

Antykruche systemy sterowania: Przypadek sieciowego modelu dynamiki ruchu drogowego w mieście opartego na oscylatorach

paź 16, 2025

Streszczenie

Ruch drogowy w miastach to proces wysoce nieliniowy, który nieustannie ewoluuje w warunkach niepewności. Krótkotrwałe, sporadyczne zdarzenia mogą determinować duże zmiany w przepływie ruchu, które rozprzestrzeniają się zarówno w przestrzeni, jak i w czasie w miejskiej sieci drogowej. Istniejące systemy sterowania ruchem drogowym dysponują jedynie lokalną perspektywą obejmującą wiele skal ewolucji ruchu, a mianowicie odpowiednio poziom skrzyżowania, poziom korytarza i poziom regionu.

Agregacja takich lokalnych widoków ewolucji ruchu na dużym obszarze to cel, który obecne systemy sterowania próbują osiągnąć, wykorzystując modele ruchu. Jednak uchwycenie niepewności w tak złożonych interakcjach czasoprzestrzennych jest bardzo trudnym zadaniem i często doświadczamy, jak kruche są takie systemy w rzeczywistości. Na szczęście, pomimo swojej złożonej mechaniki, ruch drogowy jest opisywany przez różne zjawiska okresowe. Rozkłady przepływu w dni robocze w godzinach porannych i wieczornych dojazdów do pracy można wykorzystać do dostosowania ruchu i zwiększenia jego odporności na zakłócenia.

Dodatkowo, sterowanie ruchem drogowym opiera się również na procesie okresowym, wybierając fazę zielonego światła do przydzielenia prawego pasa ruchu dla kierunków przeciwnych oraz uzupełniając fazę czerwonego światła dla kierunków sąsiednich. W naszej pracy harmonizujemy tę perspektywę i rozważamy nowatorski system sterowania ruchem drogowym oparty na sieci oddziałujących oscylatorów. Taki model ma tę zaletę, że pozwala uchwycić zarówno czasowe, jak i przestrzenne interakcje fazowania sygnalizacji świetlnej, a także ewolucję makroskopowych cech ruchu na poziomie sieci (tj. przepływu, gęstości).

Wykazujemy, że systemy sterowania w pętli zamkniętej, wykorzystujące okresowość rejestrowaną przez taki model, mają potencjał do opanowania dynamiki okresowej i są odporne na nieodłączną niepewność związaną z ewolucją ruchu. W niniejszym badaniu proponujemy nową realizację antykruchego modelu sterowania do sterowania siecią oddziałujących modeli sygnalizacji świetlnej opartych na oscylatorach, aby osiągnąć optymalizację przepływu na poziomie regionu.

Wykazujemy, że antykruche sterowanie może uchwycić zmienność miejskiego środowiska drogowego i niepewność dotyczącą rozkładu możliwych zakłóceń. Uzupełniamy nasze teoretyczne projektowanie i analizę sterowania eksperymentami w warunkach rzeczywistych, porównując korzyści płynące z antykruchego projektu sterowania ruchem.

[Read more](#)

Kontrola ruchu

W zasadzie sterowanie ruchem drogowym w pętli zamkniętej mogłoby skalować się do poziomu miasta, w idealnym scenariuszu, gdy wszystkie interakcje czasowe i przestrzenne między skrzyżowaniami są znane i precyzyjnie modelowane. Jednak nigdy tak się nie dzieje i pojawiają się dodatkowe wymiary.

Technicznie rzecz biorąc, kluczowym aspektem różnicującym istniejące systemy jest ich podstawowy model ruchu, innymi słowy, dynamika ruchu, którą rejestrują, oraz sposób, w jaki model ten radzi sobie z nieodłączną niepewnością, zmiennością i zmiennością rejestrowanych zmiennych.

