

# Akcje w środowiskach złożonych informacyjnie: podejście parakonsystentne

Autoreferat

Łukasz Białek\*

## 1. Wprowadzenie

Otoczający nas świat jest rozległym i złożonym miejscem. Każdego dnia mamy do czynienia z ogromną ilością informacji pochodzących z różnorodnych źródeł. Z racji znacznego stopnia skomplikowania środowiska, mogą one po części być sprzeczne. Nasze mózgi są jednak wyposażone w mechanizmy filtrowania i wykorzystywania takich informacji co pozwala nam na budowanie użytecznych modeli zewnętrznego świata. Oczywiście nie posiadamy wiedzy o całym świecie. Co więcej, w rzeczywistości zwykle nie mamy wiedzy o większości wydarzeń zachodzących w tym świecie. Gdy zapyta się nas o jakieś fakty spoza obszaru naszych przekonań nie odpowiadamy po prostu “tak” lub “nie” ale zwykle stwierdzamy, że “nie wiemy”.

Ludzie żyją w złożonym informacyjnie środowisku radząc sobie ze sprzeczną i niepełną wiedzą każdego dnia. Na podstawie obserwacji budujemy przekonania o otaczającym nas świecie i planujemy posunięcia do nich dostosowane. Ponadto, doświadczenie zebrane przez lata wyposaża nas w repertuar całych ciągów akcji pozwalających nam na szybsze osiągnięcie zamierzonych celów. Niektóre z akcji prowadzą jednak do sytuacji, których nie akceptujemy, sprzecznych z naszymi przekonaniami. Dlatego też staramy się ich unikać tak długo jak to możliwe. Od czasu do czasu, w celu osiągnięcia jakichś konkretnych celów, jesteśmy jednak skłonni czasowo zmienić lub zawiesić nasze przekonania. W ogólności, trwałe ich zmiany nie zdarzają się często.

Powyższy opis odzwierciedla codzienne zachowanie ludzi. Między innym z tego powodu naukowcy zdecydowali się na zaadaptowanie wybranych elementów tego podejścia do systemów wieloagentowych, mając nadzieję na stworzenie zaawansowanych rozwiązań pozwalających na modelowanie rzeczywistych scenariuszy. Praca przedstawiona w tej rozprawie wpasowuje się w tę linię badań łącząc ze sobą istniejące podejścia, wprowadzając jednocześnie nowe rozwiązania przeznaczone do pracy z przekonaniami i akcjami. Rozprawa weryfikuje również otrzymane wyniki używając opracowanego w tym celu oprogramowania.

## 2. Omówienie dziedziny

W celu zachowania naturalności modelowania światów, potrzebna jest nam logika potrafiąca wyrazić złożoność informacji dostępnych w tych światach. Dlatego też do tego celu wybrany został język

---

\*Adres e-mail: lukasz.bialek@mimuw.edu.pl

4QL [38–40, 52]. Język ten jest czterowartościowym językiem zapytań zaprojektowanym z myślą o wnioskowaniu i zadawaniu zapytań do baz wiedzy opartych na niepełnej i sprzecznej wiedzy. Oprócz dostarczania wsparcia dla parakonsystentnych baz wiedzy oraz wnioskowania niemonotonicznego, może on również być użyty w różnorodnych zastosowaniach. W celu zapoznania się z przeglądem blisko spokrewnionych dziedzin por. np. [6, 25]. Unikalną cechą rodziny języków opartych na 4QL jest obecność wartości logicznych *t* (*true*), *f* (*false*), *i* (*inconsistent*), *u* (*unknown*) oraz nieograniczona możliwość użycia negacji zarówno w ciałach reguł jak i w ich wnioskach utrzymując jednocześnie intuicyjność otrzymywanych wyników oraz efektywną obliczalność wyników zapytań. Ponadto, język wykorzystuje założenie *Otwartego Świata* polegającego na przypisaniu wartości logicznej *u* każdemu faktowi niewynikającemu z bazy wiedzy. Wreszcie, zestaw wyników teoretycznych otrzymanych dla tego języka zapewnia, że obliczanie modeli dla modułów oraz wyników zapytań do nich jest obliczalne w deterministycznym czasie wielomianowym. Wszystkie te cechy języka 4QL sprawiają, że jest on właściwy z punktu widzenia naszych potrzeb.

