

Dr Konrad Kułakowski
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Informatyki Stosowanej
tel. +48 12 6173408
[REDACTED]
e-mail: konrad.kulakowski@agh.edu.pl
www: <http://home.agh.edu.pl/~kkulak>

Autoreferat

Analiza wybranych własności i rozwój metod oraz narzędzi wspomagania decyzji opartych na porównywaniu alternatyw

1 Informacje wstępne

1.1 Imię i nazwisko habilitanta

Konrad Kułakowski

1.2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- Magister informatyki, Instytut Informatyki, Wydział Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, 1999
Tytuł pracy magisterskiej: *Music Grammars - Syntactic Pattern Recognition System for Music Data*
- Doktor nauk technicznych w zakresie informatyki, specjalność: inżynieria oprogramowania, zastosowanie metod formalnych, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, 2004
Tytuł rozprawy doktorskiej: *Konstrukcja i analiza oprogramowania sterowników wspomaganą metodami formalnymi*

1.3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- Adiunkt w Katedrze Automatyki na Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (2004 - 2012)
- Adiunkt w Katedrze Informatyki Stosowanej na Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (2012 - 2015)
- Adiunkt na Wydziale Informatyki, Wyższej Szkoły Handlowej w Radomiu (2007 - 2013)

1.4 Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

1. Rodzaj osiągnięcia naukowego: cykl publikacji powiązanych tematycznie.
2. Tytuł osiągnięcia naukowego: „Analiza wybranych własności i rozwój metod oraz narzędzi wspomagania decyzji opartych na porównywaniu alternatyw”.
3. Publikacje wchodzące w skład cyklu:
 - (a) K. Kułakowski. Heuristic Rating Estimation Approach to The Pairwise Comparisons Method. *Fundamenta Informaticae*, 133:367–386, 2014. ISSN 0169-2968. doi: 10.3233/FI-2014-1081. **IF (2014): 0.717. MNiSW (2014): 15 pkt.**
 - (b) K. Kułakowski. Notes on the existence of a solution in the pairwise comparisons method using the heuristic rating estimation approach. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, pages 1–17, 2015. ISSN 1012-2443. doi: 10.1007/s10472-015-9474-6. **IF (2014): 0.691. MNiSW (2014): 15 pkt.**
 - (c) K. Kułakowski, K. Grobler-Dębska, and J. Wąs. Heuristic rating estimation: geometric approach. *Journal of Global Optimization*, 62(3):529–543, 2015. ISSN 0925-5001. doi: 10.1007/s10898-014-0253-4. **IF (2014): 1.287. MNiSW (2014): 35 pkt.**
 - (d) K. Kułakowski. Notes on Order Preservation and Consistency in AHP. *European Journal of Operational Research*, 245(1):333–337, 2015. ISSN 0377-2217. doi: 10.1016/j.ejor.2015.03.010. **IF (2014): 2.358. MNiSW (2014): 40 pkt.**
 - (e) K. Kułakowski. On the properties of the priority deriving procedure in the pairwise comparisons method. *Fundamenta Informaticae*, 139(4):403 – 419, July 2015. ISSN 0169-2968. doi: 10.3233/FI-2015-1240. **IF (2014): 0.717. MNiSW (2014): 15 pkt.**
 - (f) K. Kułakowski and J. Szybowski. The new triad based inconsistency indices for pairwise comparisons. *Procedia Computer Science*, 35(0):1132 – 1137, 2014. ISSN 1877-0509. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2014.08.205>, (Web of Science). **MNiSW (2014): 10 pkt.**
 - (g) M. Baran, K. Kułakowski, and A. Ligęza. A note on machine learning approach to analyze the results of pairwise comparison based parametric evaluation of research units. In Leszek Rutkowski, Marcin Korytkowski, Rafał Scherer, Ryszard Tadeusiewicz, Lotfi A. Zadeh, and Jacek M. Zurada, editors, *Artificial Intelligence and Soft Computing*, volume 8468 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 27–39. Springer International Publishing, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-07176-3_3. (Web of Science). **MNiSW (2014): 10 pkt.**

2 Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

2.1 Wprowadzenie

Publikacje stanowiące podstawę do starania się o stopień doktora habilitowanego (Sekcja 1.4) dotyczą metod rankingowych opartych o porównywanie alternatyw parami (w skrócie metod porównywania parami). Metody te cieszą się dużą popularnością. Popularność ta bierze się z obserwacji, że znacznie łatwiej jest porównać ze sobą dwie alternatywy, niż

ocenić od razu wiele z nich. Często też prościej jest wykonać dużo relatywnie nieskomplikowanych porównań binarnych niż od razu stworzyć ranking wszystkich dostępnych alternatyw. W kontekście systemów decyzyjnych wybór zwycięzcy rankingu, najlepszej alternatywy, jest utożsamiany z podjęciem najlepszej możliwej decyzji, wyborem najlepszej opcji lub rozwiązania.

Pierwsze udokumentowane historycznie wykorzystanie porównywania alternatyw parami przypisuje się *Rajmundowi Llullowi*. Ten trzynastowieczny filozof i matematyk, uważany przez niektórych za jednego z prekursorów współczesnej informatyki [16, 9], zaproponował procedurę wyboru osób piastujących urzędy kościelne opartą o porównywania parami [17]. Zgodnie z zaproponowaną procedurą kandydaci byli porównywani „każdy z każdym”. Następnie dla każdego z kandydatów było liczone ile razy w bezpośrednim porównaniu okazał się on lepszy od konkurenta. Zwycięzcą tak zorganizowanego rankingu okazywał się ten kto zgromadził największą liczbę indywidualnych zwycięstw.

Z biegiem czasu propozycja *Llulla* uległa zapomnieniu. Stąd w osiemnastym stuleciu *Condorcet* zaproponował bardzo podobny do pierwowzoru z przed pięciu stuleci system wyborczy [10]. Główną różnicą było wymaganie by zwycięzca rankingu (ang. *Condorcet winner*) odniósł zwycięstwo w bezpośrednim porównaniu z każdym kontrkandydatem [9]. W XX wieku badania nad wykorzystaniem porównań parami w kontekście systemów wyborczych znajdują swój wyraz w *teorii społecznego wyboru* (ang. *social choice*). Do najwybitniejszych przedstawicieli tego nurtu badań należą między innymi nobliści: *Kenneth Arrow* i *Amartya Sen* [2, 65].

Jeden z pierwszych przykładów wykorzystania metody porównania parami w sposób ilościowy, pochodzi od *Fechnera* [13, 12]. Podejście *Fechnera* pozwala w bezpośrednim zestawieniu określić nie tylko to, która alternatywa jest bardziej preferowana, ale również o ile bardziej jest ona preferowana niż inna. Kontynuatorem prac *Fechnera* w pierwszej połowie XX stulecia był *Thurstone* [66].

W roku 1977 *Saaty* w swojej pracy „*A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structure*” zaproponował nową, wielokryterialną metodę podejmowania decyzji wykorzystującą porównywanie parami [63]. Nowa metoda *Analytic Hierarchy Process (AHP)* została później uogólniona do *Analytic Network Process (ANP)* [64]. Wydaje się, że zdefiniowanie *ANP*, nie wpłynęło znacznie na spadek popularności oryginalnej metody *AHP*. W przeglądowej pracy *Vaidia et al.* z roku 2006 [67] można znaleźć odniesienia do ponad 150 dobrze udokumentowanych przykładów wykorzystania *AHP/ANP* do podejmowania decyzji w zakresie różnych obszarów badań i zastosowań. Kolejne ponad 100 przykładów dostarcza praca przeglądowa *Ho* z roku 2008 [18].

Metoda *AHP/ANP* jest również popularna wśród twórców systemów decyzyjnych [14, 67, 18, 57]. Przykładem komercyjnego oprogramowania wykorzystującego metodę *AHP* mogą być aplikacje firm *MakeItRational* <http://makeitrational.com> lub *Expertchoice*[®] <http://expertchoice.com>. Sześć prac (a) - (f) z pośród siedmiu wchodzących w skład prezentowanego cyklu publikacji (Sekcja 1.4) wykorzystują tę samą, multiplikatywną metodę porównywania parami, w oparciu o którą zostało zdefiniowane *AHP/ANP*.

2.2 Podstawowe informacje o metodzie AHP/ANP

W metodzie obliczania priorytetów alternatyw [63] podstawowym zbiorem danych wejściowych do procedury rankingowej jest dodatnia, rzeczywista macierz $M = (m_{ij})$, gdzie $i, j = 1, \dots, n$ oraz $m \in \mathbb{R}_+$, wyników porównań parami dla skończonego zbioru alternatyw $C \stackrel{df}{=} \{c_1, \dots, c_n\}$. Pojedyncza wartość m_{ij} oznacza względną wielkość priorytetu (siły

preferencji, istotności) alternatywy c_i w porównaniu do priorytetu alternatywy c_j . Tym samym, przypisanie przez eksperta wartości np. $m_{ij} = 2$ będzie oznaczać, że jego zdaniem alternatywa c_i jest dwukrotnie bardziej preferowana (dwukrotnie bardziej istotna, o dwukrotnie wyższym priorytecie) niż c_j . Dość często, choć nie zawsze, przyjmuje się że dla elementów macierzy M spełniony jest warunek $m_{ij} = 1/m_{ji}$ [15].