Na przykład, w oparciu o duże ilości danych o ruchu terenowym o wysokiej rozdzielczości, Hu i Liu (2013) wykorzystali warunkowy rozkład czasów zielonego sygnału i zapotrzebowania na ruch w celu poprawy płynności ruchu w mieście. Jednak takie dane były kosztowne w pozyskaniu, a metoda statystyczna nie była w stanie obsłużyć zdarzeń z długiego ogona (np. wahań dziennego natężenia ruchu w weekendy w porównaniu z dniami roboczymi).

Wykorzystując stosunkowo prosty model przewidywania przyjazdów na skoordynowane skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, praca Daya i Bullocka (2020) zakłada interakcje typu „najbliższy sąsiad” między sygnalizatorami i wykorzystuje liniową superpozycję rozkładów do optymalizacji czasu trwania faz sygnalizacji świetlnej. Pomimo znalezienia optymalnej koordynacji, algorytm nie był w stanie obsłużyć nieprzewidywalnych zmian w kształtach plutonów (tj. sporadycznie spowodowanych ich rozdzielaniem i łączeniem) ani prognozowania w warunkach nasycenia (tj. korków, wypadków).

Tak ograniczone możliwości adaptacji w obliczu niepewności i zakłóceń mogą rozprzestrzeniać się w czasie i przestrzeni w systemie, prowadząc do dużych zatorów, czyniąc go kruchym.

Głównym celem niniejszego badania jest wprowadzenie zastosowania sterowania antykruchego do sterowania ruchem i optymalizacji w warunkach niepewności, zmienności i zmienności. Jak ujęto w książce Taleba Taleba (2012), antykruchość to właściwość systemu, która pozwala mu czerpać korzyści z niepewności, losowości i zmienności, w przeciwieństwie do kruchości. Reakcja systemu antykruchego na zaburzenia zewnętrzne jest ponadprzeciętnie odporna, co oznacza, że niewielkie czynniki stresogenne mogą wzmocnić przysłą reakcję systemu poprzez dodanie silnego komponentu antycypacyjnego.

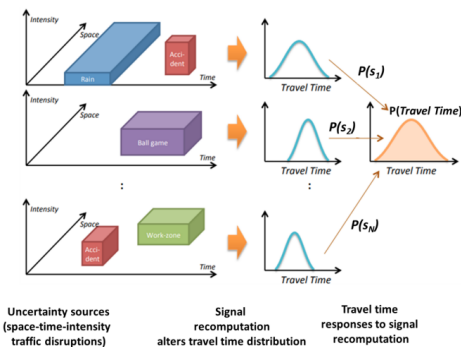
W przypadku systemu zamkniętego stosujemy model wprowadzony przez Axenie i in. (2021), który wykorzystuje modelowanie dynamiki oparte na oscylatorach. Takie podejście ma tę zaletę, że uwzględnia zarówno okresowość dziennych/sezonowych wzorców ruchu, jak i okresowość lokalnych czasów sygnalizacji świetlnej, a jak wykazano w pracy Axenie i in. (2021), jest odporne i wydajne w dużej skali. Proponujemy obecnie alternatywny mechanizm sterowania, oparty na modelu sterowania antykruchego wprowadzonym przez Axenie i in. (2022) i opartym na zasadach zawartych w przełomowej pracy Taleba i Douady'ego (2013).

Modelowanie sieci i dynamiki interakcji oparte na oscylatorach

Modelowanie i sterowanie oparte na oscylatorach to podejście wywodzące się z fizyki, które okazuje się być prawdopodobnym zastosowaniem w sterowaniu ruchem drogowym. W bardzo dobrym przeglądzie i perspektywie, badanie Chedjou i Kyamakya (2018) wprowadziło formalizm modelowania i sterowania ruchem drogowym opartym na oscylatorach.