Na bazie logiki wielowartościowej chcielibyśmy zbudować narzędzie zdolne do wyrażania przekonań agentów. Problematyka modelowania przekonań przy obecności niepełnej i sprzecznej wiedzy jest omawiana np. w [12–14, 16–18, 31, 39, 43, 47, 48, 53]. W celu pełnego modelowania przekonań i wnioskowania o nich, w [17, 19] wprowadzone zostały pojęcia *profilu epistemicznego* oraz *struktury przekonań*. Zadaniem tych struktur jest przemiana “surowych” przekonań początkowych w bardziej treściwe i dojrzałe przekonania gotowe do użycia podczas wnioskowań agenta. Dynamika przekonań jest w tym podejściu adresowana poprzez użycie profili epistemicznych, które pozwalają na modelowanie zarówno przekonań odnoszących się do stanu środowiska jak i procesów myślowych agenta. Z racji tego, że [17, 19] opierają swoje wyniki na języku 4QL, są one rozwiązaniami, których używamy i rozbudowujemy w rozprawie.

Posiadając logikę zdolną do wyrażania złożonej wiedzy oraz bazy przekonań pozwalające na organizowanie przekonań agentów w ustrukturyzowane formy, możemy teraz skupić się na planowaniu akcji. Tematyka planowania akcji przy niepełnej wiedzy jest obecnie rozległą dziedziną nauki z przykładami publikacji zawierającymi, między innymi, [21, 30, 49] (patrz również referencje w tychże). Jeśli chodzi o sprzeczną wiedzę, przez długi czas środowisko naukowe starało się jej unikać i eliminować sprzeczności z bazy wiedzy. Jednakże w pewnym momencie parakonsystentność zaczęła stawać się coraz mniej unikana i obecnie jest to równie rozległa dziedzina nauki. Zmiana ta rozpoczęła się w 1989 roku za sprawą [5]. Od tego czasu perekonsystentność jest używana zarówno w systemach wieloagentowych [1–3, 56] jak i w planowaniu akcji [28]. Dostępne są również publikacje traktujące o radzeniu sobie ze sprzecznością w bazach wiedzy - patrz [29] wraz z referencjami.

Wspomniane podejścia nadal na pewnym etapie opierają się na zbiorach ukonkretnionych literalów zbudowanych na klasycznej logice dwuwartościowej. Oczywiście propozycje oparte na logice wielowartościowej również istnieją (dla przykładu QC logic [28], [4] używającego logiki Łukasiewicza dla celów planowania lub [37] rozszerzającego klasyczny SAT-solver o użycie logiki wielowartościowej). Jak widać, dziedzina badań jest bardzo rozległa. Pomimo tego nie udało nam się znaleźć rozwiązań w pełni pasujących do naszych wymagań dotyczących planowania akcji oraz używania wielowartościowej logiki do wyrażania niepełnej i sprzecznej wiedzy. Z racji tego stworzenie takiego rozwiązania stało się jednym z celów tej rozprawy doktorskiej.

Korzystając z opisu zawartego na początku Sekcji 1 możemy określić dodatkowe trzy funkcjonalności, w które, naszym zdaniem, powinien być wyposażony silnik planowania: możliwość blokowania dostępu do niektórych stanów bazy wiedzy, wsparcie dla przejściowej zmiany przekonań oraz możliwość definiowania wzorców akcji pozwalających na polepszenie wydajności procesu planowania. Patrząc na pierwszą funkcjonalność, mając do czynienia z dynamicznymi środowiskami, rzeczywiście warto mieć jakieś zabezpieczenie przez niechcianymi stanami przekonań - szczególnie jeśli ak-

