



UNIwersytet
Opolski

INSTYTUT INFORMATYKI
ul. Oleska 48, 45-052 Opole
tel.: +48 (77) 452 72 05
fax: +48 (77) 452 72 07
ii@uni.opole.pl
informatyka.wmfi.uni.opole.pl

dr hab. Lidia Tendera, prof. UO

Opole, 12 sierpnia 2022 r.

Recenzja w postępowaniu habilitacyjnym dr. Michała Wrony

Metody lokalnej zgodności w rozwiązywaniu problemów spełnialności więzów oraz problemów pokrewnych nad strukturami ω -kategorycznymi

Dr Michał Wrona przedstawił rozprawę habilitacyjną złożoną z cyklu ośmiu artykułów naukowych opublikowanych w recenzowanych materiałach z konferencji informatycznych ujętych w wykazie czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych sporządzonym zgodnie z art. 267 ust. 2 pkt. 2 lit. b) Ustawy:

- [A1] Michał Wrona. Relational width of first-order expansions of homogeneous graphs with bounded strict width. In Proceedings of 37th International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science, (STACS'20), volume 154 of LIPIcs, pages 39:1–39:16. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2020. (140 pkt)
- [A2] Michał Wrona. On the relational width of first-order expansions of finitely bounded homogeneous binary cores with bounded strict width. In LICS '20: 35th Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science, pages 958–971. ACM, 2020. (200 pkt)
- [A3] Antoine Mottet, Tomás Nagy, Michael Pinsker, and Michał Wrona. Smooth approximations and relational width collapses. In 48th International Colloquium on Automata, Languages, and Programming, ICALP 2021, volume 198 of LIPIcs, pages 138:1–138:20. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2021. (140 pkt)
- [A4] Michał Wrona. Syntactically characterizing local-to-global consistency in ord-horn. In Principles and Practice of Constraint Programming - 18th International Conference, CP 2012. Proceedings, volume 7514 of Lecture Notes in Computer Science, pages 704–719. Springer, 2012. (140 pkt)
- [A5] Manuel Bodirsky and Michał Wrona. Equivalence constraint satisfaction problems. In Computer Science Logic (CSL'12) - 26th International Workshop/21st Annual Conference of the EACSL, CSL 2012, volume 16 of LIPIcs, pages 122–136. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2012. (70 pkt.)
- [A6] Hubie Chen and Michał Wrona. Guarded ord-horn: A tractable fragment of quantified constraint satisfaction. In 19th International Symposium on Temporal Representation and Reasoning, TIME 2012, pages 99–106. IEEE Computer Society, 2012. (70 pkt)
- [A7] Michał Wrona. Tractability frontier for dually-closed ord-horn quantified constraint satisfaction problems. In Mathematical Foundations of Computer Science 2014 - 39th International Symposium, MFCS 2014. Proceedings, Part I, volume 8634 of Lecture Notes in Computer Science, pages 535–546. Springer, 2014. (140 pkt)
- [A8] Michał Wrona. Local-to-global consistency implies tractability of abduction. In Proceedings of the Twenty-Eighth AAAI Conference on Artificial Intelligence, pages 1128–1134. AAAI Press, 2014. (200 pkt)

Powyższy cykl zawiera pięć prac, które dr Wrona napisał samodzielnie, a trzy są współautorskie. Według oświadczeń złożonych przez współautorów, indywidualny wkład Habilitanta w ich powstanie był znaczący. Nie ma zatem wątpliwości, że dr Wrona był w przedstawionych badaniach liderem (albo co najmniej kluczowym autorem).