Pomimo dobrych podstaw matematycznych, proponowane podejście było statyczne, ponieważ usuwało całą zbieżność i dynamikę modelu opartego na oscylatorach, zastępując go rozwiązaniem stacjonarnym. Takie podejście dowodzi swoich zalet na poziomie pojedynczego skrzyżowania, jak twierdzą również autorzy, ale zawiedzie w rozległych, heterogenicznych sieciach drogowych (tj. o nierównomiernej geometrii dróg, zaburzonych wzorcach ruchu, zmienności obciążenia ruchem, niepewności warunków pogodowych).

Podejście przyjęte w niniejszym badaniu polega na zaprojektowaniu zamkniętego układu sterowania antyfragilnego, w którym nowy regulator o zmiennej strukturze i trybie ślizgowym (patrz Utkin (2008)) jest zaprojektowany dla modelu oscylatorów sprzężonych nieliniowo w oparciu o model Strogatza (2000).



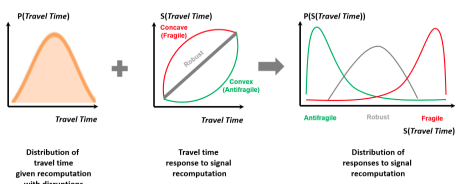
Ciągłość kruchości-odporności-antykruchości w sterowaniu ruchem

Dynamika ruchu jest wysoce nieliniowa i wrażliwa na wiele źródeł niepewności. W tym przypadku wykraczamy poza niepewność, uchwycając rzeczywistą dynamikę ruchu za pomocą modelu (tj. niepewności strukturalne/parametryczne) i rozważamy zmiany, jakie zakłócenia, takie jak pogoda, wypadki, wydarzenia społeczne i dostępność infrastruktury (tj. niepewności niestrukturalne lub dynamika niemodelowana), wywołują w ogólnym przepływie

samochodów.

Niepewność, zmienność i zmienność nieodłącznie związane z takimi zakłóceniami są opisywane przez stochastyczną ewolucję w układzie odniesienia czasoprzestrzenno-intensywnościowym. Złożony efekt takich zakłóceń (zazwyczaj o charakterze addytywnym) znajduje odzwierciedlenie w obliczonych miarach jakości ruchu, na przykład w czasie podróży samochodów na określonej trasie. Takie niestrukturyzowane niepewności determinują ponowne obliczenia sygnalizacji świetlnej, które następnie zmieniają kształt rozkładu czasu podróży, a tym samym ogólny rozkład czasu podróży – jak przedstawiono na Rysunku 2.

Rysunek 2: Niepewność, zmienność i zmienność w sterowaniu ruchem drogowym z uwzględnieniem czasu podróży na trasie. Intensywność czasoprzestrzenna różnych źródeł niepewności w ruchu drogowym (np. pogoda, wypadki, wydarzenia społeczne, dostępność infrastruktury oraz ponowne obliczenia sygnalizacji świetlnej, które zmieniają rozkład czasu podróży). Zmiana ogólnego (na całej trasie) rozkładu czasu podróży w odpowiedzi na ponowne obliczenia sygnalizacji.



Rysunek 3: Mapowanie wpływu niepewności na czas podróży P (czas podróży) na widmo kruchości-odporności-antykruchości w warunkach rekomputacji sygnału. Odpowiedź na rekomputację sygnału, zmieniająca kształt czasu podróży S (czas podróży), może się zmieniać w zależności od zmiennych sterujących w pętli zamkniętej i przesuwając system w kierunku innego obszaru odpowiedzi na

rozkład czasu podróży $P(S(\text{czas podróży}))$. Ze względu na okresowy charakter sygnalizacji świetlnej, kształt S (czas podróży) może być wypukły (tj. zachowanie antykruche), wklęsły (tj. zachowanie kruche), liniowy (tj. zachowanie odporne) lub nawet mieszany wypukło-wklęsły (tj. zachowanie niestacjonarne).

