

Nowe metody analizy i wspomagania decyzji oraz ich zastosowania w inteligentnych systemach autonomicznych

Andrzej M.J. Skulimowski , Inez Badecka , Arfa Hassan ,
Mehmet Kara , Paweł Łydek , Przemysław Pukocz 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków

Streszczenie: Niniejszy artykuł ma na celu prezentację najważniejszych kierunków badań prowadzonych w Laboratorium Analizy i Wspomagania Decyzji Katedry Automatyki i Robotyki na Wydziale EAliIB AGH. Na wstępie omówiona została historia oraz aktualne obszary aktywności badawczej i dydaktycznej Laboratorium. W rozdziale 2 przedstawiono zakres i wyniki badań naukowych związanych z modelowaniem procesów decyzyjnych w systemach autonomicznych, w tym decyzji podejmowanych w zespołach złożonych z robotów i ludzi z wykorzystaniem teorii sieci antycypacyjnych i bayesowskich. Kolejny rozdział poświęcony jest prezentacji przykładu praktycznego zastosowania opracowanych metod w systemie wspomagania decyzji dotyczących zarządzania bezpieczeństwem przemysłowym. Przy projektowaniu tej klasy systemów użyteczne są zwłaszcza metody zbiorów odniesienia oraz sieci antycypacyjne. W celu efektywnego zastosowania tych metod w Laboratorium opracowano nowe algorytmy wielokryterialnej optymalizacji kombinatorycznej. Plan dalszych badań przedstawiony został w rozdziale 4. Badania te obejmują m.in. algorytmy decyzyjne dla zespołów robotów autonomicznych ukierunkowane na realizację złożonych zadań oraz metody wielokryterialnej analizy decyzyjnej dla problemów sterowania optymalnego ze zbiorami odniesienia i ich zastosowania praktyczne.

Słowa kluczowe: systemy wspomagania decyzji, analiza wielokryterialna, sieci antycypacyjne, systemy autonomiczne, optymalizacja wielokryterialna

NEW METHODS OF DECISION ANALYSIS AND SUPPORT AND THEIR APPLICATIONS IN INTELLIGENT AUTONOMOUS SYSTEMS

Abstract: This article is aimed at a brief presentation of the selected research directions and results of the Laboratory of Decision Sciences at the Department of Automatic Control and Robotics of the AGH University of Science and Technology. Specifically, we present the scope and results of scientific research related to modeling of decision-making processes in autonomous systems, including decisions made in teams composed of robots and humans. We argue that these decisions can be efficiently modeled with the anticipatory and Bayesian networks. The next section presents practical applications of the developed methods in a decision support system for industrial safety management. The reference sets method and anticipatory networks turned out to be especially useful to designing this class of systems. New algorithms have been proposed to solve multicriteria combinatorial optimization problems occurring when selecting system configuration and choosing evacuation paths. Future research plans are presented in section 4. They include development of decision algorithms for teams of autonomous inspection robots and decision analytics based on reference multifunctions for multicriteria optimal control problems.

Keywords: decision support systems, multicriteria analysis, anticipatory networks, autonomous systems, multicriteria optimization

1. Wprowadzenie do tematyki badawczej

Laboratorium Analizy i Wspomagania Decyzji

Laboratorium Analizy i Wspomagania Decyzji (LAIWD) powstało w 2007 roku, wchodząc w skład ówczesnej Katedry Automatyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (AGH). Inicjatorem powstania i pierwszym kierownikiem Laboratorium jest prof. dr hab. inż. Andrzej M.J. Skulimowski. Głównymi kierunkami badań naukowych LAIWD są inteligentne systemy wspomagania decyzji (iSWD, *Intelligent DSS*) oparte na modelach, uczeniu maszynowym i analizie wielokryterialnej, a także algorytmy decyzyjne dla systemów autonomicznych. Prowadzone są również badania dotyczące modelowania decyzji finansowych (Skulimowski 2014b, Chmiel i in. 2016, Cao 2023), zwłaszcza zastosowań metod sztucznej inteligencji w analizie szeregów czasowych oraz technologii *blockchain* (Pukocz 2021). Wyniki tych badań wykorzystywane są w praktyce w postaci szeregu implementacji dotyczących m.in. optymalizacji decyzji finansowych, wielokryterialnej ewaluacji efektywności finansowej projektów innowacyjnych (Skulimowski i Pukocz 2012) czy systemów sterowania zbiornikami wodnymi z ewoluującym zbiorem odniesienia (Jomah 2012, Skulimowski 2013).

Z najnowszymi wynikami badań LAIWD mają okazję zapoznawać się na bieżąco studenci i doktoranci AGH. Obecnie w Laboratorium prowadzone są zajęcia dydaktyczne na wszystkich stopniach studiów, m.in. w ramach przedmiotów kierunkowych bezpośrednio powiązanych z tematyką badań LAIWD, takich jak systemy wspomagania decyzji, systemy autonomiczne, symulacja i sterowanie procesów dyskretnych, podstawy sztucznej inteligencji, prognozowanie rynków finansowych czy optymalizacja wielokryterialna. Większość tych przedmiotów oferowana jest zarówno w języku polskim, jak i angielskim. Organizowane są cykliczne seminaria z zakresu wielokryterialnej analizy decyzji i systemów autonomicznych dla studentów oraz doktorantów wszystkich prowadzonych w AGH kierunków studiów, w szczególności kierunków związanych z automatyką, robotyką, sztuczną inteligencją i informatyką stosowaną. LAIWD korzysta z autorskiego oprogramowania służącego m.in. do symulacji robotów inspekcyjnych (Skulimowski i Ćwik 2017), analizy decyzyjnej opartej na sieciach antycypacyjnych (Skulimowski 2014a, 2016), analizy sieci społecznościowych (Skulimowski 2021), a także z oprogramowania do analizy szeregów czasowych wykorzystywanego w systemach wspomagania decyzji w finansach (Skulimowski 2014b) i w roadmappingu technologicznym (Skulimowski i Pukocz 2012). Laboratorium ściśle współpracuje ze Studentkim Kołem Naukowym Modelowania w Finansach, założonym w roku 1998, które prowadzi badania i organizuje coroczne seminaria naukowe z zakresu prognozowania i modelowania procesów decyzyjnych w informatyce, automatyce, robotyce, zarządzaniu i finansach (Jamróg i Skulimowski 2011).

