

Ile razy zastanawialiście się nad przyczyną korka na trzypasmowej autostradzie, co mogło być jego przyczyną? Zwłaszcza że sytuacja na drodze często poprawiała się bez żadnego śladu czegośkolwiek, co mogłoby spowodować zatrzymanie ruchu. Czy aby powstał korek, potrzebne są światła, utrudnienia ruchu związane z robotami na drodze, czy też może kolizja? Na to pytanie postaramy się odpowiedzieć w poniższym tekście.

Historia badań nad ruchem samochodów sięga lat pięćdziesiątych XX wieku, kiedy to proponowano modele zarówno kinematyczne, jak i oparte na dynamice jednowymiarowego przepływu lepkiej, lecz nieściśliwej cieczy. Modele takie miały swoje zalety, ale nie były zbyt efektywne. Np. drugie podejście nie tylko wymagało rozwiązania równania Naviera–Stokesa (które, jak wiadomo, jest ściśle rozwiązywalne tylko w pewnych szczególnych przypadkach), ale także wprowadzało wiele wolnych parametrów. Przełom nastąpił na początku lat 90. za sprawą wzrastającej mocy obliczeniowej komputerów. Zaproponowano wtedy tzw. modele automatów komórkowych (ang. *cellular automata*). Modele te były następnie udoskonalane i rozszerzane, przybierając coraz bardziej zaawansowaną postać.

Taki właśnie dyskretny model proponujemy do naszych rozważań. Jego dyskusję rozpoczniemy od omówienia przypadku szczególnie prostego, mianowicie modelu jednopasmowej drogi, na której ruch odbywa się bez żadnych przeszkód. Następnie rozszerzymy nasze rozważania na drogę dwupasmową, aby zarysować ideę wprowadzania dodatkowych pasów ruchu. W końcu porównamy otrzymane rezultaty w ramach modelu trzypasmowej autostrady z wynikami rzeczywistych pomiarów.

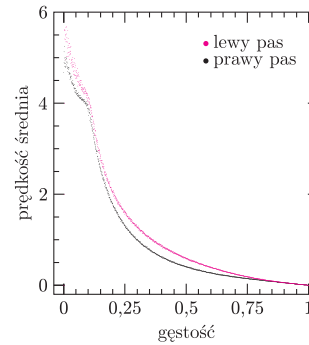
Zakładamy, że droga podzielona jest na komórki równej długości, przy czym samochody poruszają się w pętli. Każda komórka może znajdować się w $v_{\max} + 2$ stanach, tzn. może się w niej znajdować samochód o dyskretnych szybkości od zera do szybkości maksymalnej v_{\max} albo komórka może być pusta. Zaznaczmy jednak, że v_{\max} oznacza maksymalną szybkość dopuszczalną na drodze, natomiast szybkość maksymalna indywidualnych samochodów może być mniejsza. Zakładamy, iż samochody poruszają się zgodnie z obowiązującymi przepisami. Na długość komórki składa się długość samochodu oraz bezpieczny dystans przed i za samochodem (pomijamy różnicę w długości samochodów). Przyjmujemy także, iż na drodze nie występują przeszkody w postaci uszkodzonych samochodów, skrzyżowań, światła itp. Samochody nie mogą również zderzać się.

Zajmijmy się ruchem pojedynczego samochodu w modelu jednopasmowym. Samochód w każdym kroku przesuwa się o tyle komórek do przodu, ile wynosi jego prędkość. Jeżeli liczba pustych komórek do znajdującego się przed nim samochodu jest mniejsza od jego szybkości, samochód zwalnia do szybkości

równej liczbie komórek dzielących oba samochody. Kierowca może jednak zahamować zbyt silnie i zmniejszyć szybkość jeszcze bardziej. Takie zachowanie kierowcy opisujemy w naszym modelu za pomocą prawdopodobieństwa i możemy traktować je jako pewną miarę jego umiejętności. Samochód przyspiesza, jeżeli ma wystarczająco dużo miejsca przed sobą i jego prędkość jest mniejsza od jego prędkości maksymalnej. Manewr przyspieszania opisujemy tym samym rozkładem prawdopodobieństwa, co w przypadku zwalniania.