Idąc dalej w naszym przykładzie czasu podróży, zmianę kształtu rozkładu czasu podróży można opisać poprzez rzeczywisty typ odpowiedzi (tj. kształt) na przestrzenno-czasowo-intensywne charakterystyki niepewności. Możemy następnie opisać rozkład takich odpowiedzi na ponowne obliczenie sygnału wywołane niepewnością w odniesieniu do samego czasu podróży, jak pokazano na rysunku 3. Jak pokazano również w doskonałej pracy Taleba i Westa (2022), jeśli połączymy reakcję na niepewności, lub odpowiedź na niepewność (tj. ponowne obliczenie sygnału) $S(\text{Travel Time})$, z rozkładem czasu podróży $P(\text{Travel Time})$, możemy opisać

rozkład prawdopodobieństwa ponownego obliczenia sygnału $P(S(T \text{ ravel} T \text{ ime}))$). Głównym pomysłem jest to, że możemy zmieniać parametry ponownego obliczenia sygnału tak, aby kształt $S(T \text{ ravel} T \text{ ime})$ zmieniał się, aby obsłużyć zmiany $P(T \text{ ravel} T \text{ ime})$ przy danej niepewności.

Unikalna konfiguracja przestrzenno-czasowej intensywności niepewności w rzeczywistości determinuje punkty krytyczne, w których dynamika ruchu nie byłaby w stanie skompensować niepewności i stałaby się krucha. W inżynierii ruchu spektrum zachowań makroskopowych jest ujmowane za pomocą makroskopowych diagramów fundamentalnych (MFD). Jak systematycznie wprowadzono w pracy Li i Zhang (2011), MFD opisują dwuwymiarowe zależności równowagi przepływu ruchu, gęstości i prędkości, które mogą zapewnić wszechstronne odwzorowanie na widmo kruchości-odporności-kruchości. Dopasowanie obu widm przedstawiono na rysunku 4. W niniejszym artykule rozważamy teoretyczny MFD oraz definicję trzech możliwych stanów równowagi, a mianowicie przepływu swobodnego, przepływu związanego i zatorów, a także ich umiejscowienie w charakterystykach prędkość-gęstość, przepływ-prędkość i przepływ-gęstość (patrz rysunek 4a).

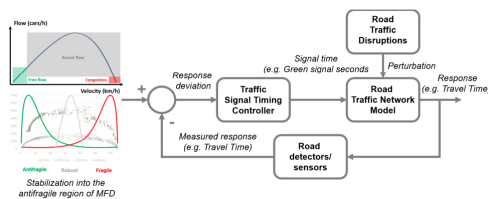
Rysunek 4: Odwzorowanie makroskopowych diagramów fundamentalnych (MFD) na widmo kruchości-odporności-antykruchości w sterowaniu ruchem drogowym w warunkach niepewności. a) Postać analityczna MFD i charakterystyki reżimów ruchu. b) Rzeczywisty MFD wydobyty z rzeczywistego zbioru danych na odcinku autostrady o trzech pasach ruchu. c) Kształty rozkładów krucho-odporny-antykruchych oparte na odwzorowaniu MFD na rzeczywistych krzywych danych. Kształty rozkładów w obszarach strat i zysków (na MFD) są następnie dopasowywane za pomocą heurystyki Taleba (patrz Taleb i Douady (2013)) do kontinuum krucho-odporny-antykruchy.

Jak widać na rysunku 4b, rzeczywisty MFD wskazuje, że w praktyce występuje wiele zarówno spadków przepustowości, jak i wklęsło-wypukłych kształtów MFD. W tym przykładzie dane detektora użyte do obliczenia MFD na rysunku 4b uwzględniają scenariusz autostradowy z otwartego zbioru danych SUMMER-MUSTARD firmy Axenie (2021). Należy zauważyć, że analiza opiera się na scenariuszu autostradowym, więc nie ma sterowania sygnalizacją świetlną. Postanowiliśmy najpierw opisać mapowanie zachowań, gdy dynamika ruchu ewoluuje bez kontroli. Dokładniej, wykreśliśmy MFD dla trzypasmowego odcinka drogi (z wyłączeniem pasa o dużym natężeniu ruchu) w Chinach w ciągu jednego dnia. Możemy odwzorować obszary MFD, a tym samym dynamikę ruchu, na spektrum kruchości – odporności – antykruchości, jak pokazano na rysunku 4c. Wykorzystujemy taksonomię opracowaną przez Taleba w pracy Taleb (2012) oraz heurystykę identyfikacji matematycznej autorstwa Taleba i Douady'ego (2013), aby odwzorować domeny strat i zysków w odniesieniu do rozkładu punktów w MFD ruchu drogowego na rysunku 4a, b.