Ocena osiągnięcia naukowego

Tematyka przedstawiona w rozprawie prac jest spójna i dotyczy problemu spełniania więzów w perspektywie algebraicznej. Badanie złożoności problemów spełniania więzów (ang. *constraint satisfaction problems*, CSP) jest jednym z ważnych obszarów badań w informatyce teoretycznej, obejmuje nie tylko zagadnienia czysto złożonościowe, ale także wyniki związane z teorią modeli skończonych, zastosowaniami w sztucznej inteligencji, a także algebrą uniwersalną. W wariacie klasycznym, instancja problemu spełniania więzów składa się ze zmiennych i ograniczeń na te zmienne, nazywane *więzami* (ang. *constraints*). W problemie CSP pytamy, czy istnieje wartościowanie zmiennych spełniające wszystkie więzy. Kluczowym pytaniem jest znalezienie ogólnych kryteriów na postać więzów, które gwarantują możliwość efektywnego rozwiązania każdego problemu CSP zdefiniowanego za pomocą więzów takiej postaci. W przypadku CSP z więzami nad strukturami skończonymi, niedawno potwierdzona przez Bulatova i Zhuka, hipoteza Federa i Vardiego gwarantuje, że każdy CSP jest albo w klasie złożoności P, albo jest NP-zupełny.

Wspomniane wyżej badania dotyczące CSP przyczyniły się do odkrycia związków między pytaniami o złożoność CSP, a pytaniami algebraicznymi dotyczącymi algebr stowarzyszonych z CSP. Ten nurt, nazywany podejściem algebraicznym, okazał się przełomowy dla potwierdzenia hipotezy Federa-Vardiego zarówno w dowodzie Bulatova, jak i Zhuka.

Z punktu widzenia możliwych zastosowań ciekawsza jest klasa CSP, w których rozważane są więzy nad dziedzinami nieskończonymi, pozwalające na sformułowanie w języku CSP problemów związanych między innymi z wnioskowaniami temporalnymi, szeregowaniem zadań, czy programowaniem liniowym. Takie warianty CSP są zwykle parametryzowane pojedynczą strukturą relacyjną \mathfrak{B} o skończonej sygnaturze σ nazywaną szablonem lub wzorcem (ang. *template*) i oznaczane $\text{CSP}(\mathfrak{B})$. Instancją problemu $\text{CSP}(\mathfrak{B})$ jest skończona σ -struktura, dla której pytamy, czy istnieje dla niej homomorfizm w \mathfrak{B} (dziedzina \mathfrak{B} może być nieskończona). Równoważnie, $\text{CSP}(\mathfrak{B})$ można traktować jako klasę wszystkich skończonych σ -struktur, dla których istnieje homomorfizm w \mathfrak{B} . Zmieniając postać instancji problemu $\text{CSP}(\mathfrak{B})$ ze struktury na zapytanie koniunkcyjne (formułę logiki pierwszego rzędu zbudowaną z atomów, koniunkcji i kwantyfikatorów egzystencjalnych), otrzymujemy inną formalizację tego problemu, która wręcz zmusza do uogólnień. Takim uogólnieniem jest problem $\text{QCSP}(\mathfrak{B})$, w którym na wejściu zamiast zapytania koniunkcyjnego możemy mieć formułę zawierającą również kwantyfikatory ogólne.

Wcześniejsze badania pokazały, że metody algebry uniwersalnej rozwinięte w przypadku skończonych CSP mogą być stosowane dla parametryzowanych CSP, pod warunkiem, że struktura \mathfrak{B} jest ω -kategoryczna i spełnia czasem pewne dodatkowe warunki. Ta klasa zawiera wiele naturalnych problemów obliczeniowych i jest interesującym przedmiotem badań. Wyniki rozprawy dotyczą CSP lub pokrewnych problemów parametryzowanych strukturami ω -kategorycznymi kilku typów. Podobnie, jak w przypadku skończonym, istnieje nieskończona algebraiczna hipoteza o dychotomii (AHD), która sugeruje kiedy $\text{CSP}(\mathfrak{B})$ jest wielomianowy, a kiedy NP-trudny. Hipoteza ta aktualnie pozostaje otwarta, natomiast badania Habilitanta przedstawione w rozprawie dotyczą charakterystyk pewnych typów struktur, potwierdzających tę hipotezę, a także zastosowania tych wyników dla problemów pokrewnych.

