachowania, który inicjuje proces generowania sygnału inicjującego owo zachowanie na poziomie systemu wykonawczego, musi być wyrażony w takim samym formacie, w jakim gromadzona jest informacja płynąca z systemu sensorycznego, rejestrującego kolejne stany, w jakich ten system się znajduje. Innymi słowy, cel zachowania motorycznego musi być zdefiniowany jako zbiór określonych wartości sta-

nów systemu szkieletowo-mięśniowego, rejestrowanych za pomocą sensorów proprioceptywnych i kinestetycznych. Co więcej, dane na temat tego, jaki jest świat zewnętrzny (czyli na przykład co się z nim dzieje pod wpływem naszego ruchu lub jakie stawia opory) system uzyskuje wyłącznie na podstawie różnicy między danymi o obserwowanym stanie procesu  $S(t)$  a jego oszacowaniem, czyli  $I^{*}(t)$ . Dopiero interpretacja tej różnicy pozwala na formułowanie przewidywań dotyczących struktury i morfologii świata.

Teoria emulacji wyjaśnia, jak to jest możliwe, że dokładnie ten sam system jest odpowiedzialny za generowanie wyobrażeń wizualnych i percepcję wzrokową. Nawiasem mówiąc propozycja Grusha w pewnym sensie jest rozbudowaniem modelu procesu wyobrażeniowego Kosslyna (1994), wzbogaconym o filtr Kalmana. Co więcej, przewidywania i wyniki badań Kosslyna dotyczące związków między wyobraźnią wzrokową i motoryczną dają się również bardzo łatwo wyjaśnić w ramach teorii emulacji. Idee te mają również wsparcie w wynikach badań Duhamela, Colby'ego i Goldberga (1992). Odkryli oni w korze ciemieniowej małp neurony, które na podstawie aktualnego stanu receptorów wzrokowych (*retina image*) oraz aktualnie wykonywanej procedury ruchu gałki ocznej (*saccade motor command*) antycypują następny stan receptorów wzrokowych. Neurony te „zachowują się” tak, jak chwilę później „zachowują się” neurony w korze wzrokowej odpowiedzialne za odbiór sygnału z narządów zmysłowych. Odkrycie to, całkowicie zgodne z teorią emulacji, być może stanowi dziś jeden z przyczynków do kopernikańskiego odwrócenia porządku relacji między światem a mózgiem/umysłem. To nie świat zewnętrzny stymuluje mózg, dzięki czemu ujawnia się on naszej świadomości, lecz odwrotnie, to mózg/umysł antycypując przeszłe stany współpracujących z nim narządów zmysłowych kontroluje je w taki sposób, by odpowiadały one jego wizji świata. Stanowisko takie podziela m.in. Rodolfo Llinas z Uniwersytetu Nowojorskiego.

### Podsumowanie

Teoria emulacji reprezentacji jest koncepcją systemu przetwarzania informacji, który wytwarza i obsługuje emulator różnych dziedzin poznawczej aktywności człowieka. Emulator jest ściśle związany z systemem kontroli zachowania.

System kontroli zachowania korzysta z emulatora w celu:

- (1) przyspieszenia procesu uzyskiwania informacji zwrotnej z systemów wykonawczych; system kontroli zachowań motorycznych korzysta z informacji płynącej raczej z równoległe działającego emulatora niż bezpośrednio z danych sensorycznych;

- (2) podniesienia jakości procesów przetwarzania informacji sensorycznej, nawet wtedy, gdy nie istnieje opóźnienie w przesyłaniu informacji zwrotnych z systemów wykonawczych;
- (3) konstruowania przewidywań, m.in. dotyczących stanów narządów sensorycznych;
- (4) planowania, w jakim kierunku mogą prowadzić aktualne zachowania, wyobraźniowego ćwiczenia różnych zachowań, a także marzenia (te funkcje wiążą się z emulatorem aktywnym w trybie offline).

Czynnikiem, który w trybie online szacuje najbardziej prawdopodobne efekty pracy systemu kontroli zachowania, jest filtr Kalmana. Jego zastosowanie do koncepcji emulacji reprezentacji pozwala na rozwiązanie ważnej kwestii uzgodnienia stanów procesu przebiegających w rzeczywistości i w emulatorze.

Emulator pracujący w trybie offline generuje proces wyobraźniowy, który przebiega bez konfrontacji z informacją zwrotną płynącą z receptorów, czyli bez angażowania filtra Kalmana. Proces ten jest ograniczony aktualną „wiedzą” emulatora na temat zakresów zmiennych wyznaczających działalność systemów wykonawczych i sensorycznych „na żywo”.

Grush nie rozstrzyga wszystkich konsekwencji przyjętej przez siebie funkcjonalnej architektury modelu dla rozumienia wyobraźni, ale wskazuje na zagadnienia, które jego zdaniem mogą otworzyć interesującą perspektywę badań przyczyniających się do rozwoju zarówno teorii emulacji, jak i teorii wyobraźni. Pierwszym tematem, na który zwraca uwagę, jest dynamiczność *vs.* statyczność wyobrażanych scen. Grush twierdzi, że proces wyobrażania sobie stabilnej sceny, na przykład wazonu z kwiatami, nie angażuje amodalnego emulatora ze względu na to, że wyobraźniowa percepcja tej sceny nie wymaga odwołania się do kategorii ruchu. Z kolei powołując się na badania Kosslyna (1994) i Wexlera i in. (1998) twierdzi, że wyobrażenie sobie sceny dynamicznej (na przykład rotowanej figury lub przelatującej piłki) wymaga aktywizacji amodalnego emulatora. Nie podejmując już w tym miejscu dyskusji dotyczącej rozróżnienia emulatorów na modalne i amodalne, dość powiedzieć, że nie jest takie oczywiste, czy wyobraźniowy skanینگ obrazu umysłowego (na przykład wazonu z kwiatami) nie wymaga aktywizacji procedur ruchowych. Stabilność sceny nie jest równoznaczna ze stabilnością eksploracji tej sceny, czego najbardziej ewidentnym przykładem w odniesieniu do percepcji wzrokowej są mimowolne ruchy gałek ocznych.