Biorąc pod uwagę charakterystykę przepływu i prędkości, kształt uzyskany z danych jest zgodny z kształtem analitycznym, co pozwala nam zidentyfikować bezpośrednie odwzorowanie. Tutaj obszar swobodnego przepływu odpowiada grubemu ogonowi w domenie wzmocnienia (tj. rosnącej prędkości z subliniowo rosnącym przepływem) i cienkiemu ogonowi w domenie strat (tj. dużej prędkości i dużego przepływu), praktycznie odpowiadając obszarowi przeciążenia MFD. Odporne zachowanie materializuje się w obszarze, w którym przy umiarkowanej prędkości przepływ samochodów jest maksymalny (tj. przepływ ograniczony), z rozkładem charakteryzującym się cienkim ogonem w domenie strat i cienkim ogonem w domenie wzmocnienia.

[Read more](#)

Rysunek 5: Antykruchy układ sterowania w zamkniętej pętli. Głównym założeniem jest stabilizacja modelu sieci ruchu drogowego



w obszarze antykruchym MFD, tak aby w przypadku zakłóceń w ruchu drogowym prawo sterowania (tj. czas sygnału) mogło doprowadzić system do odpowiedzi (np. czasu podróży) leżącej w obszarze antykruchym MFD lub równoznacznej z obszarami przepływu ograniczonego lub swobodnego.

Rozważając charakterystykę prędkość-gęstość, możemy zauważyć, że rzeczywiste dane odpowiadają kształtowi analitycznemu z dużym obszarem odpornym, obejmującym zakres gęstości od 75 do 275 samochodów/km, gdzie prędkość maleje w kierunku reżimu pełzającego, gdzie tworzy się zator. Rozkład charakterystyki w obszarze antykruchym odzwierciedla średnią gęstość MFD przy dużej prędkości, gdzie niepewność może jedynie przesunąć system w poprzek obszaru odpornego (tj. cienki ogon w obszarze strat i ten ogon w obszarze wzmocnienia). Na drugim końcu spektrum mamy obszar kruchy, w którym tworzy się zator z grubym ogonem, podczas gdy prędkość spada przy bardzo dużej gęstości, gdzie zator już występuje.

Charakterystyka przepływ-gęstość zaczyna już demonstrować ograniczenia, czyli obszar kruchy, dynamiki ruchu bez kontroli. Dokładniej, na rysunku 4b widzimy, że przepływ samochodów nie maleje przy dużej gęstości, co zasadniczo oznacza, że nie osiąga on swobodnego przepływu, a zatem nadal pozostaje w przepływie ograniczonym. Innymi słowy, system osiąga gruby ogon w obszarze strat.

Wywołana antykruchość

Podany przykład został wybrany celowo, aby podkreślić potrzebę algorytmu sterowania zdolnego do przesuwania trajektorii systemu zamkniętego do obszarów antykruchych pod wpływem synchronizacji sygnalizacji świetlnej. W tym artykule rozszerzymy detekcję kruchości-odporności-antykruchości o to, co Taleb w swojej pracy Taleb & Douady (2013) nazwał stopniami kruchości (tj. kruchością dziedziczną i wewnętrzną), indukowaną antykruchość. Realizacja indukowanej antykruchości zakłada projekt systemu sterowania zamkniętego, który może rozsądnie obliczać sygnalizację świetlną kompensującą niepewność.