Przyglądając się datom publikacji prac tworzących cykl rozprawy można zauważyć, że pierwsze trzy są stosunkowo nowe (2020 i 2021 rok), a pozostałe zostały opublikowane w latach 2012-2014. Omawiając szczegółowo wyniki rozprawy rozpocznę od tych wcześniejszych.

W pracy [A5] z 2012 roku Autorzy potwierdzają AHD dla wzorców definiowalnych w logice pierwszego rzędu (tzw. reduktów pierwszego rzędu) nad przeliczalnym uniwersum z jedną relacją równoważności posiadającą nieskończenie wiele nieskończonych klas abstrakcji. M. Bodirsky, który jest współautorem pracy [A5], wspólnie z innymi autorami, potwierdził wcześniej AHD dla reduktów pierwszego rzędu struktury $(\mathbb{Q}, <)$ i grafu losowego. Główny wynik pracy [A5] został uzyskany za pomocą oryginalnych technik łączących narzędzia teorio-modelowe, podejście

algebraiczne i teorię Ramseya. W szczególności, podano w tej pracy nowatorski algorytm dla przypadku wielomianowego. Osiem lat później, w pracy Habilitanta [A1], pokazano, że ten algorytm może zostać zastąpiony algorytmem ustalania lokalnej zgodności, który jest jednym z najczęściej stosowanych algorytmów w badaniu CSP.

Z 2012 roku pochodzi również praca [A4], w której badana jest złożoność $\text{CSP}(\mathfrak{B})$, w których wzorzec \mathfrak{B} jest zdefiniowany nad $(\mathbb{Q}, <)$ za pomocą formuł ORD-Horn, tzn. za pomocą koniunkcji klauzul zawierających maksymalnie jeden literał pozytywny. Pokazuje się w niej, że jeśli w definicji \mathfrak{B} używane są tylko formuły z pewnej podklasy formuł ORD-Horn nazywane postawowymi, to $\text{CSP}(\mathfrak{B})$ jest wielomianowy. Dokładniej, Habilitant dowodzi, że każda struktura \mathfrak{B} zdefiniowana za pomocą podstawowej formuły ORD-Horn ma własność *local-to-global consistency*, która jest równoważna temu, że $\text{CSP}(\mathfrak{B})$ ma ograniczoną ścisłą szerokość relacyjną. Dowód ten używa algebraicznej charakteryzacji struktur ω -kategorycznych posiadających własność local-to-global consistency uzyskanej przez Bodirskyego i Dalmau z 2006 roku. Wyniki negatywne dla języków ORD-Horn, które nie są podstawowe, opierają się na innej algebraicznej charakteryzacji struktur ω -kategorycznych uzyskanej przez Bodirskyego i Chena w 2007 roku. Należy zwrócić uwagę, że praca [A4] w wersji konferencyjnej nie zawiera wszystkich dowodów. Do wniosku Habilitanta została dostarczona wersja tej pracy zamieszczona w ArXiv, której dodatek z brakującymi dowodami liczy 8 stron. Habilitant nie wspomina o tym, aby podjął próbę opublikowania pełnej wersji pracy [A4] w czasopiśmie.

Wyniki pracy [A4] dają również nową wiedzę na temat złożoności pewnych QCSP, którymi Habilitant zajmuje się w pracach [A6] i [A7]. W pierwszej z nich, Habilitant wspólnie z H. Chenem, identyfikuje podklasę języków temporalnych Guarded ORD-Horn, która zawiera wszystkie formuły podstawowe ORD-Horn, rozważane w pracy [A4]. Autorzy pokazują, że QCSP dla takich języków są wielomianowe. Przypadek dla podstawowych ORD-Horn wynika z wcześniejszej pracy Chena z Bodirskym. Dla formuł, które nie są podstawowe, pokazany jest algorytm wielomianowy wykorzystujący pewnego rodzaju modyfikacje gier Ehrenfeuchta-Fraïssego.