Innym zagadnieniem, na które Grush zwraca uwagę, jest rozróżnienie wyobrażeń wzrokowych w zależności od ich związku z przestrzenią. Na przykład kolor czy kształt wyobrazonego obiektu stabilnego niekoniecznie, jego zdaniem, aktywizuje amodalny emulator, podczas gdy wyobrażenie sobie tego obiektu w określonej przestrzeni, na przykład na wprost oczu lub z dołu, powoduje konieczność aktywizacji procedur ruchowych.

Podsumowując, Grush słusznie podkreśla, że wyobrażnię motoryczną i wizualną łączą ściśle związki. Oba procesy, podobnie jak zachowania motoryczne i percepcja wzrokowa (lub na przykład słuchowa u osób niewidomych) są ze sobą silnie związane. Po drugie Grush zwraca uwagę na to, że proponowany przez niego model pozwala w jednym rozwiązaniu teoretycznym uchwycić te relacje, które badacze problematyki wyobraźni wzrokowej i wyobraźni motorycznej na ogół sztucznie od siebie oddzielają. Wreszcie po trzecie twierdzi, że nie ma żadnego powodu, aby do tego samego modelu wyjaśniającego nie włączać innych rodzajów modalności zmysłowych. W ten sposób teoria emulacji zyskuje status ogólnego modelu umysłu.

## Bibliografia

- Anderson J.R. (1983). *The Architecture of Cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Baddeley A. (1998). *Pamięć. Poradnik użytkownika* (przekł. E. Kołodziej-Józefowicz). Warszawa: Prószyński i S-ka.
- Baddeley A. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417-421.
- Bargh J.A. (1999). Automatyzmy dnia powszedniego. *Czasopismo Psychologiczne*, 5, 209-256.
- Cowan N. (1995). *Attention and Memory: An Integrated Framework*. Oxford: Oxford University Press.
- Craik K. (1943). *The Nature of Explanation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Czarkowska-Bauch J. (2000). Wpływ informacji dotykowych i bólowych na zachowanie ruchowe, w: T. Górski i in. (red.), *Mózg a zachowanie* (236-251). Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Desmurget M., Grafton S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 423-431.
- Duhamel J.-R., Colby C, Goldberg M.E. (1992). The updating of the representation of visual space in parietal cortex by intended eye movements. *Science*, 255, 90-92.
- Grush R. (2004). The emulation theory of representation: Motor control, imagery, and perception. *Behavioral and Brain Sciences*, 27, 311-442
- Hanakawa T, Honda M., Hallett M. (2004). Amodal imagery in rostral premotor areas. *Behavioral and Brain Sciences*, 27, 406-407.
- Hanakawa T, Honda M., Sawamoto N., Okada T, Yonekura Y., Fukuyama H., Shibasaki H. (2002). The role of rostral Brodmann area 6 in mentaloperation tasks: An integrative neuroimaging approach. *Cerebral Cortex*, 12, 1157-1170.
- Jeannerod M. (2001). Neural simulation of action: A unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage*, 14, 103-109.
- Jeannerod M., Frak V. (1999). Mental imaging of motor activity in humans. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 735-739.

- Johnson S.H. (2000). Imagining the impossible: Intact motor representations in hemiplegias. *NeuroReport*, 11, 729-732.
- Johnson-Laird Ph.N. (1983). *Mental Models*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kalman R.E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 82, 35-45.
- Kalman R.E., Bucy R.S. (1961). New results in linear filtering and prediction theory. *Journal of Basic Engineering*, 83, 95-108.
- Kosslyn S.M. (1994). *Image and Brain: The Resolution of the Imagery Debate*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Kosslyn S.M. (2005). Mental images and the brain. *Cognitive Neuropsychology*, 22, 333-347.
- Lamm C, Windischberger C, Leodolter U., Moser E., Bauer H. (2001). Evidence for premotor cortex activity during dynamic visuospatial imagery from single-trial functional magnetic resonance imaging and event-related slow cortical potentials. *Neuroimage*, 14, 268-283.
- Mel B.W. (1988). MURPHY: A robot that learns by doing, w: D.Z. Anderson (red.), *Neural Information Processing Systems* (1-14). American Institute of Physics.
- Richter W., Somorjai R., Summers R., Jarmasz M., Menon R.S., Gati J.S., Georgopoulos A.P., Tegeler C, Ugurbil K., Kim S.G. (2000), Motor area activity during mental rotation studied by time-resolved single-trial fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 310—320.
- Sathian K. (2004). Modality, quo vadis? *Behavioral and Brain Sciences*, 27, 413—414.
- Wexler M., Kosslyn S.M., Berthoz A. (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition*, 68, 77-94.