Jak widać w naszej prostej analizie przedstawionej na rysunku 4, wewnętrzna i inherentna kruchość charakteryzują dynamikę ruchu w pętli otwartej, gdzie efekty drugiego rzędu (tj. przepływ swobodny, przepływ ograniczony i przeciążenie) MFD można odwzorować na spektrum kruchości-odporności-antykruchości (rysunek 4c). Rzeczywiście, bez sygnalizacji świetlnej reakcja systemu na niepewność jest opisana wyłącznie przez kształt rozkładu prawdopodobieństwa zmiennych systemu i jego wrażliwość na niepewność (tj. wewnętrzną kruchość).

Ponadto, przestrzeń niepewności, czas i intensywność, dyktuje to, co definiuje się jako odziedziczoną kruchość i uwzględnia połączoną dynamikę systemu i niepewności (tj. przejścia odpowiednio między przepływem ograniczonym a swobodnym oraz między przepływem ograniczonym a zatorem).

Nasze badanie koncentruje się na zaprojektowaniu systemu sterowania, który przesuwa dynamikę ruchu w pętli zamkniętej do obszarów antykruchych MFD, co przedstawiono na rysunku 5.

Jak pokazano na schemacie sterowania w pętli zamkniętej, głównym problemem jest, innymi słowy, sposób obliczenia sygnału synchronizacji ruchu, który przesuwa zachowanie pętli zamkniętej do obszaru

antykruchego przedstawionego na rysunku 4c. Zakłada się, że wybór sygnału czasu ruchu drogowego jest odporny na niepewność i kompensuje efekty niepewności, opisane poprzez dodatnią lub ujemną ekspozycję na zmienność w niektórych punktach rozkładu (patrz rysunek 4 c).

Wkłady

Główny wkład niniejszego badania koncentruje się zasadniczo na kolejnej instancji nowatorskiego modelu sterowania antykruchego w optymalizacji ruchu drogowego.

Rozważamy problem indukowanej antykruchości modelu ruchu drogowego opartego na oscylatorach poprzez stabilizację układu zamkniętego w wykrytych obszarach antykruchości makroskopowych diagramów fundamentalnych. Innymi słowy, projektujemy system, który rozsądnie oblicza czasy sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniach połączonych przestrzennie, tak aby zoptymalizować miary wydajności (np. czas podróży).

Ponieważ projektowanie i budowa takiego układu zamkniętego to „mistrzostwo”, identyfikujemy główne elementy naszego wkładu i wskazujemy naszym czytelnikom najważniejsze zagadnienia, które zostaną omówione w kolejnych sekcjach.

- systematycznie charakteryzujemy zakłócenia w ruchu drogowym w układzie odniesienia czas-przestrzeń-natężenie
- projektujemy odwzorowanie obszarów równowagi ruchu w modelu MFD na kontinuum kruche-odporne-antykruche
- stosujemy model oparty na oscylatorach dla modelu ruchu w sieci drogowej, który uwzględnia zarówno efekty czasowe (np. interakcje obciążenia (przepływu) w dynamice ruchu w warunkach zakłóceń), jak i strukturę przestrzenną (tj. połączone ulice o różnej przepustowości i geometrii)
- formalizujemy problem sterowania w pętli zamkniętej jako stabilizację na modelu MFD i badamy matematyczne podstawy syntezy sterowania antykruchego dla stabilizacji
- projektujemy i wdramy sterownik antykruchy, który jest w stanie obsłużyć niepewność zewnętrzną, wykazując korzyści pętli zamkniętej wynikające ze zmienności i jest mniej wrażliwy na zmienność (tj. miarę skali rozkładu na rysunku 4)
- oceniamy i omawiamy wyniki uzyskane dzięki tej nowej instancji sterowania antykruchego w rzeczywistym ruchu drogowym zbioru danych zawierający 59 dni rzeczywistych danych o ruchu drogowym na 8 skrzyżowaniach w mieście w Chinach

Materiały i metody

Zaczynamy od modelu sieciowego opartego na oscylatorach, dla scenariusza dużego miejskiego ruchu drogowego w Chinach, opartego na pracy Axenie i in. (2021) oraz danych z Axenie (2021) dostępnych pod adresem <https://doi.org/10.5281/zenodo.5025264>.