W oparciu o dane zgromadzone w macierzy M , obliczane są pewne nieujemne i rzeczywiste wagi, odpowiednio dla każdej z rozważanych alternatyw (Rys. 1). Im większą wagę ma dana alternatywa (większy priorytet), tym jest odpowiednio uważana za bardziej preferowaną, bardziej istotną. Oznaczmy przez $w : C \rightarrow \mathbb{R}_+$ funkcję, która przypisuje wagi do poszczególnych alternatyw¹. Wartości funkcji w , wygodnie jest zapisywać w postaci wektora $[w_1, \dots, w_n]^T$, gdzie k -ta składowa oznacza wartość funkcji w dla k -tej alternatywy, tj. $w_k = w(c_k)$.

Istnieje wiele sposobów obliczania końcowych wartości $[w_1, \dots, w_n]^T$ na podstawie M . Dwa najbardziej znane to metoda *EVM* (od ang. the eigenvector method) [63] oraz metoda *GMM* (od ang. the geometric mean method) [11]. W metodzie *EVM*, wektor wag $[w_1, \dots, w_n]^T$ jest odpowiednio przeskalowanym wektorem własnym macierzy M , stojącym przy jej największej wartości własnej. W podejściu *GMM*, kolejne wartości w_1, \dots, w_n są wyznaczane w oparciu o wartości średnich geometrycznych wierszy macierzy M . Więcej o metodach obliczania priorytetów na potrzeby *AHP/ANP* można znaleźć w [22, 21].

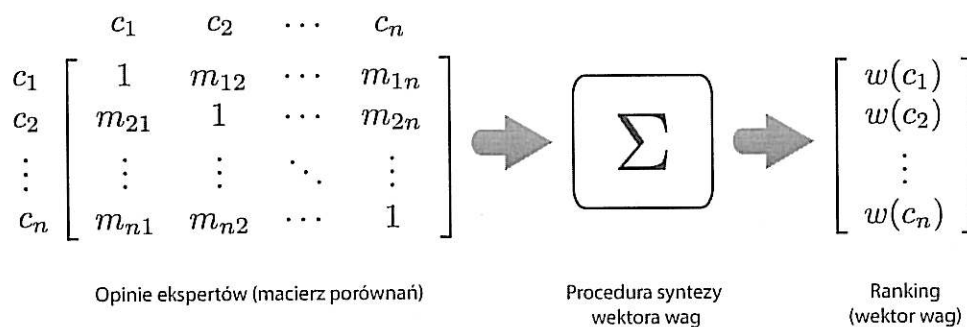
Zgodnie z przyjętą praktyką, wartości macierzy M odzwierciedlają przekonania ekspertów co do wzajemnej ważności alternatyw. To eksperci sami decydują jaką wartość przypisać danemu porównaniu. W metodzie porównywania parami do określania priorytetów alternatyw używa się skali ilorazowej (ang. *ratio scale*) [20]. Czasem dla wygody ekspertów konkretnym wartościom liczbowym przypisuje się jednak określenia werbalne. Niestety często prowadzi to do nieporozumień co do charakteru wykorzystywanej skali i traktowania jej mylnie jako skali porządkowej.

Przyjmując odpowiednio, że m_{ij} , m_{jk} oraz m_{ik} określają stosunek wartości preferencji dla par alternatyw (c_i, c_j) , (c_j, c_k) oraz (c_i, c_k) , można oczekiwać, że $m_{ij} \cdot m_{jk} = m_{ik}$. Innymi słowy, jeśli na przykład alternatywa c_j jest dwukrotnie bardziej preferowana niż c_i a c_k trzykrotnie bardziej preferowana niż c_j , to tym samym można się spodziewać, że w bezpośrednim porównaniu c_k będzie miała sześciokrotnie wyższy priorytet niż c_i .

Ponieważ, wartości macierzy M są zazwyczaj ustalane bezpośrednio przez osoby zaangażowane w proces decyzyjny (mogą to być również autonomiczni agenci [58]) są podatne na błąd i często zdarza się że $m_{ij} \cdot m_{jk} \neq m_{ik}$. W takim przypadku macierz M jest określana jako niespójna (ang. *inconsistent*). W celu określenia jak dalece niespójna jest macierz porównań parami, powstały różne tzw. indeksy niespójności [8, 7]. Najbardziej znanym jest indeks niespójności *CI* [63], skonstruowany w oparciu o największą wartość własną macierzy M . W pracach wchodzących w skład cyklu (Sekcja 1.4) wykorzystywany jest również indeks niespójności \mathcal{K} zaproponowany przez *Koczkodaję* [23].

Im macierz jest bardziej niespójna, tym wyższa jest wartość indeksu niespójności. Przyjmuje się, że wartość danego indeksu niespójności odzwierciedla praktyczną możliwość określenia preferencji na podstawie ocen ekspertów [61, p. 273]. Stąd niższe wartości indeksu przekładają się na większe zaufanie co do poprawności otrzymanych rezultatów, i odwrotnie, wysokie wartości indeksu niespójności wskazują na duże rozbieżności w poszczególnych ocenach eksperckich, co skutkuje brakiem zaufania do tak otrzymanych wyników rankingu.

¹ W pracach (a), (b), (c) i (f) funkcja ta jest oznaczana jako μ .



Rysunek 1: Schemat metody obliczania rankingów (syntezy wektora wag) na podstawie pojedynczej macierzy porównań parami

2.3 Cele naukowe podjętych prac oraz uzyskane wyniki

Wśród moich prac poświęconych metodzie porównywania parami, składających się na cykl publikacji powiązanych tematycznie (Sekcja 1.4), można wyodrębnić dwie podgrupy:

1. prace (a), (b) i (c) opisujące nowe, zdefiniowane przeze mnie, podejście do metody syntezy wektora wag na podstawie macierzy porównań parami wykonanych w oparciu o skalę ilorazową oraz zbioru alternatyw referencyjnych,
2. prace (d), (e), (f) i (g) analizujące własności oraz problemy metody porównywania parami

Motywacją do podjęcia badań w zakresie rankingów wykorzystujących dane referencyjne była chęć zbudowania mechanizmu, który by pozwalał w ramach jednej procedury rankingowej, zarówno na zachowanie przez wybrane alternatywy dotychczasowych wartości rankingowych, jak i na ocenę zupełnie nowych alternatyw. Pozostawienie wyników dotychczasowego rankingów ma szereg zalet. Jeśli wyniki poprzedniego rankingów były szeroko akceptowane, wykorzystanie tego podejścia pozwala nie naruszać konsensusu zbudowanego wokół istniejącego rankingów, a jednocześnie rozważyć dodatkowe alternatywy. Zmniejsza ilość pracy potrzebnej do oceny nowych alternatyw. Zaproponowane podejście może też służyć do estymacji rzeczywistych wartości kryjących się za wielkościami priorytetów.

Jedną ze spraw często dyskutowanych w kontekście metody *EVM*, jest kwestia niespójności macierzy porównań parami. W szczególności część badaczy, podobnie jak zostało to wskazane w pracy (d), zwraca uwagę na fakt, że nawet wtedy gdy macierz porównań parowych jest wystarczająco spójna, to wyniki otrzymanego rankingów mogą nie spełniać oczekiwań stron zainteresowanych [3]. Analizie zjawiska niespójności w macierzy porównań, indeksom niespójności oraz próbie zdefiniowania warunków pozwalających uniknąć związanych z niespójnością problemów są poświęcone kolejne cztery prace (prace d - g) cyklu habilitacyjnego.

2.3.1 Podejście HRE

Pierwsze trzy prace (a), (b) i (c) cyklu zawierają opis oraz analizę własności nowej metody nazwanej *Heuristic Rating Estimation (HRE)*. Motywacją do podjęcia prac nad metodą *HRE*, była obserwacja, zgodnie z którą czasem dla niektórych alternatyw z góry można przyjąć pewne wartości priorytetów. Źródłem apriorycznej wiedzy na temat priorytetów

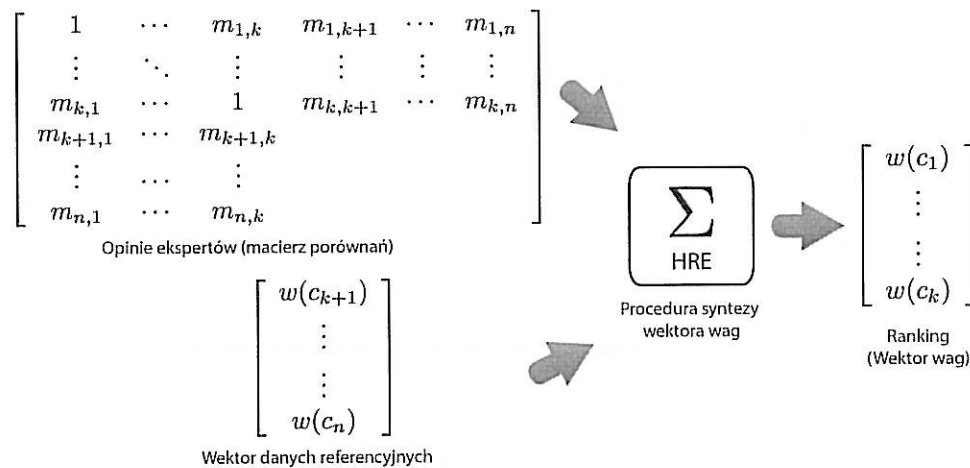
mogą być rzeczywiste dane historyczne np. dotyczące cen produktów i usług, wielkości sprzedaży, jakości podzespołów, wartości pomiarów wielkości fizycznych itp., jak i wyniki poprzednich rankingów. Ważne jest przy tym by:

- wartości priorytetów dla alternatyw referencyjnych odzwierciedlały rzeczywistą intensywność badanej cechy, tj. miały znaczenie w sensie skali ilorazowej,
- eksperci oceniający względną istotność alternatyw na potrzeby podejścia *HRE* w pełni akceptowali i byli zgodni w swoich osądach z wynikami rankingów referencyjnego.