W następnych dwóch rozdziałach omówione zostały kolejno badania LAIWD związane z antycypacyjnymi modelami procesów decyzyjnych oraz projektowaniem

systemów wspomagania decyzji dla zapewnienia bezpieczeństwa przemysłowego. Rozdział 4 zawiera przegląd pozostałych kierunków i planów badawczych zespołu naukowego Laboratorium, a końcowy rozdział 5 – krótkie podsumowanie.

2. Analiza decyzji w systemach autonomicznych

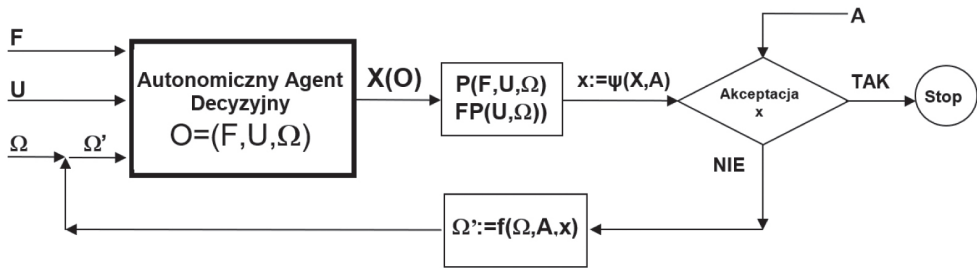
Jednym z ważniejszych zagadnień należących do obszaru badań zespołu LAiWD jest wieloetapowa analiza konsekwencji podejmowanych decyzji, stosowana zarówno w inteligentnych systemach wspomagania decyzji, jak i w modelowaniu robotów autonomicznych. W procesach ze stochastycznym modelem otoczenia i sterowaniami opisywanymi przez zmienne losowe analizę konsekwencji modelowanych przez zależne kauzalnie zmienne losowe można przeprowadzić, stosując sieci bayesowskie. W systemach zdarzeń dyskretnych (Skulimowski 1991) najczęściej stosowane są decyzyjne procesy Markowa. Natomiast dla procesów decyzyjnych o przeważających cechach deterministycznych właściwą metodą badawczą okazały się sieci antycypacyjne (Skulimowski 2014a, 2019a) odwołujące się do modeli konsekwencji decyzji opartych na wektorowych funkcjach użyteczności (Skulimowski 1985) w powiązanych ze sobą przyczynowo i rozwiązywanych w różnym czasie problemach optymalizacji wielokryterialnej:

$$(F = (F_1, \dots, F_N) : U \rightarrow E) \rightarrow \min(\Omega) \quad (1)$$

gdzie $F = (F_1, \dots, F_N)$ jest wektorowym kryterium, $U \subset \mathbb{R}^k$ jest zbiorem dopuszczalnych decyzji, $E \subset \mathbb{R}^N$, a $\Omega : E \rightarrow 2^E$ jest pewną strukturą preferencji wprowadzającą częściowy porządek $\prec_\Omega$ w przestrzeni ocen E poprzez zależność $x \prec_\Omega y \Leftrightarrow^{\text{df}} x \in \Omega(y)$. Podzbiór **decyzji niezdominowanych** w U względem Ω dla problemu (1) definiujemy jako zbiór takich $u \in U$, że dla wszystkich $v \in U$ z warunku $F(v) \in \Omega(F(u))$ wynika, że $F(v) = F(u)$. Zbiór ten oznaczamy przez $P(U, F, \Omega)$, natomiast zbiór niezdominowanych ocen oznaczamy przez $FP(U, \Omega)$, przy czym oczywiście $FP(U, \Omega) = F(P(U, F, \Omega))$.

Obecne i przyszłe otoczenie problemu (1) modelowane jest jako sieć wzajemnie zależnych agentów zdolnych do autonomicznego podejmowania decyzji, nazywanych dalej **decydentami**. Decydentów, którzy podejmują decyzje w sposób **racjonalny**, tj. optymalizują pewien zbiór kryteriów zgodnie z jednoznacznie zdefiniowaną strukturą preferencji, nazwiemy **optymalizatorami** (por. rys. 1).

Z podanej wyżej definicji decyzji niezdominowanej wynika, że wszystkie takie decyzje są wzajemnie nieporównywalne względem częściowego porządku $\prec_\Omega$ w U , zatem do wyboru decyzji kompromisowej ze zbioru $P(U, F, \Omega)$ konieczne jest wykorzystanie dodatkowej informacji o preferencjach. Wśród różnych modeli dodatkowych preferencji decydenta szczególnie użyteczna w zagadnieniach planowania wielokryterialnego okazuje się struktura preferencji zawarta w antycypacyjnym modelu otoczenia.



Rys. 1. Schemat algorytmu wyboru rozwiązania kompromisowego w problemie (1), gdzie O jest optymalizatorem, X jest operacją aproksymującą zbiór $P(U, F, \Omega)$, $\psi: X(U, F, \Omega) \times A \rightarrow P(U, F, \Omega)$ – funkcją wyboru rozwiązania przedstawianego decydentowi, a A jest strukturą preferencji zawartą w antycypacyjnym modelu otoczenia

Źródło: opracowanie własne na podstawie Skulimowski (2014a)

Podstawowym założeniem antycypacyjnego modelu poszukiwania decyzji kompromisowej wśród decyzji niezdominowanych jest możliwość wskazania pewnego podzbioru sieci optymalizatorów o znanych – być może w sposób przybliżony – parametrach optymalizowanych problemów, tj. kryteriach, ograniczeniach i strukturze preferencji. Taką podsić nazywamy zbiorem **optymalizatorów przewidywalnych** i oznaczamy A_p . Zbiór A_p definiuje zarazem horyzont przewidywania jako najbardziej odległy w czasie okres podejmowania decyzji przez węzły A_p . Na podstawie prognozowanych rozwiązań optymalizatorów przewidywalnych dokonywana jest ocena decyzji podejmowanej w momencie opracowania prognozy, przy uwzględnieniu konsekwencji tej decyzji w sieci problemów zależnych. W antycypacyjnym modelu decyzyjnym parametry tych problemów są zależne od wyboru decyzji w problemie rozwiązywanym w chwili obecnej. Taki model podejmowania decyzji analizowany był m.in. w pracach Skulimowskiego (1985, 2014a).