W pracy [A7] Habilitant potwierdził drugą część dychotomii dla wszystkich dualnie-zamkniętych języków temporalnych typu ORD-Horn, dowodząc twierdzenia, że jeśli taka struktura \mathfrak{B} nie jest typu Guarded ORD-Horn, to $\text{QCSP}(\mathfrak{B})$ jest coNP-trudny. Zgodnie z Autoreferatem wynik ten został przez dr. Wronę w 2021 roku uogólniony do wszystkich języków dualnie-zamkniętych, niekoniecznie typu ORD-Horn; wyniki te są dostępne jedynie w wersji rękopisu na *CORR*. Praca [A7] opublikowana w materiałach konferencyjnych zawiera 12 stron, dołączony do Autoreferatu manuskrypt liczy stron 26. Podobnie jak w przypadku pracy [A4] nic nie wiadomo o próbach opublikowania pełnej wersji tej pracy. Natomiast w kontekście problematyki rozważanej w pracach [A6] i [A7] trochę zaskakuje pominięcie w osiągnięciu habilitacyjnym pracy Habilitanta z M. Bodirskym i H. Chenem w czasopiśmie *International Journal of Algebra and Computation* pt. "Tractability of quantified temporal constraints to the max", w Autoreferacie wymienionej w rozdziale 5.2 jako [D3].

Tytułowy algorytm ustalania lokalnej zgodności dla rozwiązywania CSP jest kluczowy dla prac [A1]-[A3]. Algorytm ten dla ustalonych parametrów $k \leq l$ działa następująco: w każdym kroku ustalany jest najsilniejszy możliwy więz z k zmiennymi, który można zobaczyć rozważając l zmiennych. Jeśli w ten sposób otrzymany zostanie więz pusty, to wejście można odrzucić. Algorytm ustalania lokalnej zgodności *rozwiązuje* pewien CSP, jeśli w przypadku nieotrzymania więzu pustego dla danej instancji, problem CSP ma dla tej instancji rozwiązanie. Mówimy, że wzorzec \mathfrak{B} ma ograniczoną szerokość relacyjną, jeśli dla pewnych k, l algorytm ustalania lokalnej zgodności rozwiązuje $\text{CSP}(\mathfrak{B})$. Jako szerokość relacyjną \mathfrak{B} przyjmuje się wtedy leksykograficznie najmniejszą taką parę (k, l) . W związku z tym, że algorytm ustalania lokalnej zgodności działa w czasie wielomianowym, problemy $\text{CSP}(\mathfrak{B})$ dla struktur o ograniczonej szerokości relacyjnej są w P. Wynik Barto z 2016 roku pokazuje, że wszystkie skończone wzorce \mathfrak{B} o ograniczonej szerokości relacyjnej mają szerokość $(1, 1)$ lub $(2, 3)$. Dla struktur nieskończonych liczba możliwych

szerokości relacyjnych nie jest skończona. Habilitant podaje w Autoreferacie przykład wzorca \mathcal{H}_k , czyli przeliczalnego grafu nieskończonego nie zawierającego klikli rozmiaru k , i uzasadnia, że szerokość relacyjna tej struktury wynosi $(2, k)$.

W pracach Habilitanta istotna jest też klasa struktur o *ściślej szerokości relacyjnej*, dla których istnieją k, l takie, że jeśli algorytm ustalania lokalnej zgodności nie odrzuca wejścia, to rozwiązanie może zostać znalezione za pomocą metody zachłannej. Struktury o ograniczonej ściślej szerokości spełniają pewne własności algebraiczne (są zamknięte na oligopotentną operację typu near-unanimity), które są kluczowe do uzyskania głównych wyników omawianych niżej prac.

Praca [A1] to studium szerokości relacyjnej takich wzorców \mathfrak{B} , które są rozszerzeniami pierwszego rzędu przeliczalnego nieskończonego grafu jednorodnego \mathfrak{A} i mają ograniczoną ścisłą szerokość relacyjną. Główny wynik tej pracy, to twierdzenie mówiące o tym, że szerokość relacyjna \mathfrak{B} wynosi wtedy $(2, \max(3, l))$, gdzie l jest maksymalnym rozmiarem zabronionej podstruktury w \mathfrak{A} . Rezultat ten istotnie poprawia wcześniejsze wyniki na ten temat z pracy Bodirskyego i Motteta (LICS, 2018), dowód używa zaawansowanych technicznie metod algebraicznych, wymagał sporej pomysłowości i rozważenia wielu przypadków. Praca ta zawiera również wiele przykładów ilustrujących zastosowanie głównego wyniku. Ze względu na ograniczenie limitu stron, również w tej pracy większość dowodów zamieszczona została w dodatku (16 stron) i formalnie nie jest w pełni zweryfikowana.