W celu wyodrębnienia zbioru alternatyw referencyjnych podzielmy zbiór C (Rysunek 1), na dwie grupy:

- C_U - zbiór alternatyw, dla których informacja o wartościach priorytetów jest nieznaną,
- C_K - zbiór alternatyw, dla których informacja o wartościach priorytetów jest znana (danych referencyjnych)².

Dla elementów $c \in C_K$ wartości $w(c)$ są znane. Tym samym nie trzeba ich porównywać parami, gdyż dla $c_p, c_q \in C_K$ wartość m_{pq} można łatwo wyznaczyć jako $m_{pq} = w(c_p)/w(c_q)$. Stąd też wejściem do procedury syntezy wag w podejściu *HRE* jest macierz $M = (m_{ij})$, w której wartości m_{pq} dla $c_p, c_q \in C_K$ są wzięte jako $w(c_p)/w(c_q)$. Pozostałe wyniki porównań zawarte w macierzy, podobnie jak poprzednio, są wynikiem pracy ekspertów. Dodatkową informację stanowi wektor danych referencyjnych $[w(c_{k+1}), \dots, w(c_n)]^T$ gdzie $C_K = \{c_{k+1}, \dots, c_n\}$. Schemat przepływu danych w procedurze wykorzystującej podejście *HRE* został przedstawiony na rysunku 2.



Rysunek 2: Schemat obliczania rankingu w podejściu *HRE*. Wejściem do procedury syntezy wag jest zarówno macierz porównań parami jak i wektor wag alternatyw referencyjnych.

Ponieważ wartości m_{ij} w macierzy porównań parami M odzwierciedlają subiektywne zdanie ekspertów co do relacji pomiędzy wartością priorytetu dla c_i oraz c_j , można oczekiwać by, podobnie jak w przypadku alternatyw referencyjnych, $m_{ij} = \frac{w(c_i)}{w(c_j)}$. To znaczy, by $w(c_i) = m_{ij}w(c_j)$. W praktyce nie zawsze jest to możliwe ze względu na mogącą się pojawić w macierzy M niespójność. Najczęściej iloczyn $m_{ij}w(c_j)$ jest tylko pewnym przybliżeniem $w(c_i)$. Opierając się na tej obserwacji, w podejściu *HRE* został przyjęty postulat

² Dla ustalenia uwagi będzie przyjęte, że $C_U = \{c_1, \dots, c_k\}$, $C_K = \{c_{k+1}, \dots, c_n\}$.

by wartość $w(c_i)$ spełniał równanie³:

$$w(c_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n m_{ij} w(c_j) \quad (1)$$

tj. by obliczona wartość preferencji dla alternatywy c_i była średnią z jej przybliżeń [Praca (a)]. Przyjęcie powyższego założenia prowadzi do układu równań liniowych postaci:

$$Aw = b \quad (2)$$

gdzie

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{n-1}m_{1,2} & \cdots & -\frac{1}{n-1}m_{1,k} \\ -\frac{1}{n-1}m_{2,1} & \ddots & \cdots & -\frac{1}{n-1}m_{2,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{n-1}m_{k,1} & -\frac{1}{n-1}m_{k,2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad w = \begin{bmatrix} w(c_1) \\ w(c_2) \\ \vdots \\ w(c_k) \end{bmatrix},$$

oraz b odpowiednio skonstruowany wektor wyrazów wolnych. Rozwiązanie w układu równań (2) stanowi poszukiwany wektor wag (Rysunek 2).

Oprócz naszkicowanego powyżej rozwiązania, praca (a) zawiera kilka innych propozycji dodatkowych. Pozwalają one między innymi na wyznaczenie wartości rankingowych dla macierzy niekompletnych, tj. takich dla których nie wszystkie wartości m_{ij} są znane. W pracy podanych jest także kilka możliwych przykładów zastosowań.

W kolejnym artykule [Praca (b)] został podjęty problem istnienia rozwiązania układu równań (2). Przedstawiony w pracy warunek wystarczający do istnienia dopuszczalnego (tj. rzeczywistego i dodatniego) rozwiązania tego układu korzysta z pojęcia niespójności macierzy M . Poziom niespójność jest oznaczany za pomocą indeksu \mathcal{K} zdefiniowanego przez Koczkodaję [23]. Dla względnie niewielkich wartości indeksu \mathcal{K} oraz odpowiedniej proporcji pomiędzy liczbą alternatyw ze zbioru C_U (alternatyw o nieznanym priorytetach) i C_K (alternatyw referencyjnych), warunek ten dostarcza gwarancji istnienia dopuszczalnego rozwiązania. Warunek nie jest warunkiem koniecznym. Oznacza to, że istnieje dość duża ilość problemów decyzyjnych reprezentowanych za pomocą macierzy porównań parami, dla których warunek ten nie jest spełniony, a pomimo to układ równań (2) posiada rozwiązanie dopuszczalne. Pozwala to przypuszczać, że istnieje lepsze niż wskazane w pracy (b) kryterium istnienia rozwiązania układu (2). Badania w tym zakresie są cały czas kontynuowane. Przy zadanym poziomie niespójności, otrzymana zależność [Praca (b)], pozwala na wyznaczenie minimalnej, procentowej ilości alternatyw referencyjnych, gwarantujących istnienie dopuszczalnego rozwiązania.

Podstawowa propozycja rozwiązania problemu rankingowego, wykorzystującego macierz porównań parami oraz dane referencyjne [Praca (a)], opiera się na postulacie (1), zgodnie z którym wartość $w(c_i)$ powinna być średnią arytmetyczną wyrazów $m_{i1}w(c_1), \dots, m_{in}w(c_n)$. Można postawić pytanie, czy średnia geometryczna tych wyrazów nie mogła by stanowić punktu wyjścia do obliczenia rankingów alternatyw c_1, \dots, c_k . Dlatego celem pracy (c) było znalezienie metody wyznaczania takiej funkcji w , która spełniała by równanie:

$$w(c_i) = \left(\prod_{j=1, j \neq i}^n m_{ij} w(c_j) \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (3)$$

³ Podobną analogię można znaleźć w odniesieniu do metody EVM [Praca (b)].

Rozwiązanie problemu (3) wymaga znalezienia dopuszczalnego (tj. rzeczywistego i dodatniego) rozwiązania dla tak zdefiniowanego układu równań nieliniowych. W pracy (c) została pokazana metoda rozwiązywania tak zdefiniowanego problemu, która prowadzi zawsze do rozwiązania dopuszczalnego. Co więcej, o ile różnice w ocenie poszczególnych preferencji nie są zbyt duże [Praca (c), równanie 20], przedstawione rozwiązanie jest optymalne, ze względu na iloczyn błędów rankingu.

Podobnie jak w przypadku *AHP*, zastosowania podejścia *HRE* zarówno w wersji „addytywnej” [Prace (a) i (b)] jak i „multiplikatywnej” [Praca (c)], mogą być różnorakie. Wszędzie tam, gdzie z jednej strony istnieje możliwość wzajemnego porównania siły preferencji dla zbioru alternatyw, z drugiej, dla części alternatyw wartości preferencyjne są znane oraz dobrze określone, podejście *HRE* może być pomocne. Rozważmy następujące przykłady.

Przykład 1

Pewnego twórcę poproszono o oszacowanie czasu potrzebnego do wykonania dwóch instalacji artystycznych $C_U = \{c_1, c_2\}$. W tym celu artysta wytypował trzy z dotychczas wykonanych dzieł $C_K = \{c_3, c_4, c_5\}$, najbardziej zbliżone pod względem charakteru i stopnia skomplikowania, do przedmiotów zamówień c_1 i c_2 . Czas wykonania dzieł c_3, c_4 i c_5 wynosił odpowiednio $w_{czas}(c_3) = 20$ dni, $w_{czas}(c_4) = 32$ dni oraz $w_{czas}(c_5) = 48$ dni. W następnym kroku artysta porównał parami instalacje c_1 i c_2 oraz c_3, c_4, c_5 . Ponieważ w przypadku instalacji wykonywanych przez tego artystę, czas wykonania pojedynczej instalacji był wprost proporcjonalny do jego rozmiarów, w trakcie porównań parami artysta oszacował proporcje rozmiarów poszczególnych instalacji artystycznych. W ten sposób dla zbioru porównań $\{(c_1, c_2), (c_1, c_3), (c_1, c_4), (c_1, c_5), (c_2, c_3), (c_2, c_4), (c_2, c_5)\}$, zostały ustalone wartości $m_{12}=0.75, m_{13} = 1.35, m_{14} = 0.8, m_{15} = 0.55, m_{23} = 2, m_{24} = 1.2$ oraz $m_{25} = 0.8$, wyrażające dla każdej z par (c_i, c_j) stosunek rozmiarów instalacji c_i do rozmiarów instalacji c_j . Wartości proporcji m_{ij} dla par $\{(c_3, c_4), (c_3, c_5), (c_4, c_5)\}$ zostały obliczone na podstawie znanego czasu, który był potrzebny na wykonanie dzieł c_3, c_4 i c_5 . Elementom m_{ji} została przypisana wartość $\frac{1}{m_{ij}}$. W ten sposób została ustalona następująca macierz porównań parami:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0.75 & 1.35 & 0.8 & 0.55 \\ 1.33 & 1 & 2 & 1.2 & 0.8 \\ 0.74 & 0.5 & 1 & \frac{20}{32} & \frac{20}{48} \\ 1.25 & 0.833 & \frac{32}{20} & 1 & \frac{32}{48} \\ 1.82 & 1.25 & \frac{48}{20} & \frac{48}{32} & 1 \end{pmatrix}$$

Na tej podstawie, w oparciu o podejście *HRE*, artysta wyliczył czas wykonania instalacji c_1 i c_2 wynoszący po zaokrągleniu w górę odpowiednio $w_{czas}(c_1) = 27$ dni i $w_{czas}(c_2) = 39$ dni. Dla bezpieczeństwa otrzymane wyniki powiększył o 10% odpowiednio zaokrąglając. Otrzymane wartości $w_{czas}(c_1) = 30$ dni, $w_{czas}(c_2) = 43$ dni przekazał w odpowiedzi klientowi.