tualizacje przekonań są generowane automatycznie, bez nadzoru operatora. W takich przypadkach więzy integralności wydają się być szczególnie przydatne. Oczywiście idea więzów nie jest nowa w systemach informacyjnych (patrz np. [15, 27, 32, 46, 50]), gdzie dodatkowo mogą one być podzielone na więzy twarde i elastyczne [42]. Podczas gdy twarde więzy nie mogą być naruszone, elastyczne często są postrzegane bardziej jako preferencje, których złamanie powinno być unikane najdłużej jak to możliwe. Idea podziału więzów na dwie kategorie jest powszechnie stosowana i dlatego zdecydowaliśmy się zaaplikować ją również w naszym rozwiązaniu.

Idąc dalej, przejściowa zmiana przekonań jest obecna w naszym codziennym życiu. Dlatego też taka możliwość powinna być udostępniona również agentom. Działalność agenta w dynamicznym środowisku nieuchronnie wiąże się ze zmianą/rewizją/aktualizacją/łączeniem przekonań co powoduje znaczną ilość problemów natury teoretycznej i praktycznej [11, 33, 45]. W takich przypadkach aktualizacja oraz rewizja przekonań znajduje się w głównym nurcie badań (por. np. [26, 34–36, 41, 45] wraz z referencjami). Co ważne, rewizja przekonań została uznana za jedno z najbardziej fundamentalnych zagadnień badawczych [23, 24] których celem jest uzyskanie spójnych i deterministycznych rozwiązań. Jednakże, pomimo niezaprzeczalnych zalet, modyfikacja przekonań może być obliczeniowo droga oraz powodować dodatkowe problemy jak niedookreślenie będące brakiem jednoznacznego określania reguł przeznaczonych do usunięcia. W przypadku przekonań grupowych (np. praca zespołowa) sytuacja staje się jeszcze bardziej złożona [20]. Dlatego też postanowiliśmy opracować własne rozwiązanie łączące wydajność obliczeniową oraz wysoką ekspresywność.

Postanowiliśmy również wzbogacić nasz język specyfikowania akcji o akcje złożone łączące inne akcje przy pomocy konstrukcji znanych z języków programowania. Można zauważyć, że szablony planów są specjalnym użyciem akcji złożonych. Wachlarz zastosowań dla akcji złożonych jest jednak dużo większy,

### 3. Przedstawienie problemów badawczych

Patrząc na omówienie dziedziny znajdujące się w poprzednim rozdziale można zauważyć, że zidentyfikowane zostało tam kilka luk pomiędzy aktualnym stanem nauki a systemem planowania, który chcieliśmy stworzyć. Różnice te okazały się być dobrym materiałem na badania w ramach prac nad rozprawą. Zgodnie z naszą najlepszą wiedzą, żaden z istniejących silników planowania nie pozwala na radzenie sobie ze sprzeczną i niepełną wiedzą użytą w kontekście wnioskowania o przekonaniach oraz planowania akcji z użyciem baz przekonań z więzami.

Dlatego też zostały zidentyfikowane następujące problemy badawcze:

- wybór reprezentacji stanu przekonań odpowiedniego dla planowania w kontekście niepełnej i/lub sprzecznej wiedzy;
- rozszerzenie oryginalnego języka 4QL o efektywnie obliczalne konstrukcje pozwalające na wnioskowanie na przekonaniach oraz na zadawanie zapytań o nich;
- rozszerzenie oryginalnej definicji baz przekonań o więzy integralności;
- wprowadzenie efektywnie obliczalnego formalizmu zmiany przekonań;
- zaproponowanie składni i semantyki akcji włączając w to przechowywanie stanu planowania w formie parakonsystentnych i potencjalnie niepełnych baz przekonań;
- rozszerzenie języka specyfikacji akcji o akcje złożone;

- użycie akcji złożonych do zdefiniowania szablonów planów (przydatnych w złożonych problemach planowania);
- implementacja otrzymanych wyników teoretycznych poprzez rozszerzenie interpretera *inter4QL* opracowanego dla języka *4QL*.