Praca [A2] to również studium szerokości relacyjnej innej klasy skończenie ograniczonych jednorodnych struktur. Główny wynik jest podobny w sformułowaniu do głównego wyniku pracy [A1] tyle, że tutaj rozważane są takie struktury \mathfrak{A} , które są binarnym rdzeniem i nie mają zabronionych podstruktur o rozmiarach 3, 4, 5 i 6. Ten wynik wydaje się być technicznie bardzo zaawansowany, wymaga zrozumienia i połączenia wielu wcześniejszych rezultatów, a także wprowadzenia nowych technik.

W pracy [A3] wspólnej z Mottetem, Nagym i Pinskerem, wyniki z poprzednich dwóch prac zostały rozszerzone dla pewnych klas struktur, dla których nie zakłada się ograniczonej ściślej szerokości, a tym samym pewne algebraiczne własności przestają działać. Praca ta zawiera dwa główne wyniki, jeden dotyczący rozstrzygalności pytania o to, kiedy formuła pewnej logiki jest równoważna programowi w Datalogu, a drugi badania szerokości relacyjnej struktur, które są reduktami pierwszego rzędu k -jednorodnej oraz l -ograniczonej ω -kategorycznej struktury \mathfrak{B} . Zgodnie ze złożonymi oświadczeniami, zasadniczy wkład Habilitanta dotyczy tego drugiego wyniku, zawartego w Rozdziale 3. Pomysł uzyskania ograniczenia szerokości relacyjnej badanych struktur polega na pokazaniu wielomianowej redukcji rozważanych instancji $\text{CSP}(\mathfrak{B})$ do instancji ze skończonym uniwersum. W przypadku skończonym szerokość relacyjna jest znana, a szerokość relacyjną dla rozważanych instancji można wyznaczyć znowu badając pewne własności algebraiczne dotyczące klonu polimorfizmów kanonicznych. Wynik ten jest interesujący i wymaga głębokiego zrozumienia własności badanych struktur.

Habilitant przedstawił w swoim osiągnięciu habilitacyjnym również jedną pracę [A8], która poświęcona jest wywodzącemu się z wnioskowania niemonotonicznego, pokrewnemu z CSP problemowi abdukcji. Problem ten jest parametryzowany przez trzy struktury ω -kategoryczne \mathfrak{B} , \mathcal{H} i \mathcal{M} . Wcześniejsze wyniki dotyczące złożoności tego problemu dotyczyły głównie struktur 2-elementowych. Habilitant w pracy [A8] przedstawia algorytm rozwiązujący pewne naturalne ograniczenie tego problemu dla wszystkich ω -kategorycznych i jednorodnych struktur \mathfrak{B} , które posiadają ograniczoną ścisłą szerokość. Praca ta ukazała się w 2014 roku na ceniowej konferencji ze sztucznej inteligencji (AAAI Artificial Intelligence). Wydaje się jednak, że nie została zauważona (0 cytowań wg Google Scholar).

Ogólnie, miejsca publikacji wszystkich prac wchodzących w skład osiągnięcia habilitacyjnego są prestiżowe (LICS, AAI, ICALP, MFCS, STACS). Należy jednak zwrócić uwagę, że są to materiały konferencyjne, w których zazwyczaj obowiązuje ograniczenie na liczbę stron publikacji. Prace [A1], [A4] i [A7] zdecydowanie przekraczały te limity i zawierają wiele dowodów, które nie

podlegały dotąd szczegółowej weryfikacji. Habilitant nie wspomina o podjęciu prób opublikowania pełnej wersji tych prac w czasopiśmie, co po pierwsze, podkreśliłoby rangę i wiarygodność wyników przedstawionych w osiągnięciu habilitacyjnym, a po drugie gwarantowałoby wysoki warsztat techniczny w zakresie samej prezentacji wyników i dowodów. (Czytając Autoreferat wydaje się, że to ostatnie mogłoby zostać poprawione.)

