

Recenzja dorobku naukowego w postępowaniu habilitacyjnym doktora Michała Marii Wrony

Dorobek naukowy pana doktora Michała Marii Wrony należy do informatyki teoretycznej. Wyniki habilitanta dotyczą zagadnień logiki matematycznej w ścisłym powiązaniu z teorią złożoności obliczeniowej. Większość prac Michała M. Wrony dotyczy problemu spełniania więzów (w skrócie CSP od ang. *Constraint Satisfaction Problem*), jaki przez wiele lat był jednym z głównych motorów rozwoju logiki informatycznej, a w pewnym stopniu pozostaje nim nadal. Wielkie otwarte pytania złożoności obliczeniowej, jak w szczególności problem milenijny $P \stackrel{?}{=} NP$, znajdują się być może na granicy możliwości współczesnej nauki. Jednym z najważniejszych kroków przybliżających nas do zrozumienia relacji między klasami P i NP było rozwiązanie w 2017 r. niezależnie przez Bulatova i Zhuka hipotezy dychotomicznej Federera-Vardiego głoszącej, że każdy problem typu CSP jest zupełny w klasie NP lub posiada wielomianowy algorytm. Wynik ten poprzedzony był ponad dwiema dekadami prac wielu badaczy (ze znaczącym udziałem polskiego naukowca Marcina Kozika), które wykazały w szczególności ogromną wartość technik algebry uniwersalnej; mówiąc bardzo ogólnie, algebra pomaga odkryć własności symetrii, jakie mogą prowadzić do algorytmów wielomianowych. Okazało się przy tym, że pojęcia i techniki wypracowane dla rozwiązania hipotezy dychotomicznej mają znacznie szersze zastosowanie i przynoszą efektywne rozwiązania innych problemów logicznych, jak np. problem abdukcji, czy rozstrzygnięcie istotnych fragmentów teorii pewnych struktur nieskończonych. Z drugiej strony, wiele pytań pozostaje jeszcze otwartych, jak w szczególności analogon hipotezy F-V dla struktur nieskończonych. W ten właśnie nurt wpisują się prace Michała M. Wrony.

Osiągnięcie habilitacyjne

Na osiągnięcie zatytułowane

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

składa się cykl ośmiu prac.

- [A1] Michał Wrona. Relational width of first-order expansions of homogeneous graphs with bounded strict width, **STACS 2020**.
- [A2] Michał Wrona. On the relational width of first-order expansions of finitely bounded homogeneous binary cores with bounded strict width, **LICS' 2020**.
- [A3] Antoine Mottet, Tomás Nagy, Michael Pinsker, and Michał Wrona. Smooth approximations and relational width collapses, **ICALP 2021**.
- [A4] Michał Wrona. Syntactically characterizing local-to-global consistency in ord-horn. In: *Principles and Practice of Constraint Programming – 18th International Conference*, **CP 2012**.
- [A5] Manuel Bodirsky and Michał Wrona. Equivalence constraint satisfaction problems, **CSL 2012**.
- [A6] Hubie Chen and Michał Wrona. Guarded ord-horn: A tractable fragment of quantified constraint satisfaction, **TIME 2012**.

[A7] Michał Wrona. Tractability frontier for dually-closed ord-horn quantified constraint satisfaction problems, **MFCS 2014**.

[A8] Michał Wrona. Local-to-global consistency implies tractability of abduction, **AAAI 2014**.

Wszystkie te prace powiązane są głównym tematem sformułowanym w tytule, przy czym prace [A1–A3] koncentrują się na własnościach strukturalnych metody lokalnej zgodności, a prace [A4–A8] stosują tę metodę do otrzymania nowych rezultatów dychotomicznych, a także algorytmów rozstrzygnięcia różnych problemów logicznych.

Wszystkie prace opublikowane zostały w bardzo dobrych miejscach, w tym na najważniejszej konferencji z logiki informatycznej LICS, na głównej europejskiej konferencji teoretycznej ICALP i na jednej z czołowych konferencji ze sztucznej inteligencji AAAI. W terminach aktualnego rankingi *CORE* mamy tu dwie konferencje rangi A* (LICS i AAAI), cztery konferencje rangi A i dwie rangi B (*CSL* i *TIME*). Należy też odnotować, że 5 spośród 8 prac stanowią prace wyłącznego autorstwa habilitanta, a w pozostałych pracach jego udział był istotny (w pracach współautorskich wszyscy autorzy deklarują równe udziały).