Ten model dużego ruchu sieciowego będzie używany zarówno w konfiguracjach sterowania w pętli otwartej (bez sterownika ze sprzężeniem zwrotnym), jak i w pętli zamkniętej. Następnie formalnie wprowadzamy realizację antykruchych ram sterowania dla scenariusza ruchu drogowego. Ten formalizm konsoliduje i

rozszerza aparat matematyczny i syntezę sterownika z pracy Axenie i in. (2022) oraz techniki sugerowane przez Taleba i Douady'ego (2013).

Na koniec przedstawiamy formalizm i parametryzację alternatywnych (i istotnych) metod sterowania ruchem drogowym i optymalizacji (tj. sterowania optymalnego (z wykorzystaniem mieszanego liniowego programowania całkowitoliczbowego (MILP)) i sterowania odpornego), aby porównać i zbadać korzyści płynące ze sterowania antykruchego.

Model ruchu drogowego oparty na oscylatorach

Zarówno ruch drogowy, jak i sygnalizacja świetlna charakteryzują się silnym zachowaniem okresowym. W szybkich skalach czasowych okresowość sygnalizacji świetlnej determinuje wahania w przepływie ruchu drogowego, które odzwierciedlają się w dziennych wzorcach okresowych (tj. w wolnych skalach czasowych).

Kontrola antykrucha

Jak ujęto w książce Taleba (2012), antykruchłość to właściwość systemu, która pozwala mu czerpać korzyści z niepewności, losowości i zmienności opisujących jego środowisko operacyjne oraz narażenie systemu na zdarzenia.

Jest to przeciwieństwo kruchości, ale wykracza również poza odporność. Reakcja systemu antykruchego na zaburzenia i stres zazwyczaj wykracza poza odporność, tak że ekspozycja na stresory o małej amplitudzie (wysokiej częstotliwości) może wzmocnić przyszłą reakcję systemu na zdarzenia o dużej amplitudzie poprzez silny komponent antycypacyjny. W przełomowej pracy Taleba i Douady'ego (2013), oprócz matematycznego sformułowania spektrum kruchość – odporność – antykruchłość, Taleb wprowadził taksonomię kruchości.

To punkt wyjścia naszego rozwoju. W oryginalnej klasyfikacji Taleba i Douady'ego (2013) kruchość mogła być lokalna (tj. charakteryzująca model systemu i jego rozkłady parametrów) lub dziedziczona (tj. determinowana przez otoczenie systemu lub sygnały egzogeniczne). Dodatkowo, wykorzystując tzw. „funkcję przejścia”, można odwzorować wrażliwość systemu na stres na krzywą kształtu odpowiedzi (tj. efekt drugiego rzędu).

Celem naszego podejścia teoretycznego sterowania jest „przesunięcie” zachowania systemu z obszarów kruchych lub odpornych widma do obszaru antykruchłości. Innymi słowy, chcemy wywołać antykruchłość! Oczywiście, biorąc pod uwagę inherentne (i niezmiennie) lokalne i odziedziczone kruchości systemu, dążymy do osiągnięcia indukowanej antykruchłości za pomocą odpowiednio dobranego prawa sterowania, które steruje trajektoriami systemu w pożądanym obszarze. W przypadku systemów sterowania, indukowanie takiego zachowania w pętli sterowania ze sprzężeniem zwrotnym stanowi nowatorskie podejście do projektowania i syntezy, pierwotnie wprowadzone przez Axenie i in. (2022).