Oprócz statycznych problemów typu (1) można także rozważać sytuację, gdy zbiór optymalizatorów przewidywalnych tworzy **antycypacyjny system decyzyjny** (Rosen 1985) dla problemu wielokryterialnego sterowania optymalnego ze sprzężeniem zwrotnym:

$$\dot{x} = h(x, u), u(t) = g(x(t), \hat{x}(t, t + \tau)) \quad (2)$$

gdzie $\hat{x}(t, t + \tau)$ oznacza prognozę stanu x po upływie czasu τ dostępną w chwili t , a funkcje h i g opisują odpowiednio dynamikę układu otwartego i sprzężenia zwrotnego. Analogicznie można zdefiniować antycypacyjny system decyzyjny z czasem dyskretnym.

Powyższa teoria może być zastosowana do modelowania i prognozowania konsekwencji decyzji w powiązanych systemach antycypacyjnych (Skulimowski 2014a, 2019), gdzie dopuszczalne zakresy przyszłych decyzji generowanych przez optymalizatory są prognozowane w oparciu o założenie racjonalności podejmowanej decyzji. Oznacza to,

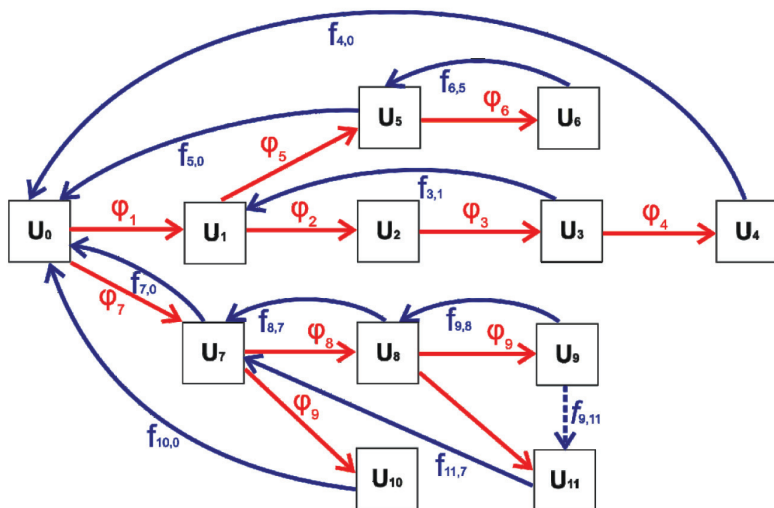
że do podjęcia decyzji w chwili t wykorzystywana jest znajomość przez decydenta parametrów sieci optymalizatorów przewidywalnych aż do horyzontu prognozowania $t + \tau$. W szczególności należy zapewnić, by decydent w problemie (1) znał charakterystyki powiązań tego problemu z optymalizatorami przewidywalnymi, strukturę podsieci A_P oraz sposób uwzględnienia struktur preferencji w algorytmach decyzyjnych węzłów A_P .

W artykułach Skulimowskiego (2014a, 2016, 2019) przedstawione zostały bliżej klasy praktycznych problemów, w których powiązania pomiędzy zbiorami dopuszczalnymi rozwiązań przyszłych problemów pozwalają na selekcję racjonalnych decyzji w problemie rozwiązywanym obecnie. W cytowanych wyżej pracach założono, że zakres decyzji w problemie O_{i+1} zależy od rozwiązania przynajmniej jednego poprzedzającego go problemu O_i , tj. znane są odwzorowania wielowartościowe $\varphi(i)$ takie, że $\varphi(i): = Y(i) \circ F_{i-1}$ dla pewnej funkcji wielowartościowej $Y(i): F_{i-1}(U_{i-1}) \rightarrow U_i$ określającej zależność zakresu decyzji w problemie O_{i+1} od wartości kryteriów F_{i-1} dla rozwiązania problemu O_i . Dodatkowo przyjęte zostało założenie, że antycypacyjny sposób podejmowania decyzji w problemie (2) stosowany jest we wszystkich optymalizatorach przewidywalnych, przy czym każdy z nich bierze pod uwagę jedynie konsekwencje własnych decyzji dla wybranych optymalizatorów w sieci. W omawianym modelu funkcje wielowartościowe $Y(i)$ opisują związki kauzalne, a konsekwencją wyboru decyzji w problemie O_k jest określenie zakresu wyboru rozwiązania przyszłego problemu O_m . Wzięcie pod uwagę przez decydenta rozwiązującego problem O_k obok natywnej struktury preferencji P_k również preferencji dotyczących prognozowanych rozwiązań problemu O_m stanowi sprzężenie informacyjne pomiędzy O_k a O_m nazywane **sprężeniem antycypacyjnym**.

Dla opisanego wyżej modelu sformułować można wiele wariantów problemów antycypacyjnego podejmowania decyzji różniących się sposobem uwzględnienia konsekwencji wcześniejszych decyzji i modelami preferencji. W dotychczas rozważanych modelach podejmowania decyzji w sieciach antycypacyjnych sprzężenia te polegały z reguły na wskazaniu podzbioru decyzji $V_{m,k} \subset U_m$ preferowanych przez O_k .

Konstruktywne algorytmy rozwiązywania problemów antycypacyjnego podejmowania decyzji w sieci optymalizatorów przewidywalnych, w których zbiór alternatyw decyzyjnych jest skończony, a wszyscy decydenci podejmują racjonalne decyzje, znaleźć można w pracach Skulimowskiego (2014a, 2016). Przypomnijmy, że przez racjonalność rozumiemy tu wybór rozwiązania zgodnego ze strukturą preferencji decydenta. Przykłady rozwiązań antycypacyjnych problemów dyskretnych oraz potencjalne zastosowania tego modelu do konstrukcji scenariuszowych prognoz rozwoju technologii informatycznych podane zostały w cytowanym wyżej artykule Skulimowskiego (2014a).