Punktem wyjścia prowadzonych badań było pytanie, w jakim stopniu hipotezę dychotomiczną Federa-Vardiego (obecnie już twierdzenie) można udowodnić – lub obalić – dla klas modeli nieskończonych. Obecnie kuszącą ścieżką wydaje się skorzystanie z już rozwiązanego przypadku skończonego, jednak jak habilitant wnikliwie argumentuje w autoreferacie, przypadek nieskończony będzie zapewne wymagał wynalezienia nowych technik. Podobnie jak to było w pracach nad hipotezą F-V, droga do rozwiązania problemu w pełnej ogólności może prowadzić przez serię rezultatów częściowych, choć też bardzo trudnych do osiągnięcia.

Przypomnijmy, że algorytmiczny problem klasy CSP w jednym z możliwych sformułowań jest pytaniem, czy ustalona struktura relacyjna \mathbb{B} spełnia formułę, będącą egzystencjalnym domknięciem koniunkcji formuł atomowych. Tak więc – jak habilitant zauważa w autoreferacie – problem ten wpisuje się w podstawowy algorytmiczny problem logiczny: *model checking* (czasem tłumaczony jako weryfikacja modelowa). Hipoteza F-V należy do tzw. algorytmicznych meta-twierdzeń, które klasyfikują złożoność nie pojedynczych problemów, ale całych klas. Przywołane w autoreferacie meta-twierdzenie Courcelle’a również wychodzi od problemu *model checking*; tam jednak ustalona jest formuła, a zmieniają się struktury, podczas gdy w problemie CSP ustalona jest struktura (stanowiąc niejako parametr problemu CSP(\mathbb{B})), a zmieniają się formuły. W obu wypadkach twierdzenia określają zakresy formuł i struktur gwarantujące wielomianowość problemu, jakkolwiek twierdzenie Courcelle’a nie ma siły dychotomii. Metoda algebraiczna opiera się przede wszystkim na analizie klonu polimorfizmów struktury \mathbb{B} ; równości spełnione w tym klonie okazują się być trafnym kryterium wielomianowości problemu CSP(\mathbb{B}).

W kontekście algorytmów problem CSP(\mathbb{B}) formułuje się bardziej semantycznie w terminach tzw. więzów, czyli relacji zastosowanych do konkretnych zmiennych (ang. *constraint*), dla których poszukujemy rozwiązania; przy czym w trakcie algorytmu możemy dokładać nowe więzy, by stopniowo zawężać przestrzeń rozwiązań. Jak zwykle w problemach *NP*, kłopot jest, gdy nie ma rozwiązania – metoda lokalnej zgodności pozwala wtedy efektywnie wykryć sprzeczność między więzami (wymuszając dodanie więzu pustego). Własnością pozwalającą na zastosowanie metody lokalnej zgodności dla problemu więzów nad strukturą \mathbb{B} jest ograniczenie pewnego parametru tej struktury (k, ℓ) (gdzie $k \leq \ell < \omega$) zwanego szerokością relacyjną. Dla struktur skończonych parametr ten (co nieco zaskakujące) przyjmuje tylko dwie wartości, ale dla struktur nieskończonych ℓ może być dowolnie duże. W pracach A1–A2 (jednoautorskich) habilitant rozwinął program znajdowania szerokości relacyjnej dla szeregu klas modeli nieskończonych. Dokładne przytoczenie wyników wymagałoby wprowadzenia wielu technicznych pojęć; warto jednak podkreślić odkrycie związku między szerokością relacyjną a maksymalnym rozmiarem „zabronionego wzorca” w strukturze, co jest wartościową ogólną konstatacją. W pracy A3 (współautorskiej) idee habilitanta zostały połączone z pewnymi koncepcjami natury topologicznej rozwiniętymi wcześniej przez innych autorów, przynosząc w efekcie określenie szerokości relacyjnej dla kolejnych klas struktur.