Jednym z ważnych celów rozprawy jest zachowanie praktycznej obliczalności wszędzie tam, gdzie jest to możliwe. W szczególności, dotyczy to również nowych formalizacji dla baz przekonań, zadawania zapytań do nich oraz przekształcania ich przez akcje.

## 4. Osiągnięte wyniki

Wszystkie wyniki teoretyczne (oraz część doksastycznych wyników praktycznych) zostały opublikowane w czterech artykułach [7–10] i otrzymały pozytywne opinie ze strony środowiska naukowego. Opis implementacji planera wraz z zestawem eksperymentów są oryginalnym materiałem przedstawionym w rozprawie.

### 4.1. Bazy przekonań z więzami

Podejście zaproponowane w rozprawie opiera się na bazach przekonań rozumianych jak w [17, 19]. Oznacza to, że definiujemy *świat* jako skończony zbiór literałów bez zmiennych. Następnie określamy *bazę przekonań* jako skończony zbiór światów. Intuicyjnie, każdy ze światów w bazie zawiera osobną reprezentację obserwowanej rzeczywistości. Jednakże nasze rozumienie światów nie precyzuje ich wzajemnej relacji - mogą to być zupełnie osobne światy lub inne spojrzenia na ten sam świat (np. widok z różnych kamer lub czujników). Pozostawiamy swobodę modelowania środowiska planowania według potrzeb użytkownika.

Używając takiej definicji bazy przekonań, rozszerzamy jej definicję o zbiór formuł użytej logiki stanowiący więzy integralności bazy przekonań. Ponadto w rozprawie korzystamy z bezpośredniej równoważności pomiędzy “reprezentacją świata” w bazie przekonań, zbiorem ukonkretnionych literałów, dobrze wspieranym modelem języka *4QL* oraz reprezentacją modułu wyrażoną w składni języka *4QL*. Każdy z tych elementów jest inną reprezentacją tego samego pojęcia. Co za tym idzie, rozszerzenie teoretycznej definicji bazy przekonań pociąga za sobą wymóg rozszerzenia składni języka *4QL* w celu zapewnienia wyrażalności niezbędnej do definiowania rozszerzonych baz przekonań. Chociaż więzy nie są nowym pomysłem w dziedzinie AI, wedle naszej wiedzy związanie ich bezpośrednio z bazami przekonań oraz uzależnienie wyników zapytań od stanu naruszenia więzów było nowatorskie w [9].

Definiujemy również operator  $\text{Bel}()$ , który może być użyty do odpytywania baz przekonań o globalne przekonania współdzielone pomiędzy światami. Operator oblicza swój wynik jako kres górny (względem porządku informacyjnego wartości logicznych języka *4QL*) zbiorów odpowiedzi ze wszystkich światów zawartych w danej bazie przekonań. Taka konstrukcja skutkuje, między innymi, otrzymywaniem sprzeczności w sytuacjach gdy konfliktujące ze sobą dane pochodzą z dwóch różnych światów.

Razem z więzami integralności wprowadzamy również operator *przysłaniania przekonań* pozwalający na potencjalnie krótkotrwałą zmianę przekonań agenta na inne, zdefiniowane w osobnej bazie przekonań. Zmiana ta jest wydajna obliczeniowo ponieważ nie zawiera w sobie żadnej trwałej zmiany przekonań agenta. Jest to częsty przypadek w scenariuszach wieloagentowych, w których jest ważna kooperacja. Warto podkreślić, że przysłanianie przekonań ma również wpływ na więzy integralności. W tym właśnie celu zostały one podzielona na twarde i elastyczne. Podczas gdy więzy twarde są

nienaruszalne, więzy elastyczne mogą być nadpisane przez operator przysłaniania. Proszę zauważyć, że takie rozwiązanie odpowiada naturalnemu zachowaniu ludzi gdzie w pewnych sytuacjach człowiek jest gotów tymczasowo zawiesić niektóre ze swoich przekonań zachowując jednak pewną ich nienaruszalną część.