Przykładowy sposób powiązania problemów decyzyjnych w sieci antycypacyjnej przedstawiony jest na rysunku 2.



Rys. 2. Przykład sieci powiązań kauzalnych pomiędzy problemami decyzyjnymi $U_i, i = 0, 1, \dots, 11$ (krawędzie czerwone) ze sprzężeniami antycypacyjnymi (krawędzie niebieskie). Linia przerywaną oznaczono sprzężenie pomiędzy niepowiązanymi optymalizatorami i z tego powodu nieistotne
Źródło: opracowanie własne na podstawie Skulimowski (2014a)

Badania LAiWD w zakresie analizy procesów decyzyjnych w systemach autonomicznych pozwoliły na zdefiniowanie nowej klasy autonomicznych systemów decyzyjnych sztucznej inteligencji (AADS – *Artificial Autonomous Decision Systems*) (Skulimowski 2014c). Systemy te sklasyfikowane są przez przypisanie do jednej z klas autonomii zdefiniowanych za pomocą aparatu pojęciowego wielokryterialnej teorii decyzji (Skulimowski 2011). Zgodnie z tą teorią wyróżnione zostały następujące klasy:

- systemy zdolne do swobodnego wyboru decyzji z zadanego zakresu,
- systemy mogące samodzielnie rozszerzyć zakres decyzji (przesunąć lub rozszerzyć ograniczenia),
- systemy zdolne do zmiany celu działania lub kryterium optymalizacji.

Klasyfikacją uzupełniającą zdolność autonomicznego wyboru decyzji jest swoboda gromadzenia i przetwarzania informacji o potencjalnym zakresie i dostępności decyzji oraz o parametrach otoczenia. Grupę nadrzędną, wymagającą spełnienia wszystkich wskazanych wyżej warunków autonomii, stanowią sztuczne systemy kreatywne, które zdolne są do formułowania i rozwiązywania problemów decyzyjnych spoza wcześniej znanego obszaru (Skulimowski 2011, Skulimowski i Kacprzyk 2016). Do klasyfikacji i projektowania systemów autonomicznych, zwłaszcza antycypacyjnych, w coraz większym zakresie stosowane są metody logiki modalnej dla modeli wieloagentowych, spośród których największą popularność zdobyła logika BDI (*Belief-Desire-Intention*) (Bratman 1989, Bremner i in. 2022).

3. Systemy wspomaganie decyzji w zarządzaniu bezpieczeństwem przemysłowym

Ważnym kierunkiem badawczym LAiWD, który jest realizowany we współpracy z Grupą Tauron SA (Skulimowski i Łydek 2022), jest opracowanie koncepcji i wdrożenie systemu wspomaganie decyzji dla celów zarządzania zagrożeniami przemysłowymi. Zgodnie z przyjętymi założeniami system ten będzie optymalnie wykorzystywał możliwości, jakie daje zastosowanie metod analizy wielokryterialnej, analizy i fuzji sygnałów oraz uczenia maszynowego. Planowane wdrożenie takiego systemu znacząco podniesie poziom bezpieczeństwa zarówno technicznego, jak i BHP w jednym z przedsiębiorstwach Grupy.

Projekt systemu wspomaganie decyzji zakłada połączenie wykorzystywanych już obecnie u przedsiębiorcy (Kopalnia Wapienia Czatkowice, dalej KWC) technik monitoringu wizyjnego oraz nowych rozwiązań, takich jak systemy radarowe wsparte przez autonomiczne jednostki latające (UAV, drony) oraz naziemne roboty inspekcyjne. Możliwości, jakie dają obecnie nowoczesne systemy aktywnej obserwacji (w paśmie widzialnym, podczerwieni, radarowe, lidarowe i inne), pozwalają zaprojektować siatkę wzajemnie wspomagających się urządzeń obserwacyjno-pomiarowych pokrywając swoim zasięgiem rozległy i trudny do patrolowania teren. Koncepcja zarządzania zagrożeniami zakłada integrację systemu obserwacyjnego z systemami identyfikacji i przeciwdziałania zagrożeniom. Zastosowanie metod sztucznej inteligencji (AI) oraz uczenia maszynowego (ML) zapewnia odróżnienie obiektu niegroźnego i neutralnego pod względem bezpieczeństwa zakładu, takiego jak na przykład nieduże zwierzę leśne, od właściwych zagrożeń, których identyfikacja i dalsze śledzenie przez system są konieczne dla zapewnienia wymaganego poziomu bezpieczeństwa. Do zagrożeń takich należy pojawienie się na monitorowanym terenie nieuprawnionych osób, dymu czy ognia.

Identyfikacja i klasyfikacja zagrożenia inicjuje procedurę alarmową. W zależności od oceny sytuacji decyzje mogą być podejmowane w sposób autonomiczny lub system ogranicza się wyłącznie do wspomaganie decyzji operatora. Istotnym komponentem systemu są algorytmy filtracji i fuzji informacji pozyskiwanych z różnych źródeł w czasie rzeczywistym. Wstępne przetworzenie tych informacji pozwala na wykorzystanie ich w optymalny sposób w algorytmach decyzyjnych (Górecki i Skulimowski 1986, Skulimowski i Łydek 2022). Integracja różnych technologii opartych na metodach sztucznej inteligencji jest elementem holistycznego systemu bezpieczeństwa przedsiębiorstwa. Analizy ryzyk prowadzone przez KWC jednoznacznie wskazują na konieczność uszczelnienia granic terenu eksploatacji i zabezpieczenia się przed możliwością intruzji przez osoby niepożądane. Ze względu na charakter prowadzonej działalności – pracę na rozległym, trudnym, a miejscami niemożliwym do ogrodzenia terenie oraz ciągle poszerzanie terenu eksploatacji – wymagane jest wdrożenie nowoczesnych metod analityki decyzyjnej w przeznaczonym do rozwiązywania problemów bezpieczeństwa systemie wspomaganie decyzji. Projektowanie i implementacja takiego systemu wymagają podejścia

holistycznego, tj. jednoczesnego wdrożenia wielu nowoczesnych technologii monitoringu i prewencji wspartych przez techniki ML, AI oraz analizy decyzyjnej.