W pracy A4 (jednoautorskiej) autor rozważa klasę struktur definiowalnych w strukturze $(Q; <)$ za pomocą formuł Horna i określa dokładnie pewną podklasę formuł, dla których tak zdefiniowana struktura ma własność ograniczonej ścisłej szerokości relacyjnej. Ta ostatnia własność jest również w centrum zainteresowania badań nad CSP, bo pozwala łatwo rozszerzać „małe” rozwiązania częściowe do rozwiązań pełnych i jest też określana jako *local-to-global consistency*. Spośród wszystkich rezultatów osiągnięcia habilitacyjnego, to twierdzenie można chyba najłatwiej ściśle wypowiedzieć; jest to moim zdaniem rezultat o dość fundamentalnym znaczeniu. Dowód jest trudny i choć w jakiejś mierze korzysta z już wypracowanych rezultatów, to zwłaszcza część negatywna – że struktura definiowalna przez „trudniejszą” formułę nie ma ścisłej szerokości – wymagała nowych pomysłów; autor pokazuje tu, że takie formuły muszą definiować pewne podstruktury, które z kolei nie są zachowywane przez odpowiednie homomorfizmy.

Praca A5 (wspólna z M. Bodirsky’em) stanowi krok w kierunku rozwiązania wspomnianej wyżej hipotezy F-V dla struktur nieskończonych, potwierdzając tę hipotezę dla pewnej klasy struktur, a mianowicie struktur definiowalnych w strukturze przeliczalnej zadanej przez relację równoważności z nieskończeniem wieloma nieskończonymi klasami abstrakcji. Zauważmy, że ta praca (z 2012 r.) wyprzedziła rozwiązanie hipotezy F-V dla struktur skończonych przez Bulatova i Zhuka. W dowodzie oprócz technik algebraicznych wykorzystuje się też elementy teorii Ramseya. Jak habilitant zauważa w autoreferacie, technika wprowadzona w tej pracy dla wykazania części negatywnej rezultatu (tj. *NP*-trudności problemu) została następnie zastosowana przez współautora i innych badaczy w 4 kolejnych pracach do otrzymania kolejnych twierdzeń dychotomicznych dla struktur nieskończonych.

W pracach A6 i A7 habilitant (w A6 wraz z H.Chenem) rozważa wariant problemu CSP nad strukturą $(Q; <)$, w którym w domknięciu kwantyfikatorowym formuł Horna dopuszczamy również kwantyfikatory uniwersalne. Głównym rezultatem jest kolejne twierdzenie o dychotomii, z tym, że tym razem alternatywą klasy *P* jest klasa *co-NP* (zamiast *NP*).

W pracy A8 (jednoautorskiej) habilitant stosuje pojęcia i techniki wypracowane w teoretycznych studiach nad problemem CSP dla struktur ω -kategorycznych do osiągnięcia rezultatu o wymiernym znaczeniu praktycznym — praca była przedstawiona na konferencji AAAI. Rezultatem jest algorytm rozwiązujący w czasie wielomianowym problem abdukcji (czyli znajdowania hipotez wyjaśniających daną obserwację) dla szerokiej klasy struktur nieskończonych posiadających ograniczoną ścisłą szerokość relacyjną. Algorytm ten może znaleźć zastosowanie w rozwiązywaniu problemu abdukcji w kontekście rozumowań o zjawiskach czasoprzestrzennych.

Podsumowanie. Prace stanowiące osiągnięcie habilitacyjne dra Michała M. Wrony przynoszą szereg ważnych i trudnych rezultatów. Wyróżniłbym tu zwłaszcza prace A1-A2 inicjujące studia nad szerokością relacyjną struktur nieskończonych, a także elegancką charakteryzację syntaktyczną własności *local-to-global consistency* z pracy A5. We wszystkich pracach habilitant podejmuje ambitne problemy i po mistrzowsku operuje technikami algebry, teorii modeli, kombinatoryki i teorii złożoności, niejednokrotnie dając też istotnie nowe pomysły. Tematyka prac jest ważna zarówno z matematycznego punktu widzenia – jako pewnego rodzaju pomost między teorią modeli a teorią złożoności, jak i z uwagi na liczne odniesienia do praktycznych działów informatyki, jak bazy danych – zwłaszcza danych czasoprzestrzennych (ang. *spatiotemporal data*) i sztuczna inteligencja. Hipoteza Federa-Vardiego w odniesieniu do struktur nieskończonych nie budzi może tyle emocji, co w – już rozwiązany – przypadku skończonych, jednak problematyka związana z tym zagadnieniem pozostaje w głównym nurcie logiki informatycznej, o czym świadczyć może jej ciągła obecność na konferencji LICS.