Powyższe konstrukcje, wraz z operatorem przysłaniania przekonań zawarte są w języku 4QL<sup>Bel+</sup> będącym rozszerzeniem języka 4QL. Wyniki omawiające złożoność obliczeniową zostały przedstawione w [7, 9] oraz w rozprawie.

## 4.2. Akcje nad bazami przekonań

Proponowana przez nas składnia języka definiowania akcji, jak w przypadku wielu innych podejść, inspirowana jest oryginalnymi szablonami akcji wprowadzonymi przez języki STRIPS/ADL [22, 44]. Zawiera ona nieco dostosowane do naszych potrzeb pole warunków wstępnych akcji oraz zbiorów literałów do dodania/usunięcia. Jednakże, w naszym przypadku formuły mogą zwierać konstrukcje z języka 4QL<sup>Bel+</sup>, który zapewnia nie tylko dostęp do nieklasycznych wartości logicznych ale także do operacji na bazach przekonań. To pozwala na planowanie akcji na podstawie danych potencjalnie zawierających sprzeczność i niepełną wiedzę, na które możemy odpowiednio reagować.

Podczas gdy większość podejść projektuje akcje do działania bezpośrednio na światach (zbiorach ukonkretnionych literałów), w naszym przypadku akcje działają na bazach przekonań co czyni je bytami przekształcającymi jeden zbiór światów w drugi. Zauważmy, że w tym przypadku planowanie może być wykonywane z uwzględnieniem wielu światów jednocześnie.

Rozprawa proponuje aplikację idei akcji złożonych w praktyce, wprowadzając trzy typy składania akcji: złożenie równoległe, złożenie sekwencyjne oraz złożenie warunkowe. Użycie takich konstrukcji nie tylko ułatwia specyfikowanie problemów planowania ale również sprawia, że niektóre problemy stają się rozwiązywalne przy użyciu zadanego repertuaru akcji. Dla przykładu rozważmy problem podnoszenia stołu gdzie obydwie strony stołu muszą być podniesione w tym samym czasie (być może przez dwa osobne roboty) tak, aby nie wywrócić szklanki stojącej na stole. Problem ten może być rozwiązany tylko poprzez równoległe podniesienie obu stron stołu. Każde sekwencyjne wykonanie tych akcji spowoduje sytuację, w której jedna ze stron jest podniesiona jako pierwsza co powoduje wywrócenie się szklanki.

Ponadto, akcje złożone wpisują się dobrze w gałąź badań powiązanych z generowaniem planów opartych na szablonach planów [54, 55]. Korzystając ze składni akcji złożonych, użytkownik może zdefiniować szablon planu, który później będzie zaaplikowany przez planer do konkretnej sytuacji w trakcie planowania. Używając tej funkcjonalności, złożoność obliczeniowa może zostać znacznie zredukowana co jest ważne w przypadku systemów planowania akcji.

## 4.3. Planer - teoria w praktyce

Poza wyniki teoretycznymi, rozprawa proponuje również eksperymentalną implementację planera, który użyty został do weryfikacji przykładów zaprezentowanych w rozprawie.

Podczas implementacji planowania zwykle używany jest jeden z kilku algorytmów planowania akcji np. progresywne przeszukiwanie stanów, regresywne przeszukiwanie stanów, algorytm A\*, algorytm Graphplan (kompleksowy przegląd algorytmów planowania dostępny jest w [51]). W obecnej wersji planera zaimplementowany został algorytm progresywnego przeszukiwania stanów. Algorytm może być w przyszłości rozbudowany o dodatkowe funkcjonalności.