Sposób prowadzonej eksploatacji oraz rodzaj złoża wapienia w KWC generuje ryzyko powstania niebezpiecznych dla ludzi i maszyn zjawisk, jakimi są obsunięcia się mas skalnych. Opracowana w LAiWD koncepcja systemu zarządzania bezpieczeństwem zakłada możliwość wykorzystania autonomicznych robotów inspekcyjnych naziemnych lub dronów wyposażonych w odpowiednią aparaturę pomiarową także do cyklicznej analizy stanu wyrobiska górniczego w celu identyfikacji potencjalnych zagrożeń. Rejestrowane obrazy z obszaru inspekcji zostaną poddane analizie przez moduł automatycznej interpretacji obrazu wykorzystujący algorytmy AI oparte na sztucznych sieciach neuronowych. System wskaże miejsca zagrożone obsunięciami mas skalnych oraz zlokalizuje obszary o niejednorodnej strukturze geologicznej, które w sposób naturalny mogą ulec przemieszczeniu na skutek ruchu maszyn czy prowadzonych tam prac eksploatacyjnych i strzelniczych. W tym celu potencjalnie zastosowane mogą zostać również kamery monitoringu wizyjnego typu PTZ (*pan-tilt-zoom*), które operator może ręcznie nakierować na dowolny fragment złoża. Schemat implementacji systemu wspomagania decyzji w jego otoczeniu przemysłowym przedstawiony jest na rysunku 3.



Rys. 3. System podejmowania decyzji (iSWD) w sytuacji zagrożenia i jego otoczenie

Źródło: opracowanie własne na podstawie Skulimowski i Łydek (2022)

W systemie wspomagania decyzji dotyczących zarządzania bezpieczeństwem przemysłowym w KWC ważną rolę będzie odgrywać autorski algorytm wyszukiwania i priorytetyzacji optymalnych dróg ewakuacji sprzętu z zagrożonej części terenu kopalni. Algorytmy oparte na metodach AI umożliwią dostosowanie przebiegu ewakuacji do konkretnych uwarunkowań geologicznych eksploatowanego złoża w sytuacjach zagrożeń, do których należą np. ulewne opady. Taka analiza będzie też podstawą do planowania inwestycji wpływających na obniżenie ryzyka przemysłowego w przyszłości. Z kolei zastosowanie metod analizy obrazu opartych na ML, zwłaszcza na głębokich sieciach neuronowych, pozwoli wykorzystać potencjał nowych technologii także do takich celów, jak objętościowe szacowanie urobku. Wśród korzyści dla przedsiębiorstwa wynikających z wdrożenia systemu wspomagania decyzji wymienić należy również spełnienie coraz bardziej restrykcyjnych norm bezpieczeństwa technicznego. Tym samym dzięki współpracy z LAiWD w obszarze bezpieczeństwa przemysłowego KWC dołączy do grupy przedsiębiorstw nowoczesnych, zaawansowanych technologicznie oraz zapewniających pracownikom najwyższe standardy bezpieczeństwa.

Przykład ilustrujący sytuację, w której zastosowane mogą być algorytmy ewakuacji oparte na wielokryterialnej analizie decyzyjnej, pokazany jest na rysunku 4.



Rys. 4. Widok zagrożonego terenu przemysłowego, na którym elipsami zaznaczono bezpieczne obszary jako docelowe miejsca ewakuacji sprzętu nadzorowanej przez system wspomagania decyzji. System wskazuje obszar docelowy dla każdej maszyny, dokonując jednoczesnej minimalizacji sumarycznych wartości oczekiwanych czasu dotarcia do tych obszarów oraz uszkodzeń podczas ewakuacji.
Powierzchnia terenu na fotografii wynosi około $1,3 \text{ km}^2$

Podczas ewakuacji pojazdów z zagrożonego terenu pojawić się może także problem omijania przeszkód spowodowanych przez osuwiska lub spadające skały. Gdy pojazdy poruszają się po wydzielonych drogach, które mogą albo być przejezdne, albo wycofane z ruchu z powodu pojawienia się przeszkody, wówczas problem ewakuacji może być scharakteryzowany jako kombinatoryczny problem omijania przeszkód. Przeszkody mogą być też usuwane przez załogi ewakuowanego sprzętu lub ekipy ratunkowe. Rozwiązanie tego problemu polega na analizie wielokryterialnych najkrótszych ścieżek w zależnym od czasu grafie połączeń drogowych, w którym odcinki dróg (krawędzie) z przeszkodami są podczas obliczeń pomijane, a ich ponowne uwzględnienie następuje po usunięciu przeszkód. Optymalizowanymi kryteriami są tutaj suma oczekiwanych czasów dotarcia do bezpiecznego obszaru przez każdą ewakuowaną maszynę oraz sumaryczna wartość uszkodzeń sprzętu podczas ewakuacji. Oba te kryteria są minimalizowane. Do rozwiązywania problemów tego typu, a także zagadnień występujących przy wyborze konfiguracji iSWD przeznaczonego do zarządzania bezpieczeństwem przemysłowym, zastosowane zostały algorytmy genetyczne z pamięcią poszukiwań.