Wejście w tę tematykę wymaga dużej wiedzy m.in. z algebry i może właśnie dlatego nie pracuje w niej tak wiele osób, co pośrednio wpływa na liczbę cytowań omawianych tu prac, jeszcze nie bardzo wysoką. Jednak prace habilitanta są merytorycznie cytowane przez aktywnych badaczy; w pracy Motetta i Pinsker’a z konferencji LICS 2022 dr Wrona jest wymieniony z nazwiska; a praca A5, jak wspomnieliśmy wyżej, miała już szereg kontynuacji.

Kto wie, czy liczba czytelników prac habilitanta nie byłaby większa, gdyby przyjął on bardziej przystępny styl pisania prac. Lektura prac A1–A8 pokazuje pewien kontrast między pracami własnymi a współautorskimi – te ostatnie dają więcej intuicji i motywacji, na przykład praca A3 ukazuje metodę lokalnej zgodności w kontekście szerszym niż CSP, wskazując na inne zastosowania tej metody, jak m.in. algorytm Weisfeilera-Lemana dla problemu izomorfizmu grafów. Prace własne habilitanta sprawiają wrażenie, jakby adresowane były do grona specjalistów pracujących nad podobnymi problemami. Powyższa ktytyczna uwaga nie wpływa jednak na moją wysoką ocenę osiągnięcia habilitacyjnego. Nie mam wątpliwości, że osiągnięcie habilitacyjne dra Michała M. Wrony stanowi wartościowy wkład w informatykę teoretyczną (w myśl Art. 219 Ustawy z 2018 r.), a przedstawiona kolekcja prac stanowiłaby wartościową rozprawę habilitacyjną w tradycyjnym sensie.

Całość dorobku

Łącznie wg bazy DBLP dorobek Michała M. Wrony obejmuje 3 prace w czasopismach i 16 prac na konferencjach. Wszystkie te prace opublikowane są w dobrych, czasem świetnych, miejscach; warto odnotować, że oprócz pracy A2 habilitant przedstawił jeszcze jedną samodzielną pracę na konferencji LICS. Przegląd dorobku dokonany przez habilitanta w autoreferacie pokazuje, że jego prace nie powstawały przypadkowo, ale wynikały z konsekwentnie realizowanych programów badawczych. Programy te dotyczą różnych zagadnień logicznych, ale motywem wspólnym jest klasyfikacja złożoności obliczeniowej rozważanych problemów, przy czym wyniki często przybierają postać dychotomii lub czasem trychotomii, czyli rozwiązują problem kompletnie, z dokładnością do naszej współczesnej wiedzy o klasach P , NP , $co-NP$ i in. W szczególności habilitant klasyfikuje w ten sposób problemy dotyczące tzw. wnioskowania minimalnego (*minimal inference*) stanowiącego przykład tzw. rozumowania zdroworozsądkowego (*commonsense reasoning*), rozważanego w sztucznej inteligencji. Cykl prac wyrosły z doktoratu habilitanta dotyczy kwantyfikowanych logik temporalnych; tu również osiągnięto szereg klasyfikacji, uzyskując w szczególności algorytmy wielomianowe dla wielu nietrywialnych fragmentów. W innej pracy habilitant (ze współautorami) bada wpływ, jaki na złożoność problemu CSP ma dodanie kwantyfikatorów zliczających. Kwantyfikatory te w literaturze rozważane są jako niestandardowe rozszerzenie różnych logik, prowadzące do ciekawych pytań.

Dorobek Michała M. Wrony jest dobrym przykładem równowagi między pracami samodzielnymi a współautorskimi. Pewien niedosyt pozostawia brak prac, w których habilitant byłby w roli inspiratora młodszych badaczy; wynika to zapewne z przebiegu dotychczasowej kariery habilitanta, który wiele czasu spędził jako stypendysta poddoktorski. Z CV wynika jednak, że habilitant był promotorem 11 prac licencjackich i jednej magisterskiej.

Warunek z Art. 219 Ustawy wymagający realizacji aktywności naukowej w więcej niż jednej uczelni, w szczególności zagranicznej, habilitant spełnił z nawiązką działając w co najmniej 5 uczelniach, w tym w prestiżowej École Polytechnique w Paryżu.

Konkluzja. Jestem całkowicie przekonany, że zarówno osiągnięcie habilitacyjne, jak i całość dorobku habilitanta spełniają ustawowe i zwyczajowe wymagania do uzyskania stopnia naukowego doktora habilitowanego. Wnioskuje o nadanie panu doktorowi Michałowi Marii Wronie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie informatyka.



Cieszyn, 19 września 2022

Damian Niwiński