Przykład 2

Właściciel pewnej małej firmy informatycznej zatrudniającej czterech programistów $C_K = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$ na potrzeby nowego projektu chciał zatrudnić dwie nowe osoby

$C_U = \{c_5, c_6\}$. W ocenie właściciela, płace pracowników w firmie dobrze odzwierciedlały poziom ich kompetencji. Chcąc zachować tę prawidłowość, w trakcie rozmowy kwalifikacyjnej, właściciel dokonał porównania kompetencji obecnie zatrudnionych z kompetencjami nowych pracowników. Porównał też nawzajem kompetencje obydwu nowo zatrudnianych osób. Przy założeniu, że płace obecnych pracowników wynosiły: $w_{zarobki}(c_1) = 5521$ zł, $w_{zarobki}(c_2) = 3209$ zł, $w_{zarobki}(c_3) = 7000$ zł oraz $w_{zarobki}(c_4) = 6172$ zł została ustalona następująca macierz zależności parowych:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & \frac{5521}{3209} & \frac{5521}{7000} & \frac{5521}{6172} & 1.3 & 0.9 \\ \frac{3209}{5521} & 1 & \frac{3209}{7000} & \frac{3209}{6172} & 0.8 & 0.6 \\ \frac{7000}{5521} & \frac{7000}{3209} & 1 & \frac{1750}{1543} & 1.7 & 1.1 \\ \frac{6172}{5521} & \frac{6172}{3209} & \frac{1543}{1750} & 1 & 1.5 & 1 \\ 0.77 & 1.25 & 0.58 & 0.66 & 1 & 0.6 \\ 1.11 & 1.66 & 0.9 & 1 & 1.66 & 1 \end{pmatrix}$$

Zawiera ona zarówno proporcje odpowiadające płacom obecnie zatrudnionych jak i oszacowania kompetencji nowo zatrudnianych pracowników.

W oparciu o podejście *HRE*, wykorzystując macierz M , właściciel przygotował ranking pracowników, w którym wartości priorytetów odpowiadają płacom zatrudnionych osób. W tym przypadku wyniki wyniosły: $w_{zarobki}(c_2) = 3209$ zł, $w_{zarobki}(c_5) = 4113$ zł, $w_{zarobki}(c_1) = 5521$ zł, $w_{zarobki}(c_6) = 6149$ zł, $w_{zarobki}(c_4) = 6172$ zł oraz $w_{zarobki}(c_3) = 7000$ zł. Płace dotychczas zatrudnionych nie uległy zmianie.

Powyższe przykłady, choć proste prezentują charakterystyczne cechy rankingów tworzonych z wykorzystaniem podejścia *HRE*. Są nimi:

- możliwość interpretacji wyników w kontekście tej samej skali ilorazowej co danych wejściowych,
- nie modyfikowanie wartości rankingowych dla alternatyw referencyjnych,
- wymóg posiadania przez dane referencyjne znaczenia w kontekście skali ilorazowej,
- wymóg zgodności pomiędzy poglądami eksperta oceniającego alternatywy w podejściu *HRE* oraz wartościami priorytetów alternatyw referencyjnych.

W spełnieniu tego ostatniego wymogu pomaga sytuacja, w której dane referencyjne pochodzą lub zostały przygotowane przez tą samą grupę ekspertów, która ocenia alternatywy w ramach podejścia *HRE*. W praktyce eksperymentalnej, podobnie jak w przypadku *AHP*, dąży się do minimalizacji niespójności w obrębie macierzy porównań parami. Po przeprowadzonych obliczeniach trzeba też przeprowadzić analizę wpływu zaburzeń danych wejściowych na ostateczny wynik (ang. *sensitivity analysis*).

W chwili obecnej prowadzone są prace zmierzające do integracji rankingów z danymi referencyjnymi z metodą *AHP*. Szczególnie obiecująco wygląda możliwość wkomponowania procedury *HRE* w hierarchiczny model obecny w *AHP* w miejsce, w którym wykorzystywane są metody *EVM* i *GMM*. Istnieje też możliwość, że w niektórych wypadkach podejście *HRE* pomoże uniknąć niepożądanego zjawiska związanego z odwracaniem rankingów (ang. *rank reversal problem*) [59].

2.3.2 Własności metody porównywania parami

Pomimo swojej olbrzymiej popularności [67, 18, 57] i dużej ilości publikacji opisujących samą metodę *AHP* [21] cały czas jest ona przedmiotem wnikliwych badań i krytycznych dyskusji. Przykładem ważnej pracy sygnalizującej możliwe problemy metody *AHP* jest artykuł *Bana e Costy* i *Vansnicka* z roku 2008 [3]. Praca ta zawiera dwuczęściowy postulat, zgodnie z którym jeśli dana alternatywa c_i jest lepsza w bezpośrednim porównaniu niż alternatywa c_j , tj. $m_{ij} > 1$, to porządek ten powinien przekładać się na wynikową wartość rankingu dla tych alternatyw tj. $w(c_i) > w(c_j)$. Podobnie, jeśli dla czterech alternatyw c_i, c_j, c_p i c_q jest prawdą, że $m_{ij}, m_{pq} > 1$ oraz $m_{ij} > m_{pq}$ to wartości priorytetów dla rozważanych alternatyw powinny spełniać nierówność $\frac{w(c_i)}{w(c_j)} > \frac{w(c_p)}{w(c_q)}$. Pierwszy z warunków, skracany jako *POP* (ang. *preservation of order preference*), postuluje konieczność zachowania porządku. Drugi warunek, *POIP* (ang. *preservation of order of intensity of preference*), postuluje konieczności zachowania porządku intensywności preferencji. Metoda *EVM* nie gwarantuje spełnienia ani pierwszego ani drugiego warunku i to niezależnie od wartości *CI* [Praca (d)].

Z drugiej strony, warunki zgłoszone w pracy *Bana e Costa et al.* [3] wydają się być dość oczywiste i są akceptowane przez znaczną liczbę badaczy. Niedotrzymanie jednego z nich np. zaistnienie sytuacji, w której w bezpośrednim porównaniu alternatywa c_i jest lepsza (dominuje) alternatywę c_j , podczas gdy w ostatecznym rozrachunku to c_j okazuje się być bardziej preferowane niż c_i , może być postrzegane jako nieintuicyjne. Sytuacja taka może stanowić powód do kwestionowania wyników rankingu.

Taki stan rzeczy generuje szereg pytań. Co powoduje że warunki *POP* i *POIP* nie są spełnione? W jaki sposób można zabezpieczyć się przed niedotrzymaniem warunków *POP* i *POIP*? Jak wygląda związek pomiędzy niespójnością macierzy porównań parami a *POP* i *POIP*? Prace (d) i (e) są poświęcone próbie znalezienia odpowiedzi na te pytania.

W pierwszej ze wspomnianych prac [Praca (d)] znajdują się trzy twierdzenia przedstawiające związki pomiędzy poziomem błędów w macierzy M oraz odpowiednio:

- indeksem spójności *CI*,
- *POP* - pierwszym warunkiem *Bana e Costy* i *Vansnicka*,
- *POIP* - drugim warunkiem *Bana e Costy* i *Vansnicka*.

Pierwsze twierdzenie wiąże poziom spójności macierzy M z poziomem błędów. Drugie i trzecie twierdzenie, pokazuje związek pomiędzy zachowaniem warunków *POP* i *POIP* a wielkościami błędów w macierzy M oraz podobieństwem (w sensie intensywności preferencji) pomiędzy rozważanymi alternatywami. Przedstawione twierdzenia wskazują kluczowe znaczenie pojęcia błędów rankingu dla spełnienia warunków *POP* i *POIP*. Tym samym poprzez kontrolę warunków przedstawionych w tych twierdzeniach, mogą one pomóc w zachowaniu warunków *POP* i *POIP*.

Ponadto w pracy (d), zostało pokazane że przy dowolnie małych wielkościach *CI* warunki *POP* i *POIP* nadal mogą nie być spełnione. Ta ostatnia obserwacja stanowiła motywację do dalszych poszukiwań związku pomiędzy niespójnością a warunkami *POP* i *POIP*. Rezultaty tych poszukiwań można odnaleźć w artykule (e) w postaci dwóch końcowych twierdzeń poświęconych warunkom *Bana e Costy* i *Vansnick'a*.