4. Przegląd pozostałych planów i kierunków badawczych LAiWD

Wśród dalszych planów i kierunków badawczych LAiWD, które nie zostały przedstawione w rozdziałach 2 i 3, w pierwszej kolejności wymienić należy badania w następujących obszarach:

- Rozwój metody dynamicznych rankingów (Skulimowski 2012) wraz z zastosowaniami do analizy priorytetów badawczych, ewaluacji strategii rozwojowych i finansowania projektów. Dynamiczne rankingi są podstawą do podejmowania decyzji dotyczących wyboru rozwiązań problemów wielokryterialnych, takich jak wybór finansowanych projektów, celów strategicznych itp. z uwzględnieniem nie tylko rankingów obiektów aktualnych w chwili podejmowania decyzji, lecz również prognozowanych, w tym także scenariuszowo, zmian uszeregowania obiektów w przyszłości. O teoretycznej nowości i praktycznym znaczeniu metody decyduje możliwość uwzględnienia sprzężenia zwrotnego wynikającego z wpływu decyzji podejmowanych na podstawie rankingu w chwili t na uporządkowanie obiektów w chwili $t + 1$. Przykładem takich sprzężeń jest wpływ realizacji projektów infrastrukturalnych, wybieranych z uwzględnieniem potrzeb wyznaczanych przez aktualny stan infrastruktury, na stan tej infrastruktury w przyszłości, a tym samym na przyszłe rankingi potrzeb. Uwzględnienie takich zależności pozwala na stworzenie jakościowo nowych modeli planowania strategicznego, których wynikiem powinno być opracowanie istotnie lepszych dokumentów strategicznych, np. dotyczących rozwoju innowacyjności cyfrowej. Modele te opierają się na połączeniu programowania dynamicznego dla grafów o zmiennej strukturze z generowaniem tzw. scenariuszy elementarnych w systemach zdarzeń dyskretnych.

- Nowe metody transformacji i dekompozycji szeregów czasowych oparte na analizie wartości ekstremalnych szeregu czasowego, które tworzą rekurencyjnie konstruowany ciąg podszeregów pochodnych (Skulimowski 2014b). Dla wiązki podszeregów uzyskanej z analizowanego szeregu czasowego wyznaczyć można drzewa dekompozycji, a także dokonać pomiaru entropii i zawartości informacyjnej szeregu. Metoda ta zastosowana została do drzew entropii otrzymanych w wyniku analizy wartości ekstremalnych szeregu czasowego. Rozszerzeniem tego podejścia jest analiza szeregów czasowych o wartościach grafowych. Opracowane do tej pory metody prognostyczne wykorzystują szeregi pochodne różnych rzędów do prognozowania ekonometrycznego i finansowego, m.in. rynków walutowych.
- Metody wyboru decyzji kompromisowych w wielopoziomowych i hierarchicznych problemach optymalizacji i rankingowania wielokryterialnego. Wspólną cechą tych metod jest możliwość jednoczesnego wykorzystania zarówno informacji o preferencjach bezpośrednich – dotyczących wartości funkcji kryterialnych, jak i informacji dualnych – dotyczących współczynników zamiany tych funkcji dla dowolnych stożków wypukłych wprowadzających porządek częściowy w przestrzeni kryteriów. Metody te stosowane będą m.in. w roadmappingu technologicznym (Skulimowski i Pukocz 2012) i kooperacyjnym (Skulimowski 2022), a także w modelowaniu ewolucji technologicznej (von der Gracht i in. 2015, Skulimowski i Badecka 2019). Kolejnym zastosowaniem wspomnianych wyżej metod wielokryterialnego wyboru i wspomaganie decyzji jest automatyczna estymacja struktur preferencji w zagadnieniu poszukiwania i wyboru obiektów w multimedialnych bazach danych.
- Uogólnienia metody punktu odniesienia na przypadek wielowartościowego odwzorowania referencyjnego w problemach wielokryterialnego sterowania optymalnego, w tym problemach typu *multicriteria model predictive control* (Skulimowski 2013). Metoda ta pozwala na adaptacyjne dostosowanie modelu preferencji do zmiennych prognoz parametrów modelu układu sterowania. Ponadto zamiast trajektorii odniesienia zastosowano funkcję wielowartościową, która w bardziej adekwatny sposób modeluje niepewność dotyczącą pożądanego przebiegu trajektorii systemu.
- Pozostałe badania w zakresie teorii optymalizacji wielokryterialnej, w tym zwłaszcza badanie uogólnień punktów idealnych dla porządku częściowego generowanego przez stożek wypukły Φ (Skulimowski 2019b). Jednoznaczność i inne własności zbiorów idealnych mogą być badane dzięki ich dualnej reprezentacji jako elementów niezdominowanych zbioru całkowicie dominującego (czyli takiego, w którym każdy jego element dominuje wszystkie punkty osiągalne) względem negatywnego stożka $(-\Phi)$. Wyniki te będą zastosowane do badania niezależności kryteriów optymalizacji.

Oprócz zagadnień wymienionych wyżej kontynuowane będą również badania dotyczące podstaw teorii systemów autonomicznych i teorii swobody decyzyjnej oraz ich

zastosowań w projektowaniu współpracy robotów (Skulimowski i Ćwik 2017, Skulimowski i in. 2021). Badania te obejmować będą m.in. racjonalność procedur wspomagania decyzji, które powinny wykorzystywać i odpowiednio przetwarzać całość informacji o strukturze preferencji decydenta oraz zapewnić spójność logiczną tej struktury.

5. Podsumowanie

Sukcesy zespołu Laboratorium Analizy i Wspomagania Decyzji nie byłyby możliwe bez intensywniej współpracy naukowej z wieloma czołowymi zespołami w kraju i za granicą. Szczególnie ważne w okresie pandemii COVID-19 okazało się wsparcie w ramach programu Akademickie Partnerstwa Międzynarodowe Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej (NAWA), które w latach 2018–2022 umożliwiło współpracę z Katedrą Systemów Informacyjnych na Uniwersytecie Pablo de Olavide w Sewilli (Bañuls i in. 2021, Skulimowski i Bañuls 2021), a także z innymi ośrodkami naukowymi, takimi jak Uniwersytet Techniczny w Dreźnie (Köhler i Skulimowski 2019), Tamkang University w Tajpej czy Uniwersytet w Amsterdamie (VUA). W kolejnych latach planowany jest dalszy rozwój tej współpracy, a także jej rozszerzenie na nowe obszary badawcze i ośrodki naukowe. Szczególnie obiecujące jest wzrastające zainteresowanie badaczy z wielu ośrodków metodami sieci antycypacyjnych w zastosowaniu do projektowania mechanizmów decyzyjnych zespołów robotów mobilnych. Kontynuowane będą również badania zmierzające do umożliwienia dalszych wdrożeń metod analizy wielokryterialnej opracowanych w LAiWD w systemach wspomagania decyzji dla celów zarządzania kryzysowego, w tym w systemach zarządzania sztucznymi zbiornikami wodnymi podczas zagrożenia powodziowego (Skulimowski 2013) oraz w sytuacjach zagrożeń osuwiskami i lawinami skalnymi (Skulimowski i Łydek 2022).