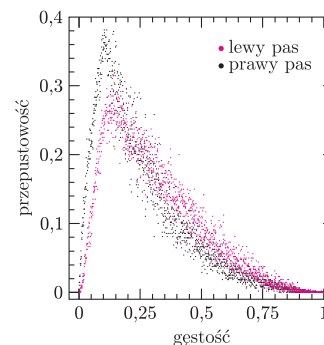
Rozszerzenie na więcej pasów jest dość naturalne. W naszej symulacji zaproponowaliśmy następujące rozwiązanie. Samochód zmienia pas na lewy, jeżeli znajduje się przed nim samochód poruszający się wolniej, a liczba wolnych komórek przed i za samochodem na pasie docelowym jest co najmniej równa maksymalnej prędkości dopuszczalnej w symulacji. W przeciwnym razie pojazd jest zmuszony zmniejszyć prędkość. Samochody powracają na prawy pas zawsze, gdy tylko mają taką możliwość.

Przedyskutujemy teraz wyniki naszych symulacji w przypadku dwupasmowym. Na rysunku 1 widzimy zależność średniej szybkości samochodów od gęstości na drodze.



Rys. 1. Prędkość średnia, mierzona liczbą komórek pokonywanych w jednym kroku, odpowiadająca gęstości, mierzonej liczbą samochodów przypadających na komórkę.

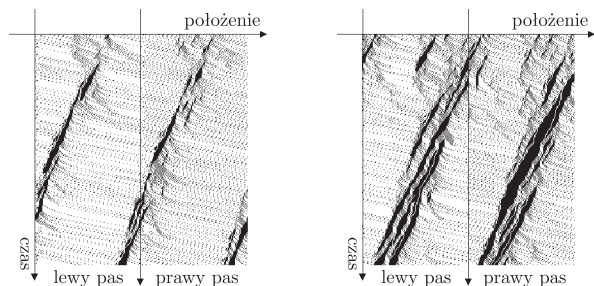
Widzimy, co jest dość oczywiste, że ruch na lewym pasie odbywa się zawsze nieco szybciej niż na prawym. Ponadto wzrost liczby samochodów powoduje spadek średniej szybkości ruchu. Ciekawa jest też zależność natężenia ruchu (liczby samochodów przejeżdżających przez komórkę) od gęstości (rys. 2).



Rys. 2. Natężenie ruchu, mierzone stosunkiem liczby samochodów przejeżdżających przez daną komórkę do liczby kroków, odpowiadające gęstości, mierzonej liczbą samochodów przypadających na komórkę.

Na początku natężenie wzrasta w przybliżeniu liniowo ze wzrostem gęstości (coraz więcej samochodów mogących się poruszać z prędkościami bliskimi maksymalnej), a następnie zaczyna maleć (coraz więcej samochodów uwieczonych w korkach). Zauważmy jeszcze, że charakter obu wykresów zmienia się dla tej samej wartości gęstości, około 0,06 samochodu na komórkę. Na obu wykresach pokazano wyniki wielu symulacji (różne rozmieszczenie i szybkości początkowe samochodów na drodze przy starcie programu).

Zajmiemy się teraz szczegółową analizą tego, co dzieje się na drodze. Na rysunkach 3 i 4 przedstawione są diagramy czasoprzestrzenne dla gęstości samochodów 0,15 i 0,25 samochodu na komórkę.

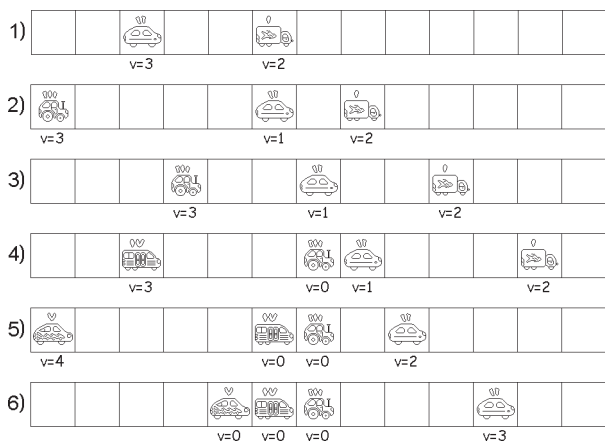


Rys. 3

Rys. 4

Każda kropka obrazuje samochód. Czarne obszary odpowiadają samochodom stojącym jeden za drugim w korku. Widzimy, że kiedy samochody poruszają się w prawo, korek porusza się w lewo. Widzimy także, że sytuacja na obu pasach jest dość symetryczna, tzn. powstaniu korka na prawym pasie towarzyszy pojawienie się zatoru na pasie lewym.