Co ważne, literatura kładzie znaczący nacisk na użycie heurystyk, które powinny być wykorzystywane podczas przeszukiwania przestrzeni stanów. Planer obecnie ma pięć zaimplementowanych heu-

rystyk. Pierwsze dwie działają lokalnie, bez patrzenia na cel planowania co, zaskakująco, czasami prowadzi do polepszonych wyników. Pozostałe trzy heurystyki opierają swoje działanie na poziomie prawdziwości celu planowania co sprawia, że planowanie staje się nakierowane na spełnienie celu. Co ciekawe, takie podejście nie zawsze daje najlepsze wyniki.

Pomimo faktu, iż rywalizacja z innymi planerami nie jest naszym celem w ramach doktoratu, rozprawa dostarcza porównanie z innym, już istniejącym rozwiązaniem. Jednakże, w porównaniu skupiamy się bardziej na wskazaniu oryginalnych stron naszego rozwiązania, niż na porównaniach.

Kod źródłowy planera wbudowanego w interpreter 4QL jest otwarty i dostępny pod adresem <http://4ql.org/inter4qlPhD.html>.

## Literatura

- [1] Abe, J., Nakamatsu, K.: Manipulating paraconsistent knowledge in multi-agent systems. In: Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications. pp. 159–168. Springer Berlin Heidelberg (07 2007)
- [2] Abe, J., Nakamatsu, K.: Multi-agent systems and paraconsistent knowledge. *Studies in Computational Intelligence* 170, 101–121 (12 2008)
- [3] Angelotti, E., Scalabrin, E., Ávila, B.: PANDORA: a multi-agent system using paraconsistent logic. In: Proceedings Fourth International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications. ICCIMA 2001. pp. 352–356 (02 2001)
- [4] Baiocchi, M., Milani, A., Poggioni, V., Suriani, S.: A multivalued logic model of planning. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications* 141, 575–579 (01 2006)
- [5] Balzer, R.: Tolerating inconsistency. In: Proceedings of the 13th International Conference on Software Engineering. p. 158–165. ICSE '91, IEEE Computer Society Press, Washington, DC, USA (1991)
- [6] Béziau, J.Y., Carnielli, W., Gabbay, D. (eds.): Handbook of Paraconsistency. College Publications (2007)
- [7] Białek, Ł., Dunin-Kępicz, B., Szałas, A.: Rule-based reasoning with belief structures. In: Kryszkiewicz, M., et.al. (eds.) Proc. ISMIS'2017. LNAI, vol. 10352, pp. 229–239. Springer (2017)
- [8] Białek, Ł., Dunin-Kępicz, B., Szałas, A.: Towards a paraconsistent approach to actions in distributed information-rich environments. In: Ivanović, M., Bădică, C., Dix, J., Jovanović, Z., Malgeri, M., Savić, M. (eds.) Proc. IDC - Intelligent Distributed Computing XI. *Studies in Computational Intelligence*, vol. 737, pp. 49–60. Springer (2017)
- [9] Białek, Ł., Dunin-Kępicz, B., Szałas, A.: Belief shadowing. In: EMAS@AAMAS (2018)
- [10] Białek, Ł., Dunin-Kępicz, B., Szałas, A.: A paraconsistent approach to actions in informationally complex environments. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence* (05 2019)
- [11] Bochman, A.: A Logical Theory of Nonmonotonic Inference and Belief Change. Springer (2001)