Literatura

- Bañuls V.A., Skulimowski A.M.J., Begines J.A.R., 2021, *Disaster resilience modeling of municipal water supply infrastructures in the context of atmospheric threats*, [w:] Adrot A., Grace R., Moore K., Zobel Ch. (eds.), *ISCRAM 2021: 18th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management: Blacksburg, Virginia USA, May 23–26, 2021: Conference Proceedings*, Virginia Tech, Blacksburg, s. 198–207.
- Bratman M.E., 1989, *Intention and personal policies*, *Philosophical Perspectives*, vol. 3, s. 443–469. <https://doi.org/10.2307/2214277>.
- Bremner P., Dennis L.A., Fisher M., Winfield A.F., 2019, *On Proactive, Transparent, and Verifiable Ethical Reasoning for Robots*, *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 3, s. 541–561. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2898267>.

- Cao L.B., 2023, *AI in Finance: Challenges, Techniques, and Opportunities*, ACM Computing Surveys, vol. 55, no. 3, 64. <https://doi.org/10.1145/3502289>.
- Chmiel W., Kadłuczka P., Kwiecień J., Filipowicz B., Pukocz P., 2016, *Strategic Planning Optimization Using Tabu Search Algorithm*, [w:] Skulimowski A.M.J., Kacprzyk J. (eds.), *Knowledge, Information and Creativity Support Systems: Recent Trends, Advances and Solutions: selected papers from KICSS'2013 – 8th International Conference on Knowledge, Information, and Creativity Support Systems, November 7–9, 2013, Kraków, Poland*, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 316, Springer, Cham, s. 315–328. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19090-7_24.
- Górecki H., Skulimowski A.M.J., 1986, *A Joint Consideration of Multiple Reference Points in Multicriteria Decision Making*, Foundations of Control Engineering, vol. 11, no. 2, s. 81–94.
- Gracht H.A., von der, Bañuls V.A., Turoff M., Skulimowski A.M.J., Gordon T.J., 2015, *Foresight support systems: The future role of ICT for foresight*, Technological Forecasting and Social Change, vol. 97, s. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.08.010>.
- Jamróg A., Skulimowski A.M.J., 2011, *Modelowanie procesów decyzyjnych w finansach i zarządzaniu innowacjami*, PAR Pomiar Automatyka Robotyka, t. 15, nr 12, s. 249–251.
- Jomah O.S.M., 2012, *Global Optimization Methods for Solving Multicriteria Optimal Control Problems*, WEAIiB AGH, Kraków [rozprawa doktorska].
- Köhler T., Skulimowski A.M.J., 2019, *Triggering research creativity and increasing efficiency through open innovation platforms*, [w:] 2019 8th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI), 7–11 July 2019, Toyama, Japan: proceedings, IEEE, Piscataway, s. 49–55. <https://doi.org/10.1109/IIAI-AAI.2019.00021>.
- Pukocz P., 2021, *Implementacja cyfrowego Paszportu Szczepień COVID-19 bazującego na Blockchain chroniący prywatność*, PAR Pomiar Automatyka Robotyka, t. 25, nr 2, s. 61–76. https://doi.org/10.14313/PAR_240/61.
- Rosen R., 1985, *Anticipatory Systems: Philosophical, Mathematical and Methodological Foundations*, Pergamon Press, London.
- Rotter P., Skulimowski A.M.J., 2008, *A New Approach to Interactive Visual Search with RBF Networks Based on Preference Modelling*, [w:] Rutkowski L., Tadeusiewicz R., Zadeh L.A., Zurada J.M. (eds.), *Artificial Intelligence and Soft Computing – ICAISC 2008: 9th International Conference: Zakopane, Poland, June 22–26, 2008: proceedings*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol. 5097, Springer, Berlin – Heidelberg, s. 861–873. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69731-2_82.
- Skulimowski A.M.J., 1985, *Solving Vector Optimization Problems via Multilevel Analysis of Foreseen Consequences*, Foundations of Control Engineering, vol. 10, no. 1, s. 25–38.