Spróbujemy wyjaśnić mechanizm powstawania korka. W tym celu powrócimy do modelu jednopasmowego, aby uprościć nieco rozważania. Przyjrzyjmy się rysunkowi 5.



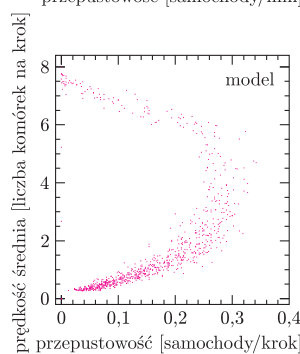
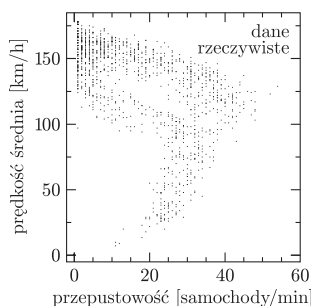
Rys. 5. Mechanizm powstawania korka. Opis w tekście.

Podzieliłmy go na 6 części i teraz kolejno je omówimy. Samochód II ($v = 3$) porusza się z szybkością większą od liczby wolnych komórek. W myśl naszych zasad musi zwolnić. Przypuśćmy jednak, że kierowca hamuje zbyt silnie i zwalnia o dwie jednostki szybkości.

W następnym kroku samochód II nie może przyspieszyć, bo nie ma wystarczająco dużo komórek przed nim. W kroku trzecim samochód III gwałtownie hamuje i w wyniku hamowania zatrzymuje się w kroku

czwartym. Pojazd IV zmuszony jest także się zatrzymać. W tym samym czasie samochód II przyspiesza. Następnie samochód V także staje, podczas gdy samochód II dalej zwiększa swoją prędkość. Możemy sobie wyobrazić, że kolejne samochody będą zatrzymywać się na końcu korka, z kolei samochody znajdujące się na początku będą przyspieszać i odłączać się od korka w miarę możliwości. Widzimy, że korek nie tylko może powstać samoistnie, ale także rozumiemy przyczynę ruchu zagęszczenia w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu samochodów.

Warto na koniec odnieść się do rzeczywistości. Ponieważ wykonanie badań wymaga odpowiedniej aparatury i dostępu do autostrad, których nie mamy



Rys. 6. Związek między natężeniem ruchu a średnią prędkością dla rzeczywistych danych (u góry) i rozpatrywanego modelu (u dołu).

zbyt wiele, poprosiliśmy o pomoc Petera Wagnera z German Aerospace Centre i Landschaftsverband Nordrhein-Westfalen w Niemczech, któremu w tym miejscu pragniemy podziękować. Otrzymane wyniki pomiarów opracowaliśmy i dostosowaliśmy do skonfrontowania z naszymi symulacjami. Porównamy zależność średniej szybkości od natężenia ruchu dla trzypasmowej autostrady. Przyjmujemy, że komórka ma długość 6 m, a jeden krok odpowiada jednej sekundzie, czyli np. pokonywanie jednej komórki na krok odpowiada szybkości 22 km/h. Na rysunku 6 przedstawiono oba wykresy.

Prezentujemy wykresy dla lewego pasa (dla środkowego i prawego wykresy są podobne, tyle że ruch odbywa się wolniej). Widzimy pewne podobieństwo między wykresami, chociaż w przypadku rzeczywistym rozrzut prędkości jest dużo większy. Górna część wykresów odpowiada sytuacji, kiedy nie ma korków, dolna załamaniu się ruchu i powstaniu na drodze zagęszczeń.

Choć nasz model jest bardzo uproszczony, to pozwala dostrzec i opisać pewne cechy ruchu pojazdów na autostradzie. Wyjaśnia także spontaniczne pojawianie się korków, co było zasadniczym jego celem. Można go jednak rozwijać, wprowadzając np. szerszą skalę szybkości. Wymaga to jednak zwiększenia liczby komórek składających się na autostradę, tak aby pozostała ona wystarczająco długa, a to z kolei prowadzi do konieczności użycia komputerów o większej mocy obliczeniowej. Mamy nadzieję, że tym artykułem przyczynimy się nie tyle do zmniejszenia ilości korków na drogach, ile do pogłębienia wiedzy na temat ich natury.