- [12] Cholvy, L., Hunter, A.: Information fusion in logic: A brief overview. In: Gabbay, D., Kruse, R., Nonnengart, A., Ohlbach, H. (eds.) *Qualitative and Quantitative Practical Reasoning, Proc. ECSQARU-FAPR'97*. LNCS, vol. 1244, pp. 86–95. Springer (1997)
- [13] Cholvy, L., Hunter, A.: Merging requirements from a set of ranked agents. *Knowledge-Based Systems* 16(2), 113–126 (2003)
- [14] daCosta, N., Bueno, O.: Belief change and inconsistency. *Logique & Analyse* 41(161-163), 31–56 (1998)
- [15] Dechter, R.: *Constraint Processing*. Morgan Kaufmann (2003)
- [16] Dunin-Kępicz, B., Szałas, A.: Epistemic profiles and belief structures. In: *Proc. KES-AMSTA 2012: Agents and Multi-agent Systems: Technologies and Applications*. LNCS, vol. 7327, pp. 360–369. Springer (2012)
- [17] Dunin-Kępicz, B., Szałas, A.: Taming complex beliefs. *Transactions on Computational Collective Intelligence XI LNCS 8065*, 1–21 (2013)
- [18] Dunin-Kępicz, B., Szałas, A.: Indeterministic belief structures. In: Jezic, G., Kusek, M., Lovrek, I., J. Howlett, J., Lakhmi, J. (eds.) *Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications: Proc. 8th Int. Conf. KES-AMSTA*, pp. 57–66. Springer (2014)
- [19] Dunin-Kępicz, B., Szałas, A.: Indeterministic belief structures. In: Jezic, G., et.al. (eds.) *Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications, Adv. in Int. Syst. Comp.*, vol. 296, pp. 57–66. Springer (2014)
- [20] Dunin-Kępicz, B., Verbrugge, R.: *Teamwork in Multi-Agent Systems. A Formal Approach*. John Wiley & Sons, Ltd. (2010)
- [21] Eiter, T., Faber, W., Leone, N., Pfeifer, G., Polleres, A.: Planning under incomplete knowledge. In: Lloyd, J., Dahl, V., Furbach, U., Kerber, M., Lau, K.K., Palamidessi, C., Pereira, L., Sagiv, Y., Stuckey, P. (eds.) *Proc. Computational Logic: 1st Int. Conf.* pp. 807–821. Springer (2000)
- [22] Fikes, R.E., Nilsson, N.J.: STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. In: *Proceedings of the 2Nd International Joint Conference on Artificial Intelligence*. pp. 608–620. IJCAI'71, Morgan Kaufmann Publishers Inc. (1971)
- [23] Gärdenfors, P.: Conditionals and changes of belief. *Acta Philosophica Fennica* 30, 381–404 (1978)
- [24] Hansson, S.O.: *A Textbook of Belief Dynamics. Theory Change and Database Updating*. Kluwer Academic Publishers (1999)
- [25] van Harmelen, F., Lifschitz, V., Porter, B.: *Handbook of Knowledge Representation*. Elsevier (2007)
- [26] Herzig, A., Rifi, O.: Propositional belief base update and minimal change. *Artificial Intelligence* 115(1), 107 – 138 (1999)
- [27] van Hoeve, W.J., Katriel, I.: Global constraints. *Foundations of AI* 2, 169 – 208 (2006)
- [28] Hunter, A., Nuseibeh, B.: Managing inconsistent specifications: Reasoning, analysis and action. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology* 7 (08 1996)