Praca (e) jest próbą spojrzenia na procedurę obliczania wag (priorytetów) jako na drugie, oprócz niespójności macierzy M , źródło błędów. Na tej podstawie zostają sformułowane dwa warunki „dobrej” procedury obliczania wag. Pierwszy, zgodnie z którym procedura jest:

poprawna – jeśli dla macierzy spójnej wartość błędów wynosi 0,

i drugi, zgodnie z którym procedura jest:

efektywna – jeśli istotna poprawa niespójności macierzy M przekłada się na obniżenie wartości błędu dla tej macierzy.

Oba pojęcia *poprawności* i *efektywności* są definiowane w kontekście dowolnego, choć ustalonego, indeksu niespójności. Stąd w dalszej części pracy (e), w formie odpowiednich twierdzeń, zostaje pokazane, że:

- metoda *EVM* jest *poprawna* z indeksem spójności CI ,
- metoda *EVM* jest *poprawna* z indeksem niespójności \mathcal{K} ,
- metoda *EVM* jest *efektywna* z indeksem niespójności \mathcal{K} .

Dowody dwóch ostatnich własności opierają się na znalezionej zależności pomiędzy indeksem \mathcal{K} a błędem [Praca (e), Lemat 1, str. 409 - 410]. Zależność ta pozwoliła na pokazanie kolejnych własności:

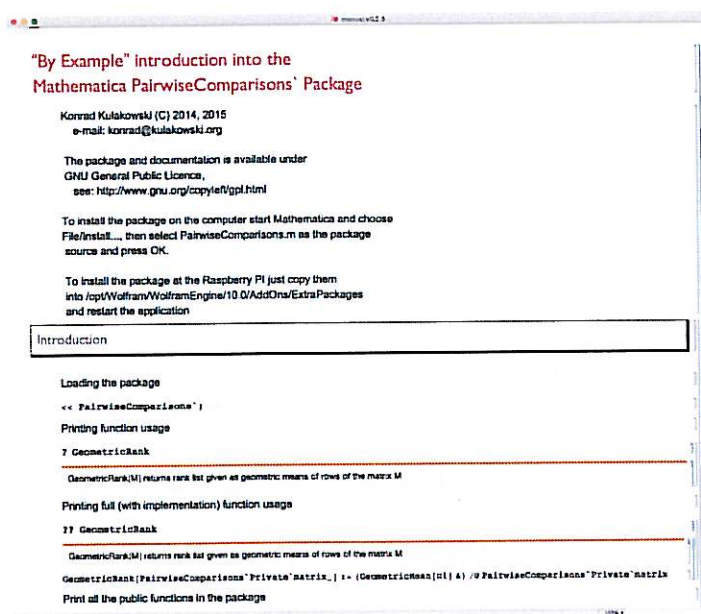
- znalezienie związku pomiędzy wartościami wektora własnego macierzy M stojącego przy λ_{max} [Praca (e), Wniosek 5.4, str. 412],
- znalezienie bezpośredniego związku pomiędzy indeksem spójności CI a indeksem niespójności \mathcal{K} [Praca (e), Twierdzenie 6.1, str. 413],
- znalezienie związku pomiędzy wielkością λ_{max} (największa wartości własna) macierzy M a \mathcal{K} [Praca (e), Twierdzenie 6.2, str. 414],
- znalezienie związku pomiędzy \mathcal{K} a warunkiem *POP* [Praca (e), Twierdzenie 6.3, str. 415],
- znalezienie związku pomiędzy \mathcal{K} a warunkiem *POIP* [Praca (e), Twierdzenie 6.4, str. 415].

Przedstawione w pracach (d) i (e) twierdzenia wskazują, że indeks \mathcal{K} może być efektywnie wykorzystany do oceny spójności macierzy porównań parami. Jego użycie może pomóc w wyeliminowaniu lub znacznym ograniczeniu zjawisk niekorzystnych takich jak niedotrzymanie warunków *POP* i *POIP*. Tym samym może przełożyć się na zwiększenie poziomu akceptacji wyników procedur rankingowych oraz zredukowanie ewentualnych kosztów związanych z obsługą protestów stron zainteresowanych wynikami rankingów.

Kolejna praca cyklu habilitacyjnego [Praca (f)] zajmuje się tematyką indeksów niespójności. W ocenie autorów jedną z bolączek obecnie wykorzystywanych indeksów niespójności w metodzie porównywania parami jest ich globalny (lub też lokalny) charakter. Indeksy globalne, takie jak np. CI , mogą być niewrażliwe na lokalne zaburzenia wartości w macierzy M [25]. Z drugiej strony indeksy lokalne, takie jak indeks \mathcal{K} , uzależniają swoją wartość tylko od maksymalnego lokalnego zaburzenia, co w pewnych przypadkach może być podejściem zbyt restrykcyjnym. Stąd też, jedną z głównych propozycji zawartych w pracy (f), jest możliwość łączenia różnych indeksów niespójności, w ten sposób, by powstały indeks posiadał własności swoich indeksów składowych. W szczególności powstały indeks złożony jest w stanie reprezentować zarówno indeksy oznaczające niespójność lokalną, jak i niespójność globalną. Ponadto w pracy zostało zdefiniowane pojęcie równoważności indeksów niespójności oraz podane przykładowe klasy indeksów równoważnych.

Praca (g) ma charakter analizy praktycznego zastosowania metody porównywania parami. Przedstawiona dyskusja skupia się na opartym o porównywanie parami algorytmie kategoryzacji polskich jednostek naukowych [70]. W algorytmie wzajemne porównywanie alternatyw (jednostek naukowych) ma charakter addytywny. To oznacza, że wartość

liczbowa $V(c_i, c_j)$ wynika z porównania jednostek c_i i c_j jest obliczana z wykorzystaniem różnicy wartości pomiędzy priorytetami alternatyw c_i i c_j , a nie jak w przypadku *AHP*, z wykorzystaniem ilorazu tych priorytetów.



Rysunek 3: Podręcznik pakietu obliczeniowego stworzonego na potrzeby metody porównywania parami w środowisku Mathematica.

Na potrzeby pracy zostały zdefiniowane dwa warunki *poprawności* rankingu:

1. spójności porządku preferencji CPO (ang. the *consistency of preference order*)
2. spójność intensywności preferencji CPI (ang. the *consistency of preference intensity*)

Pierwszy z nich postuluje przechodność relacji wynikającej z wartości liczbowych danych przez całkowity wynik punktowy V , natomiast drugi z nich, domaga się by pomiędzy różnymi wartościami funkcji V , zachodziła odpowiednio zdefiniowana zgodność. Spełnienie tak zdefiniowanych warunków, podobnie jak w przypadku warunków poprawności *POP* i *POIP* (metoda *EVM*), może mieć istotne znaczenie dla:

1. recepcji wyników rankingu przez strony zainteresowane, im w mniejszej ilości przypadków warunki te będą naruszone, tym szersza będzie akceptacja społeczna wyników rankingu,
2. redukcji kosztów związanych z obsługą odwołań i zapytań dotyczących wyników rankingu

W ramach prac nad podejściem *HRE* powstał pakiet obliczeniowy napisany w języku *Wolfram Language* z wykorzystaniem środowiska *Mathematica* (Rysunek 3). Z jednej strony może on służyć jako prosty system wspomaganie decyzji oparty o metody porównania parami wykorzystujące *HRE*, *EVM*, *GMM* i *AHP*, z drugiej strony, może być wykorzystywany do dalszego rozwoju samej metody. Pakiet jest dostępny w internecie pod adresem <https://github.com/konrad-kulakowski/Pairwise-Comparisons>. W chwili obecnej, pakiet udostępnia ponad 40 funkcji matematycznych, wspierających obliczenia wykonywane w systemach wspomaganie decyzji opartych o wzajemne porównania alternatyw.

2.4 Podsumowanie

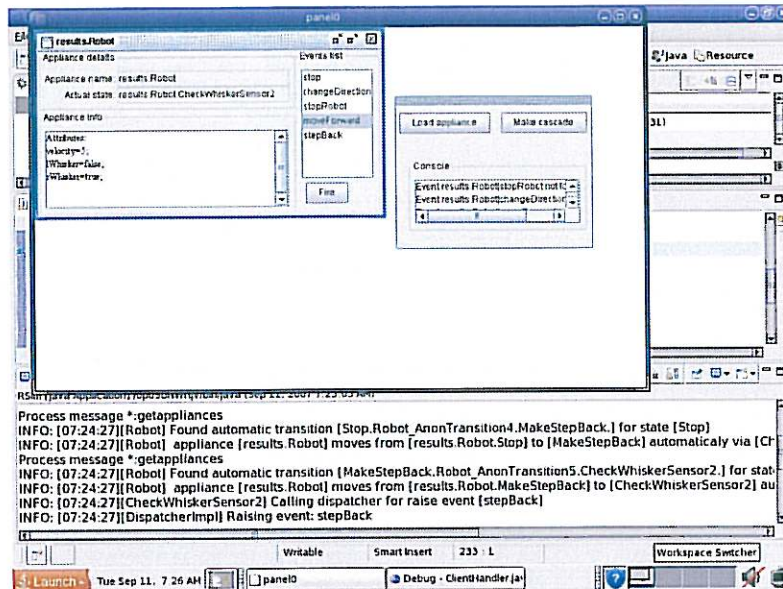
Do najważniejszych osiągnięć naukowych uzyskanych w ramach prowadzonych badań i przedstawionych w cyklu publikacji powiązanych tematycznie należą:

- zaproponowanie nowego paradygmatu tworzenia rankingów opartych o wzajemne porównanie alternatyw wykorzystujących dane referencyjne [Praca (a), (b) i (c)],
- opracowanie podejścia *HRE* (ang. *Heuristic Rating Estimation*) pozwalającego na wykorzystanie danych referencyjnych w procesie syntezy wektora wag dla poszczególnych alternatyw [Praca (a)],
- analizę problemu istnienia rozwiązania dla metody obliczeniowej *HRE*, wraz z podaniem warunku wystarczającego [Praca (b)],
- opracowanie geometrycznej metody *HRE* (ang. *Heuristic Rating Estimation*) oraz podanie kryterium po którego spełnieniu otrzymany wynik jest optymalny ze względu na odpowiednio zdefiniowany błąd rankingu [Praca (c)],
- zidentyfikowanie związków pomiędzy pojęciem błędu rankingu a warunkami *POP* i *POIP* pochodzącymi od *Bana e Costy* i *Vansinicka* [3] [Praca (d)],
- zaproponowanie warunków poprawności procedury rankingowej oraz udowodnienie, że dla indeksu niespójności \mathcal{K} procedura *EVM* jest poprawna oraz efektywna (dla indeksu spójności *CI* pierwszy z warunków jest spełniony) [Praca (e)],
- zidentyfikowanie związków pomiędzy indeksem niespójności \mathcal{K} a pojęciami: *CI*, λ_{max} , *POP* i *POIP* [Praca (e)],
- zaproponowanie złożonych indeksów niespójności oraz sposobu określania równoważności tych indeksów [Praca (f)],
- analiza i zaproponowanie warunków poprawności na potrzeby algorytmu kategoryzacji jednostek naukowych w Polsce [Praca (g)],
- przygotowanie ogólnie dostępnej biblioteki obliczeniowej w *Wolfram Language* wspierającej obliczenia rankingowe.

3 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

Po ukończeniu pracy doktorskiej prowadziłem badania dotyczące wykorzystania metod inżynierii oprogramowania, w tym metod formalnych, do modelowania oraz weryfikacji systemów o różnym stopniu złożoności. Część prac była prowadzona w ramach grantu Adder 4 T11C 035 24 (kierownik prof. *Tomasz Szumc*), finansowanego przez KBN [27, 28]. Za punkt wyjścia moich badań posłużył język modelowania *UML* (*Unified Modeling Language*), w oparciu o który powstało prototypowe rozwiązanie *RAT* (*Reactive Appliance Toolkit*), pozwalające na tworzenie modeli uruchamialnych [26, 43, 42]. Stworzona z wykorzystaniem *RAT* specyfikacja modelu stanowiła równocześnie wykonywalną aplikację (Rysunek 4). Jednym z przykładów systemów reaktywnych jest system sterowania inteligentnym i autonomicznym robotem mobilnym. Z tego powodu moje zainteresowania modelowaniem systemów reaktywnych przerodziły się w zainteresowania inteligentną robotyką jako taką.

W obszarze badań związanych z systemami inteligentnymi, tworzonymi na potrzeby robotyki, można zauważyć dwa rywalizujące ze sobą podejścia. Pierwsze, reprezentowane między innymi przez *Jamesa Albusa* [1], zgodnie z którym niezbędnym elementem systemu inteligentnego sterowania robotem mobilnym jest „*model świata*”. Drugie podejście, *reaktywne*, kwestionuje zasadność istnienia odrębnego modelu świata w myśl zasady: „*to*



Rysunek 4: RAT - Reactive appliance toolkit

use the world as its own model” [6]. Zainspirowany pierwszym podejściem, w ramach kolejnego projektu badawczego „HeKaTe” N516 024 32/2878 MNiSW (kierownik prof. Antoni Ligęza) brałem udział w pracach zmierzających do stworzenia modelu świata na potrzeby sterowania autonomicznym inteligentnym robotem mobilnym [52, 53, 50].

Dzięki pracy nad modelem świata na potrzeby systemu sterowania robotem [50], miałem okazję zapoznać się z problematyką automatów komórkowych. Wziąłem też udział w projekcie N N516 228735 poświęconemu modelowaniu dynamiki pieszych z wykorzystaniem automatów komórkowych [68, 54, 69, 51].

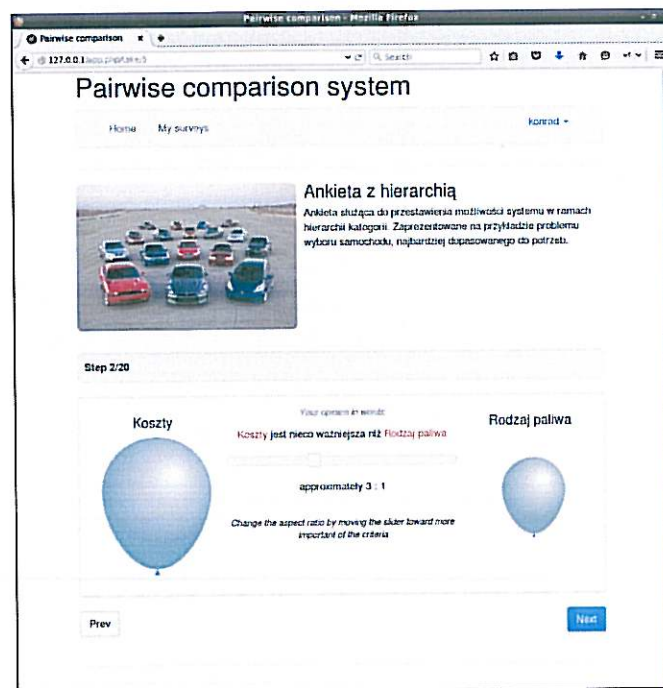
Z końcem 2009 miałem okazję brać udział w pracach zespołu opracowującego bazę białek odgrywających rolę w uzależnieniach od morfiny. W ich wyniku powstała dostępna on-line baza danych <http://addiction-proteomics.org> [5].

W trakcie trwania projektu „HeKaTe”, zauważyłem potrzebę stworzenia możliwie prostego rozwiązania umożliwiającego studentom programować nieskomplikowane modele robotów. Stało się to motywacją do napisania pierwszej wersji biblioteki „Robust”, pozwalającej na zdalne sterowanie robotami *Lego Mindstorms* z poziomu komputera *PC x86* wyposażonego w standardową maszynę wirtualną *Java* [29, 30]. W kolejnych latach biblioteka *Robust* została wzbogacona o obsługę platformy robotowej *Hexor II* [44], interfejs programistyczny dla języka programowania *Clojure* [32] oraz obsługę wirtualnej platformy *Pioneer 3DX*, działającej pod kontrolą symulatora *Webots* [45]. W oparciu o bibliotekę *Robust* zostało zrealizowane szereg prac dydaktycznych i naukowych [62, 47, 48, 31].

Pracując nad biblioteką *Robust* podjąłem próbę stworzenia własnej notacji formalnej do opisu dynamiki systemu, która by pozwalała na ścisłą weryfikację poprawności modelu. Powstała w ten sposób notacja *CCL* (*Concurrent Communication Lists*), nawiązująca składnią do języka *Lisp* [34, 33]. W *CCL* definicja procesu miała postać listy. Kolejność elementów w liście była zarazem kolejnością akcji w ramach definicji procesu. Dodatkowym atutem algebry *CCL* była możliwość uruchamiania stworzonego modelu. W ten sposób model stawał się częścią aplikacji sterującej. Notacja *CCL* została wykorzystana do konstrukcji systemu sterowania autonomicznym robotem mobilnym z wykorzy-

staniem biblioteki *Robust* [48], a także weszła w skład modelu trójwarstwowej architektury sterowania inteligentnym robotem mobilnym *KBP (Knowledge-Behavior-Platform)* [55].

Jedną z ważniejszych kwestii związaną z modelowaniem procesów współbieżnych jest możliwość ich wzajemnego porównania i oceny czy dwa wybrane procesy opisują to samo zachowanie. Jednym ze sposobów udzielenia odpowiedzi na to pytanie jest wyznaczenie relacji *bisymulacji* w zbiorze stanów będących sumą stanów jednego i drugiego procesu. Klasyczny, wydajny algorytm rozwiązujący problem *bisymulacji* pochodzi od *Page* i *Tarjana* [60]. W swoim rozwiązaniu badacze ci wykorzystali zaproponowaną przez *Hopcrofta* strategię „*process the smaller half*” [19]. Pracując nad notacją *CCL*, zaprojektowałem współbieżną wersję algorytmu rozwiązującego problem *bisymulacji*⁴. Zaproponowany algorytm posiada taką samą złożoność obliczeniową w przypadku sekwencyjnym, co rozwiązanie *Page* i *Tarjana*. W przypadku współbieżnym zbliża się do innych znanych rozwiązań współbieżnych. We wspomnianej pracy została też zaproponowana nowa strategia algorytmiczna „*process all parts except the largest one*” uogólniająca na potrzeby algorytmów współbieżnych propozycję *Hopcrofta* [19].