W ocenie znaczenia osiągnięcia habilitacyjnego dr. Wrony należy odnotować, że widoczna aktywność naukowa Habilitanta i współpraca z innymi ośrodkami i uznanymi badaczami rangi światowej (wymienieni już wcześniej Bodirsky, Chen) nie przekłada się na wysoki poziom cytowań. Zgodnie z Google Scholar (stan na 15 lipca br.), prace składające się na osiągnięcie habilitacyjne zostały zacytowane tylko 3 razy i to w zasadzie jedynie we fragmentach dotyczących tzw. related work (pomijam autocytowania i cytowania w manuskryptach zamieszczonych w ogólniedostępnych repozytoriach). I tak, praca [A5] jest cytowana w artykule Klin et al. pt. "Homomorphism Problems for First-Order Definable Structures" (FSTTCS 2016), praca [A3] jest cytowana w artykule Lutz, Sabellek, "A complete classification of the complexity and rewritability of ontology-mediated queries based on the description logic \mathcal{EL} ", Artificial Intelligence 2022 (ale raczej w odniesieniu do związków z Datalogiem), a praca [A4] w doktoracie M. Westphala z 2014 roku pt. "Qualitative Constraint-based Reasoning: Methods and Applications".

Habilitant omawiając pracę [A3] przywołuje ciekawą pracę Motteta i Piskera dotyczącą teorii gładkich aproksymacji, która rozwija wyniki uzyskane w pracach [A1]-[A3] z użyciem nowych metod i została przedstawiona na tegorocznej konferencji LICS (to cytowanie jest już widoczne w Google Scholar w dniu podpisania niniejszej recenzji).

Ogólnie, dla prac [A1]-[A3] uzasadnieniem małej liczby cytowań jest stosunkowo niedawna data publikacji. Ten argument nie może być jednak wyjaśnieniem dla pozostałych prac z lat 2012-2014. Pewnym punktem odniesienia w tym zakresie może być wydana w 2021 roku przez Cambridge University Press monografia M. Bodirskyego "Complexity of Infinite-Domain Constraint Satisfaction". W liczącej 350 pozycji bibliografii z całego dorobku Habilitanta znajdujemy w niej jedynie pracę [A5] i wspomnianą wyżej pracę [D3].

Podsumowanie

Dr Wrona prowadzi interesujące i w miarę systematyczne badania. Prace wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego zawierają rozwiązania trudnych problemów. Używane techniki dowodowe wskazują na głębokie zrozumienie badanych zagadnień i bogaty warsztat obejmujący zarówno metody algebry ogólnej, jak i logiki w informatyce, z naciskiem na te pierwsze. Miejsca publikacji przedstawionych prac są znaczące dla dyscypliny informatyka, choć wykorzystanie otrzymanych wyników przez innych badaczy, a tym samym realny wpływ na rozwój dyscypliny informatyka jest ograniczony. Nie poprawia tej sytuacji fakt, iż wszystkie prace wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego są materiałami konferencyjnymi, a tym samym nie zawsze zawierają kompletne rozumowania.

Biorąc jednak pod uwagę, że tematyka tych prac łączy ze sobą techniki z wielu obszarów zarówno matematyki jak i informatyki, uważam, że osiągnięcie naukowe przedstawione przez dr. Wronę pt.: *Metody lokalnej zgodności w rozwiązywaniu problemów spełnialności więzów oraz problemów pokrewnych nad strukturami ω -kategorycznymi*, uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, stanowi wkład w rozwój obu tych dyscyplin, a ze względu na miejsce ich publikacji, stanowi istotny wkład w rozwój dyscypliny informatyka. Tym samym, spełnione są warunki określone w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 zm.).

(-) Lidia Tendera



