Zainteresowania i przebieg kariery naukowej

Początki działalności naukowej

Działalność badawczą rozpocząłem na studiach magisterskich w roku 2013, próbując sił w dziedzinie algorytmów aproksymacyjnych pod opieką Marka Cygana. Po rozpoczęciu doktoratu zainteresowałem się również złożonością parametryzowaną i napisałem mój pierwszy samodzielny artykuł "Clifford algebras meet tree decompositions", w którym przyspieszyłem algorytmy z wcześniejszej pracy dra Cygana, zliczające obiekty przy parametryzacji szerokością drzewiastą grafu. Artykuł ten został wyróżniony nagrodą Best Paper na konferencji IPEC 2016, a dodatkowo stanowił dla mnie pierwszą udaną próbę łączenia pomysłów z różnych dziedzin nauki. Wąskie gardło wcześniejszych algorytmów stanowiła nietypowa (bo nieprzemienna) operacja splotu funkcji określonych na zbiorach. Znaną wcześniej technikę efektywnego obliczania przemiennego splotu funkcji można interpretować jako szczególny przypadek twierdzenia o klasyfikacji algebr, z którym można się zetknąć na studiach magisterskich z matematyki. Jak się okazało, twierdzenie to można zaaplikować również do nieprzemiennego splotu funkcji, co stanowiło punkt wyjścia do opracowania szybszego algorytmu.

Złożoność drobnoziarnista

Pracując razem z zespołem na UW, zainteresowaliśmy się dokładną złożonością obliczeniową problemu plecakowego, motywowani niedawnym przełomem dla powiązanego problemu sumy podzbioru. Podczas gdy do zrozumienia ostatniego problemu kluczowym algorytmicznym składnikiem jest konwolucja ciągów, którą można obliczyć w czasie $O(n \log n)$ przy pomocy transformaty Fouriera, to dla problemu plecakowego analogiczny składnik stanowi konwolucja w półpierścieniu (min,+) (tj., operatory dodawania i mnożenia na liczbach całkowitych zastępujemy operatorami minimum i dodawania). Okazało się, że już wcześniej próbowano przyspieszyć kwadratowy algorytm dla (min,+)-konwolucji, jednak próby te zakończyły się fiaskiem. Zauważyliśmy, że problem plecakowy oraz kilka innych zagadnień można wyrazić w języku (min,+)-konwolucji i udało nam się pokazać podkwadratową równoważność pomiędzy nimi, tzn., gdyby którekolwiek z nich posiadało algorytm podkwadratowy pociągałoby to istnienie takich algorytmów dla całej klasy. Zainspirowani teorią redukcji podkubicznych wokół All Pairs Shortest Paths, na konferencji ICALP 2017 przedstawiliśmy hipotezę, że nie istnieje podkwadratowy algorytm obliczający (min,+)-konwolucję, która została potem wielokrotnie wykorzystana jako punkt wyjścia do uzasadniania trudności problemów.

W dalszych badaniach skupiliśmy się na schematach aproksymacji dla szerszej klasy zagadnień o strukturze addytywnej. W tym przypadku osiągnęliśmy wyniki pozytywne. W szczególności udało nam się skonstruować podkwadratowy schemat aproksymacji (otrzymując złożoność $\tilde{O}(n + (\frac{1}{\epsilon})^{5/3})$ dla problemu Partition, co stanowi pierwszą poprawę od 40 lat. Algorytm, opublikowany na konferencji SODA 2019, opiera się na połączeniu pseudowielomianowego algorytmu dla problemu sumy podzbioru z roku 2017 oraz wyników z kombinatoryki addytywnej z początku lat 90-tych.

Parametryzowane aproksymacje

W 2017 roku nawiązałem współpracę z Euiwoongiem Lee z New York University w celu poszerzenia wyników z jego wcześniejszej pracy. Traktowała ona m.in. o $(\log k)$-aproksymacji dla problemu k-Path Transversal (usunąć jak najmniejszą liczbę wierzchołków z grafu, aby nie zawierał on ścieżki prostej długości k) o parametryzowanej złożoności obliczeniowej $f(k) \cdot poly(n)$. Opisaną technikę udało się uogólnić na szerszą klasę problemów, w których usuwając wierzchołki chcemy ograniczyć szerokość drzewiastą grafu. Wcześniejsze wyniki gwarantowały istnienie stałej aproksymacji dla każdego pojedynczego problemu z tej klasy, ale były one niekonstruktywne, przez co m.in. nie znano żadnych ograniczeń górnych na współczynniki aproksymacji. Nasza technika omijała te przeszkody i gwarantowała logarytmiczną zależność współczynników aproksymacji od docelowej szerokości drzewiastej. Opublikowana praca "Losing treewidth by separating subsets" (SODA 2019) zawierała szereg algorytmów aproksymacyjnych parametryzowanych szerokością drzewiastą docelowej klasy grafów.

Efektem mojej wizyty na Uniwersytecie Wrocławskim w 2018 roku był kolejny udany przykład połączenia dziedzin złożoności parametryzowanej i aproksymacji. Razem z zespołem prof. Jarosława Byrki pracowaliśmy nad problemem Capacitated k-Median: celem jest podzielenie zbioru punktów na k klastrów, tak aby zminimalizować sumę odległości do centrum klastra i nie przekroczyć zadanych ograniczeń na pojemność centrum klastra. O ile dla k-Median bez ograniczeń pojemności znany jest algorytm gwarantujący stałą aproksymację, dla Capacitated k-Median najlepsza znana aproksymacja to $O(\log k)$. Zestawiliśmy pomysły z powyższego algorytmu z technologią złożoności parametryzowanej i skonstruowaliśmy algorytm o stałej aproksymacji parametryzowany przez k (o złożoności $k^{O(k)} \cdot poly(n)$).

Optymalizacja stochastyczna

W roku 2015 odwiedziłem Uniwersytet Sapienza w Rzymie, gdzie w zespole prof. Leonardi analizowaliśmy optymalizację w obliczu niepełnej znajomości danych. W rozważanym modelu nieznane są pełne dane wejściowe, natomiast dany jest modelujący je rozkład prawdopodobieństwa. Pokazaliśmy, że np. w problemie Set Cover dla szerokiej klasy rozkładów możliwe jest osiągnięcie takiej samej aproksymacji jak w wersji deterministycznej, tj. $O(\log n)$, a także poszerzyliśmy listę wyników dla modelu z założeniem niezależności zdarzeń o m.in. stałą aproksymację dla problemu Facility Location.

W późniejszym okresie wraz z Markiem Adamczykiem pracowaliśmy nad innym zagadnieniem optymalizacji stochastycznej: tzw. contention resolution schemes. Są to metody losowego zaokrąglania rozwiązań programów wypukłych dla rozmaitych systemów ograniczeń. Ważnym przykładem takiego systemu jest przecięcie k matroidów, dla którego znane metody zaokrąglania obarczone były multiplikatywnym kosztem $4k - 2$ bądź $e(k + 1)$. Opracowaliśmy nową technikę, w której losujemy kolejność rozważanych elementów, wykorzystujemy kombinatoryczną strukturę baz matroidu i analizujemy powstały proces stochastyczny przy pomocy martyngałów. Pozwoliło to na poprawę kosztu zaokrąglania do $k + 1$. W pracy "Random order contention resolution schemes" (FOCS 2018) opisaliśmy szereg zastosowań tej techniki, w tym poprawę współczynnika aproksymacji dla projektowania wielowymiarowych aukcji Bayesowskich oraz dla próbkowania stochastycznego.