Rysunek 5: Prototypowy system wspomaganie decyzji, rozwijany przez jednego z moich dyplomantów

Wydajne aplikacje, działające na współczesnych komputerach, wymagają wykorzystania wydajnych współbieżnych struktur danych. Przykładem takiej struktury jest zbiór dynamiczny (ang. *dynamic set*), umożliwiający efektywną iterację, po kolejnych elementach zbioru. W odpowiedzi na tę potrzebę, zdefiniowałem nową, współbieżną strukturę zbioru dynamicznego *cvEBArray (concurrent van Emde Boas Array)*. Przeprowadzone testy wykazały znaczną przewagę otrzymanego rozwiązania nad dotychczas istniejącymi. Otrzymane rezultaty zostały opisane w pracy *Kutakowski* [35].

⁴ (Pierwsza wersja pracy opisującej współbieżny algorytm obliczania bisymulacji jest dostępna na <http://arxiv.org/abs/1311.7635>)

Z końcem 2012 roku rozpocząłem prace nad nową metodą rankingową wykorzystującą zarówno macierz porównań parami jak i dodatkowe dane o wartościach rankingowych. Rezultatem tych prac była pierwsza wersja algorytmu *HRE* [37, 38]. Kontynuując prace nad metodą porównywania parami, brałem udział w miniprojekcie, którego zadaniem była analiza algorytmu kategoryzacji polskich jednostek naukowych [70]. Rezultatem projektu była propozycja wykorzystania metody porównywania parami do kalibracji wag kryteriów oceny jednostek naukowych oraz przeprowadzenie eksperymentu z udziałem ekspertów. Otrzymane wyniki zostały opisane w pracy [24].

Prowadzone przeze mnie badania w zakresie metody porównywania parami, pozwoliły na sformułowanie kilku ciekawych tematów prac dyplomowych z zainteresowaniem przyjętych przez studentów. Pod moim kierunkiem powstał prototyp systemu wspomagania decyzji opartego o metodę porównywania parami (autorstwa pana magistra Karola Wójcika). Aplikacja ta wykorzystuje zarówno metodę *EVM* jak i podejście *HRE* (Rysunek 5). Pozwala ona na konstrukcję hierarchicznego modelu decyzyjnego, porównania on-line alternatyw przez grupę ekspertów oraz obliczenie końcowego wyniku.

Bibliografia

- [1] J. S. Albus. Outline for a theory of intelligence. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 21(3):473–509, May-June 1991.
- [2] K. J. Arrow. A difficulty in the concept of social welfare. *The Journal of Political Economy*, 1950.
- [3] C. A. Bana e Costa and J. Vansnick. A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP. *European Journal of Operational Research*, 187(3):1422–1428, June 2008.
- [4] M. Baran, K. Kułakowski, and A. Ligęza. A note on machine learning approach to analyze the results of pairwise comparison based parametric evaluation of research units. In Leszek Rutkowski, Marcin Korytkowski, Rafał Scherer, Ryszard Tadeusiewicz, Lotfi A. Zadeh, and Jacek M. Zurada, editors, *Artificial Intelligence and Soft Computing*, volume 8468 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 27–39. Springer International Publishing, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-07176-3_3. (Web of Science). **MNiSW (2014):** 10 pkt.
- [5] A. Bodzoń-Kułakowska, K. Kułakowski, A. Drabik, A. Moszczynski, J. Silberring, and P. Suder. Morphinome—a meta-analysis applied to proteomics studies in morphine dependence. *Proteomics*, 11(1):5–21, January 2011. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21182190>. **IF (2011):** 4.505. **MNiSW (2014):** 35 pkt.
- [6] R. Brooks. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47:139–160, 1991.
- [7] M. Brunelli and M. Fedrizzi. Axiomatic properties of inconsistency indices. *Journal of Operational Research Society*, pages –, 2013. ISSN 0160-5682. URL <http://dx.doi.org/10.1057/jors.2013.135>.
- [8] M. Brunelli, L. Canal, and M. Fedrizzi. Inconsistency indices for pairwise comparison matrices: a numerical study. *Annals of Operations Research*, 211:493–509, February 2013.
- [9] J. M. Colomer. Ramon Llull: from ‘Ars electionis’ to social choice theory. *Social Choice and Welfare*, 40(2):317–328, October 2011.
- [10] M. Condorcet. Essai sur l’application de l’analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix. Paris: Imprimerie Royale, 1785.
- [11] G. B. Crawford. The geometric mean procedure for estimating the scale of a judgement matrix. *Mathematical Modelling*, 9(3–5):327 – 334, 1987. ISSN 0270-0255. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90489-1](http://dx.doi.org/10.1016/0270-0255(87)90489-1). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0270025587904891>.
- [12] E.N. Dzhafarov and H. Colonius. The Fechnerian idea. *American Journal of Psychology*, 124:127–140, 2011.
- [13] G. T. Fechner. *Elemente der Psychophysik*. Breitkopf und Härtel, Leipzig, 1860. URL <https://archive.org/details/elementederpsych001fech>.
- [14] Simon French and Dong Ling Xu. Comparison study of multi-attribute decision analytic software. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 13(2-3):65–80, March 2005.
- [15] J. Fülöp, W. W. Koczkodaj, and S. J. Szarek. On some convexity properties of the least squares method for pairwise comparisons matrices without the reciprocity condition. *J. Global Optimization*, 54(4):689–706, 2012.
- [16] M. Gardner. *Logic Machines and Diagrams*. McGrawHill Book Company, 1958.
- [17] G. Hägele and F. Pukelsheim. Llull’s writings on electoral systems. *Studia Lulliana*, 41: 3 – 38, 2001. URL <http://www.math.uni-augsburg.de/stochastik/pukelsheim/2001a.html>.

- [18] William Ho. Integrated analytic hierarchy process and its applications - A literature review. *European Journal of Operational Research*, 186(1):18–18, March 2008.
- [19] J. E. Hopcroft. An $n \log n$ algorithm for minimizing states in a finite automaton. Technical report, Stanford University, Stanford, CA, USA, 1971.
- [20] A. Ishizaka and A. Labib. Analytic hierarchy process and expert choice: Benefits and limitations. *OR Insight*, 22(4):201–220, 2009.
- [21] A. Ishizaka and A. Labib. Review of the main developments in the Analytic Hierarchy Process. *Expert Systems with Applications*, 38(11):14336–14345, October 2011.
- [22] A. Ishizaka and M. Lusti. How to derive priorities in AHP: a comparative study. *Central European Journal of Operations Research*, 14(4):387–400, December 2006. URL <http://ideas.repec.org/a/spr/cejnor/v14y2006i4p387-400.html>.
- [23] W. W. Koczkodaj. A new definition of consistency of pairwise comparisons. *Math. Comput. Model.*, 18(7):79–84, October 1993. ISSN 0895-7177. doi: 10.1016/0895-7177(93)90059-8. URL [http://dx.doi.org/10.1016/0895-7177\(93\)90059-8](http://dx.doi.org/10.1016/0895-7177(93)90059-8).
- [24] W. W. Koczkodaj, K. Kułakowski, and A. Ligęza. On the quality evaluation of scientific entities in Poland supported by consistency-driven pairwise comparisons method. *Scientometrics*, 99(3):911–926, 2014. ISSN 0138-9130. doi: 10.1007/s11192-014-1258-y. **IF (2014): 2.183. MNiSW (2014): 35 pkt.**
- [25] W.W. Koczkodaj and R. Szwarc. On axiomatization of inconsistency indicators for pairwise comparisons. *Fundamenta Informaticae*, 4(132):485–500, 2014.
- [26] M. Kostrzewa and K. Kułakowski. A Practical Approach To The Modelling, Visualising And Executing Of Reactive Systems. In *Proceedings of International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, pages 705–710, June 2006. (**Web of Science**).
- [27] K. Kułakowski. Hybrid modeling of reactive systems with petri nets and ccs process algebra. In *Systemy informatyczne z ograniczeniami czasowymi*, 2006.
- [28] K. Kułakowski. Hybrid modeling and verification of java based software. In Krzysztof Sacha, editor, *Software Engineering Techniques: Design for Quality*, volume 227 of *IFIP International Federation for Information Processing*, pages 121–126. Springer US, 2007. ISBN 978-0-387-39387-2. doi: 10.1007/978-0-387-39388-9_12. (**Web of Science**).
- [29] K. Kułakowski. Robust - Towards the Design of an Effective Control Library for Lego Mindstorms NXT. In *Proceedings of Conference on Software Engineering Techniques CEE-SET 2009*, Sep 2009.
- [30] K. Kulakowski. Robust – model komunikacji mindstorms nxt-pc. *Automatyka*, 2009. **MNiSW (2009): 4 pkt.**
- [31] K. Kułakowski. Towards Java-based Intelligent Control Architecture. In Leonard Bolc, editor, *Proceedings of International Joint Conference Intelligent Information Systems, Challenging Problems of Science*. Computer Science, pages 531–540. EXIT, Jun 2009. ISBN 978-83-60434-59-8. **MNiSW (2009): 7 pkt.**
- [32] K. Kułakowski. cljRobust - Clojure Programming API for Lego Mindstorms NXT. In Piotr Jedrzejowicz, Ngoc Nguyen, Robert Howlet, and Lakhmi Jain, editors, *Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications*, volume 6071 of *Lecture Notes in Computer Science*, 2010. (**Web of Science**). **MNiSW (2010): 13 pkt.**
- [33] K. Kułakowski. CCL Sim, the simulation environment for concurrent systems. In *proceedings of Dependability and Complex Systems DepCoS*, 2012. **MNiSW (2012): 5 pkt.**
- [34] K. Kułakowski. Concurrent systems modeling with CCL. *Automatyka*, 2012. URL <http://journals.bg.agh.edu.pl/AUTOMAT/2012.16.2/automat.2012.16.2.115.pdf>.
- [35] K. Kułakowski. A concurrent van Emde Boas array as a fast and simple concurrent dynamic set alternative. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 26(2):