- Skulimowski A.M.J., 1991, *Optimal Control of Asynchronous Discrete Event Systems*, IFAC Proceedings Volumes, vol. 23. no. 8, part 3, s. 489–495. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)51963-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)51963-1).
- Skulimowski A.M.J., 2011, *Freedom of Choice and Creativity in Multicriteria Decision Making*, [w:] Theeramunkong T., Kunifuji S., Sornlertlamvanich V., Nattee C. (eds.), *Knowledge, Information, and Creativity Support Systems: 5th International Conference, KICSS 2010: Chiang Mai, Thailand, November 25–27, 2010: revised selected papers*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol. 6746, Springer, Berlin – Heidelberg, s. 190–203. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24788-0_18.
- Skulimowski A.M.J., 2012, *Metody prognozowania dynamicznych rankingów priorytetów technologicznych*, [w:] Trzaskalik T. (red.), *Modelowanie preferencji a ryzyko '12*, Studia Ekonomiczne – Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach, t. 97, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego, Katowice, s. 193–212.
- Skulimowski A.M.J., 2013, *Solving multicriteria optimal control problems with reference multifunctions*, [w:] *MMAR 2013: 18th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics: 26–29 August 2013, Międzyzdroje, Poland: program, abstracts, proceedings*, West Pomeranian University of Technology. Faculty of Electrical Engineering, Szczecin, s. 39–59. <https://doi.org/10.1080/00207721.2012.670308>.
- Skulimowski A.M.J., 2014a, *Anticipatory network models of multicriteria decision-making processes*, International Journal of Systems Science, vol. 45, no. 1, s. 39–59. <https://doi.org/10.1080/00207721.2012.670308>.
- Skulimowski A.M.J., 2014b, *Revealing complexity-related time-series features with the Monotonic Aggregation Transform*, [w:] *ICTAI 2014: 2014 IEEE 26th International Conference on Tools with Artificial Intelligence: 10–12 November 2014, Limassol, Cyprus*, IEEE Computer Society, s. 694–700. <https://doi.org/10.1109/ICTAI.2014.109>.
- Skulimowski A.M.J., 2014c, *Future Prospects of Human Interaction with Artificial Autonomous Systems*, [w:] Bouchachia A. (ed.), *Adaptive and Intelligent Systems: Third International Conference, ICAIS 2014, Bournemouth, UK, September 8–10, 2014: proceedings*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol. 8779, Springer, Berlin – Heidelberg, s. 131–141. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11298-5_14.
- Skulimowski A.M.J., 2016, *Anticipatory Control of Vehicle Swarms with Virtual Supervision*, [w:] Hsu Ch., Wang S., Zhou A., Shawkat A. (eds.), *Internet of Vehicles – Technologies And Services: Third International Conference, IOV 2016: Nadi, Fiji, December 7–10, 2016: proceedings*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 10036, Springer, Cham, s. 65–81. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51969-2_6.
- Skulimowski A.M.J., 2019a, *Generalized ideal points*, [w:] *LeGO 2018: 14th International Global Optimization Workshop: 18–21 September 2018, Leiden, The Netherlands: proceedings*, AIP Conference Proceedings, vol. 2070, s. 020055-1–020055-4. <https://doi.org/10.1063/1.5090022>.

- Skulimowski A.M.J., 2019b, *Anticipatory Networks*, [w:] Poli R. (ed.), *Handbook of Anticipation: Theoretical and Applied Aspects of the Use of Future in Decision Making*, Springer, Cham, s. 995–1030. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31737-3_22-1.
- Skulimowski A.M.J., 2021, *User Community Development in Social Networks to Support AI-Enabled Knowledge Provision*, [w:] *ICIS 2021: International Conference on Information Systems: building sustainability and resilience with IS: a call for action: Austin, Texas, December 12–15, 2021: proceedings*, Association for Information Systems, Austin, s. 1–17
- Skulimowski A.M.J., 2022, *Roadmapping Collaborative Exploitation and Marketing of an AI-Based Knowledge Platform*, [w:] Reis J.L., López E.P., Moutinho L., Santos J.P.M.d. (eds.), *Marketing and Smart Technologies*, Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 279, Springer, Singapore, s. 55–66. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9268-0_5.
- Skulimowski A.M.J., Badecka I., 2019, *User Interaction with a Technology Evolution Model to Select Most Viable Enterprise Information Systems*, [w:] *SOCA 2019: 2019 IEEE 12th Conference on Service-Oriented Computing and Applications: Kaohsiung, Taiwan, 18–21 November 2019: proceedings*, IEEE, Piscataway, s. 154–161. <https://doi.org/10.1109/SOCA.2019.00030>.
- Skulimowski A.M.J., Bañuls V.A., 2021, *AI Alignment of Disaster Resilience Management Support Systems*, [w:] Rutkowski L., Scherer R., Korytkowski M., Pedrycz W., Tadeusiewicz R., Zurada J.M. (eds.), *Artificial Intelligence and Soft Computing: 20th International Conference, ICAISC 2021: virtual event, June 21–23, 2021: proceedings, Pt. 2*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 12855, Springer, Cham, s. 354–366. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87897-9_32.
- Skulimowski A.M.J., Ćwik A., 2017, *Communication Quality in Anticipatory Vehicle Swarms: A Simulation-Based Model*, [w:] Peng S.L., Lee G.L., Klette R., Hsu C.H. (eds.), *Internet of Vehicles – technologies and services for smart cities: 4th International Conference, IOV 2017: Kanazawa, Japan, November 22–25, 2017: proceedings*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 10689, Springer, Cham, s. 119–134. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72329-7_11
- Skulimowski A.M.J., Kacprzyk J. (eds.), 2016, *Knowledge, Information and Creativity Support Systems: Recent Trends, Advances and Solutions: selected papers from KICSS'2013 – 8th International Conference on Knowledge, Information, and Creativity Support Systems, November 7–9, 2013, Kraków, Poland*, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 364, Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19090-7>.
- Skulimowski A.M.J., Łydek P., 2022, *AI-based design of decision support systems for industrial risk management*, [w:] *PP-RAI'2022: Proceedings of the 3rd Polish Conference on Artificial Intelligence: April 25–27, 2022, Gdynia, Poland*, Gdynia Maritime University, Gdynia, s. 138–142.

- Skulimowski A.M.J., Pukocz P., 2012, *Enhancing Creativity of Strategic Decision Processes by Technological Roadmapping and Foresight*, [w:] *KICSS 2012: Seventh International Conference on Knowledge, Information and Creativity Support Systems: Melbourne, Victoria, Australia, 8–10 November 2012*, Computer Society CPS, IEEE, Piscataway, s. 223–230. <https://doi.org/10.1109/KICSS.2012.42>.
- Skulimowski A.M.J., Pukocz P., Badecka I., Kara M., 2021, *A Novel Software Architecture of Anticipatory Harvesting Robot Teams*, [w:] *MMAR 2021: 2021 25th International Conference on Methods and Models in Automation & Robotics: August 23–26, 2021, Międzyzdroje, Poland*, IEEE, Piscataway, s. 47–52. <https://doi.org/10.1109/MMAR49549.2021.9528474>.
- Vagliano I., Günther F., Heinz M., Apaolaza A., Bienia I., Breitfuss G., Blume T. i in., 2018, *Open Innovation in the Big Data Era with the MOVING Platform*, IEEE MultiMedia, vol. 25, no. 3, s. 8–21. <https://doi.org/10.1109/MMUL.2018.2873495>.