- [29] Jayakumar, B.: Handling Inconsistency in Knowledge Bases. PhD thesis, Georgia State University (2017)
- [30] Kakas, A., Miller, R., Toni, F.: Planning with incomplete information. CoRR cs.AI/0003049 (03 2000)
- [31] Katarzyniak, R., Pieczyńska, A.: The outline of the strategy for solving knowledge inconsistencies in a process of agents' opinions integration. In: Proceedings of the 6th International Conference on Computational Science - Volume Part III. p. 891–894. ICCS'06, Springer-Verlag (2006)
- [32] Konieczny, S., Pino Pérez, R.: Merging with integrity constraints. In: Hunter, A., Parsons, S. (eds.) Proc. ECSQARU'99 Conf.: Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning and Uncertainty. LNCS, vol. 1638, pp. 233–244. Springer (1999)
- [33] Konieczny, S., Pino Pérez, R.: Merging information under constraints: A logical framework. *J. Log. Comput.* 12(5), 773–808 (2002)
- [34] Lang, J.: Belief update revisited. In: Proc. 20th IJCAI. pp. 2517–2522. Morgan Kaufmann (2007)
- [35] Liberatore, P.: The complexity of belief update. *Artificial Intelligence* 119(1), 141 – 190 (2000)
- [36] Liberatore, P.: A framework for belief update. In: Ojeda-Aciego, M., de Guzmán, I.P., Brewka, G., Pereira, L.M. (eds.) Proc. JELIA 2000, pp. 361–375. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2000)
- [37] Liu, C., Kuehlmann, A., Moskewicz, M.: CAMA: a multi-valued satisfiability solver. *IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design, Digest of Technical Papers* pp. 326– 333 (12 2003)
- [38] Małuszyński, J., Szałas, A.: Living with inconsistency and taming nonmonotonicity. In: de Moor, O., Gottlob, G., Furche, T., Sellers, A. (eds.) *Datalog 2.0*. LNCS, vol. 6702, pp. 384–398. Springer-Verlag (2011)
- [39] Małuszyński, J., Szałas, A.: Partiality and inconsistency in agents' belief bases. In: Barbucha, D., Le, M., Howlett, R., Jain, L. (eds.) *KES-AMSTA. Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, vol. 252, pp. 3–17. IOS Press (2013)
- [40] Maluszynski, J., Szałas, A.: Logical foundations and complexity of 4ql, a query language with unrestricted negation. *Journal of Applied Non-Classical Logics* 21 (11 2010)
- [41] Marchi, J., Bittencourt, G., Perrussel, L.: A syntactical approach to belief update. In: Gelbukh, A., et.al. (eds.) Proc. MICAI 2005, pp. 142–151. Springer, Berlin, Heidelberg (2005)
- [42] Meseguer, P., Rossi, F., Schiex, T.: Soft constraints. In: Rossi et al. [50], pp. 281 – 328
- [43] Nguyen, N.T.: Processing inconsistency of knowledge in determining knowledge of a collective. *Cybernetics and Systems* 40(8), 670–688 (2009)
- [44] Pednault, E.P.D.: ADL: Exploring the middle ground between STRIPS and the Situation Calculus. In: Proceedings of the First International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning. p. 324–332. Morgan Kaufmann Publishers Inc. (1989)



- [45] Peppas, P.: Belief revision. In: van Harmelen, F., Lifschitz, V., Porter, B. (eds.) Handbook of KR, pp. 317–359. Elsevier (2008)
- [46] Pigozzi, G.: Belief merging and judgment aggregation. In: Zalta, E. (ed.) The Stanford Enc. of Philosophy. Stanford University, winter 2016 edn. (2016)
- [47] Priest, G.: Special issue on impossible worlds. *Notre Dame Journal of Formal Logic* 38(4), 481–660 (1997)
- [48] Priest, G.: Paraconsistent belief revision. *Theoria* 67(3), 214–228 (2001)
- [49] Roos, N.: A logic for reasoning with inconsistent knowledge. *Artificial Intelligence* 57, 69–103 (09 1992)
- [50] Rossi, F., van Beek, P., Walsh, T. (eds.): Handbook of Constraint Programming, Foundations of AI, vol. 2, Supplement C. Elsevier (2006)
- [51] Russell, Norvig, S.: Artificial intelligence: A modern approach. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ (01 2010)
- [52] Szalas, A.: How an agent might think. *Logic Journal of the IGPL* 21(3), 515–535 (2013)
- [53] Tanaka, K.: The AGM theory and inconsistent belief change. *Logique & Analyse* 48(189-192), 113–150 (2005)
- [54] Winner, E., Veloso, M.M.: Automatically acquiring planning templates from example plans. *Proceedings of AIPS'02 Workshop on Exploring Real-World Planning* p. 69–74
- [55] Wolverton, M.: Prioritizing planning decisions in real-world plan authoring. *Proceedings of the ICAPS-04 Workshop on Connecting Planning Theory with Practice* (2004)
- [56] Zhang, D.: Inconsistency in multi-agent systems. *Advances in Intelligent and Soft Computing* 122 (12 2011)