- 360–379, 2014. ISSN 1532-0634. doi: 10.1002/cpe.2995. URL <http://dx.doi.org/10.1002/cpe.2995>. **IF (2014):** 0.997. **MNiSW (2014):** 25 pkt.
- [36] K. Kułakowski. Heuristic Rating Estimation Approach to The Pairwise Comparisons Method. *Fundamenta Informaticae*, 133:367–386, 2014. ISSN 0169-2968. doi: 10.3233/FI-2014-1081. **IF (2014):** 0.717. **MNiSW (2014):** 15 pkt.
- [37] K. Kułakowski. A heuristic rating estimation algorithm for the pairwise comparisons method. *Central European Journal of Operations Research*, 23(1):187–203, 2015. ISSN 1435-246X. doi: 10.1007/s10100-013-0311-x. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10100-013-0311-x>. **IF (2014):** 0.832. **MNiSW (2014):** 20 pkt.
- [38] K. Kułakowski. Erratum to: A heuristic rating estimation algorithm for the pairwise comparisons method. *Central European Journal of Operations Research*, pages 1–3, 2015. ISSN 1435-246X. doi: 10.1007/s10100-015-0396-5. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10100-015-0396-5>. **IF (2014):** 0.832.
- [39] K. Kułakowski. Notes on Order Preservation and Consistency in AHP. *European Journal of Operational Research*, 245(1):333–337, 2015. ISSN 0377-2217. doi: 10.1016/j.ejor.2015.03.010. **IF (2014):** 2.358. **MNiSW (2014):** 40 pkt.
- [40] K. Kułakowski. Notes on the existence of a solution in the pairwise comparisons method using the heuristic rating estimation approach. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, pages 1–17, 2015. ISSN 1012-2443. doi: 10.1007/s10472-015-9474-6. **IF (2014):** 0.691. **MNiSW (2014):** 15 pkt.
- [41] K. Kułakowski. On the properties of the priority deriving procedure in the pairwise comparisons method. *Fundamenta Informaticae*, 139(4):403 – 419, July 2015. ISSN 0169-2968. doi: 10.3233/FI-2015-1240. **IF (2014):** 0.717. **MNiSW (2014):** 15 pkt.
- [42] K. Kułakowski and M. Kostrzewa. Modelowanie systemów czasu rzeczywistego w UML. *Automatyka*, 2008. **MNiSW (2008):** 4 pkt.
- [43] K. Kułakowski and M. Kostrzewa. Rapid prototyping of real-time reactive systems. In *Proceedings of International Conference on Signals and Electronic Systems, 2008. ICSES '08.*, pages 381–384, Sept 2008. doi: 10.1109/ICSES.2008.4673443. (**Web of Science**).
- [44] K. Kułakowski and P. Matyasik. RobustHX - The Robust Middleware Library for Hexor Robots. In Noriaki Ando, Stephen Balakirsky, Thomas Hemker, Monica Reggiani, and Oskar von Stryk, editors, *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*, volume 6472 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Verlag, 2010. (**Web of Science**). **MNiSW (2010):** 13 pkt.
- [45] K. Kułakowski and P. Matyasik. Robust PI - The Simulation Robust Library Component for Pioneer 3DX. In M. Klusch, M. Thimm, and M. Paprzycki, editors, *Multiagent System Technologies MATES*, volume 8076 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 115–123. Springer, 2013.
- [46] K. Kułakowski and A. Mouaddib. What situation awareness and distributed robotics have in common? *CSL Technical Raport 2/2009*, 2009.
- [47] K. Kułakowski and T. Stępień. Dynamic World Model with the Lazy Potential Function. In D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu R., B. Steffen, M. Sudan, D. Terzopoulos, D. Tygar, M. Y. Vardi, G. Weikum, J. O’Shea, N. T. Nguyen, K. Crockett, R. J. Howlett, and L. C. Jain, editors, *Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications*, volume 6682 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 190–199, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer. (**Web of Science**). **MNiSW (2012):** 10 pkt.
- [48] K. Kułakowski and T. Szmuc. Modeling Robot Behavior with CCL. In Itsuki Noda, Noriaki Ando, Davide Brugali, and James J. Kuffner, editors, *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*, volume 7628 of *Lecture Notes in Computer Science*,

- pages 40–51. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-34326-1. doi: 10.1007/978-3-642-34327-8_7. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-34327-8_7.
- [49] K. Kułakowski and J. Szybowski. The new triad based inconsistency indices for pairwise comparisons. *Procedia Computer Science*, 35(0):1132 – 1137, 2014. ISSN 1877-0509. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2014.08.205>, (**Web of Science**). **MNiSW (2014)**: 10 pkt.
- [50] K. Kułakowski and J. Wąs. World model for autonomous mobile robot – formal approach. In *Proceedings of Intelligent Information Systems, Siedlce, Poland*, pages 37–45, 2010. **MNiSW (2010)**: 7 pkt.
- [51] K. Kułakowski and J. Wąs. Two Concurrent Algorithms of Discrete Potential Field Construction. In R. Wyrzykowski, J. Dongarra, K. Karczewski, and J. Waśniewski, editors, *Parallel Processing and Applied Mathematics*, volume 6068 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 529–538. Springer, 2010. (**Web of Science**). **MNiSW (2010)**: 13 pkt.
- [52] K. Kułakowski, J. Wąs, and M. Szpyrka. Architektura autonomicznego robota mobilnego z dynamicznym modelem świata. *Automatyka*, 2008.
- [53] K. Kułakowski, J. Wąs, and M. Szpyrka. Dynamiczny model świata w sterowaniu autonomicznym robotem mobilnym. *Automatyka*, 2008. **MNiSW (2008)**: 4 pkt.
- [54] K. Kułakowski, J. Wąs, and P. Topa. *Simulation environment for modeling pedestrian dynamics*. Publishing House of University of Podlasie, 2010.
- [55] K. Kułakowski, P. Matyasik, and S. Ernst. Modeling indoor lighting inspection robot behavior using concurrent communicating lists. *Expert Syst. Appl.*, 41(4):984–989, March 2014. ISSN 0957-4174. doi: 10.1016/j.eswa.2013.06.065. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2013.06.065>. **IF (2014)**: 2.24.
- [56] K. Kułakowski, K. Grobler-Dębska, and J. Wąs. Heuristic rating estimation: geometric approach. *Journal of Global Optimization*, 62(3):529–543, 2015. ISSN 0925-5001. doi: 10.1007/s10898-014-0253-4. **IF (2014)**: 1.287. **MNiSW (2014)**: 35 pkt.
- [57] M. J. Liberatore and R. L. Nydick. The analytic hierarchy process in medical and health care decision making: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 189(1):14–14, August 2008.
- [58] O. Lopez-Ortega and M. A. Rosales. An agent-oriented decision support system combining fuzzy clustering and the AHP. *Expert Systems with Applications*, 38(7):8275–8284, July 2011.
- [59] H. Maleki and S. Zahir. A Comprehensive Literature Review of the Rank Reversal Phenomenon in the Analytic Hierarchy Process. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 20(3-4):141–155, May 2013.
- [60] R. Paige and R. E. Tarjan. Three partition refinement algorithms. *SIAM J. Comput.*, 16:973–989, December 1987. ISSN 0097-5397. doi: 10.1137/0216062. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=37185.37186>.
- [61] F. S. Roberts. *Measurement Theory with Applications to Decisionmaking, Utility, and the Social Sciences*. Encyclopedia of mathematics and its applications. Cambridge University Press, 1985.
- [62] J. Rzucidło and K. Kułakowski. *Explorer – the robust search robot*. Wrocław University of Technology. — Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2010.
- [63] T. L. Saaty. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3):234 – 281, 1977. ISSN 0022-2496. doi: 10.1016/0022-2496(77)90033-5. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022249677900335>.
- [64] T. L. Saaty. Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(1):1–35, 2004.

- ISSN 1004-3756. doi: 10.1007/s11518-006-0151-5. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>.
- [65] Amartya K Sen. Social Choice Theory: A Re-examination. *Econometrica*, 45(1):53–89, January 1977. URL <http://ideas.repec.org/a/econ/emetrp/v45y1977i1p53-89.html>.
- [66] L. L. Thurstone. A law of comparative judgment, reprint of an original work published in 1927. *Psychological Review*, 101:266–270, 1994.
- [67] O. S. Vaidya and S. Kumar. Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1):1–29, February 2006.
- [68] J. Waś and K. Kułakowski. Multi-agent Systems in Pedestrian Dynamics Modeling. In *Computational Collective Intelligence. Semantic Web, Social Networks and Multiagent Systems, First International Conference, ICCCI 2009*, Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2009. **(Web of Science)**. **MNiSW (2009)**: 10 pkt.
- [69] J. Waś and K. Kułakowski. Agent-Based Approach in Evacuation Modeling. In *Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications, 4th KES International Symposium, KES-AMSTA 2010*, Lecture Notes in Computer Science, pages 325–330. Springer, 2010. **(Web of Science)**.
- [70] Minister Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w sprawie kryteriów i trybu przyznawania kategorii naukowej jednostkom naukowym. *Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej*, 877, July 2012. URL <http://isap.sejm.gov.pl/DetailsServlet?id=WDU20120000877>.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'K. Kułakowski', written over a horizontal line.