Główne zasady tego podejścia, a w zasadzie indukowana antykruchłość, to:

(1) zbędna nadkompensacja, która powoduje przekroczenie trajektorii systemu (w sposób kontrolowany), aby zbudować dodatkową pojemność w oczekiwaniu;

(2) zmienność struktury, osiągana poprzez nieciągłe prawo sterowania, które może indukować (wysokoczęstotliwościowe) naprężenia, jednocześnie kierując trajektorią systemu w pożądanym obszarze;

oraz 3) wypukłość odpowiedzi systemu po osiągnięciu pożądanego obszaru pod wpływem prawa sterowania.

Formalizm

W naszym poprzednim badaniu, które położyło podwaliny pod podejście teorii sterowania do indukowanej antykruchości, zaprojektowaliśmy sterowanie w obiektach sterowania geometrycznego i geometrii riemannowskiej, formalnie opisanych przez Lee (2006). Umożliwiło nam to pracę w przestrzeni bez współrzędnych, gdzie polegaliśmy na osadzeniu rozmaitości w większej przestrzeni dynamicznej, co pozwoliło na prostsze definicje praw sterowania, odpowiednie dla rozmaitości z krzywizną (tj. efektami drugiego rzędu). W niniejszym badaniu konsolidujemy te ramy i łagodzimy niektóre założenia, które wcześniej przyjęliśmy.

Wstęp

W naszym matematycznym rozwinięciu badania zawsze będziemy brać pod uwagę najogólniejszą postać układu dynamicznego w Równaniu 1, a mianowicie

$$\dot{\theta}_i = f_i(t, \theta_i, u_i) \quad (2)$$

gdzie wektor stanu θ_i przyjmuje wartości na gładkiej rozmaitości Θ , t to czas,

u_i to prawo sterowania dla oscylatora i ,

a f_i to gładka funkcja nieliniowa.

W naszej początkowej realizacji sterowania antykruchego w Axenie i in. (2022) sformułowaliśmy nasz problem jako problem sterowania śledzącego, w którym wektor odniesienia (tj. pożądany) θ_{id} (tj. pożądana dynamika $\dot{\theta}_i = \dot{\theta}_{id}$) został użyty do obliczenia funkcji błędu (θ_i, θ_{id}) , która następnie została wykorzystana w projekcie sterowania o zmiennej strukturze, jak opisano w Utkin (2013) oraz Slotine i in. (1991).

Dokładniej rzecz ujmując, celem projektu była synteza prawa sterowania u takiego, aby trajektorie układu osiągały i utrzymywały się na rozmaitości σ , innymi słowy $\sigma(t, \theta_i, \theta_{id}) = 0$, dla którego

$$(\theta_i, \theta_{id}) = \theta_i - \theta_{id} \quad (3)$$

$$\sigma(\theta_i, t) = (d/dt + \lambda)(\theta_i, \theta_{id}), \lambda > 0 \quad (4)$$

Zmienność struktury

Przypomnijmy, że naszym celem jest zaprojektowanie rozmaitości przesuwnej, do której muszą należeć trajektorie kontrolowanego układu zamkniętego. Sterowanie z trybem przesuwym, nasz kandydat na praktyczną realizację sterowania antykruchego, stanowi rdzeń układów o zmiennej strukturze, jak pokazano w pracy Utkina (1977). Rozważmy teraz właściwości trybów przesuwnych bardziej szczegółowo.

Po pierwsze, w celu wykrycia antykruchości, poprzez zastosowanie sterowania ślizgowego, trajektorie wektora stanu układu należą do rozmaitości o niższym wymiarze niż cała przestrzeń stanów, dlatego rząd równań różniczkowych opisujących ruchy ślizgowe jest również zmniejszony. Wcześniej wykazaliśmy, że sterowanie ślizgowe pierwszego rzędu może doprowadzić nieliniowe układy zamknięte do obszaru antykruchości ich dynamiki, wykorzystując nieciągłe prawo sterowania (szczegóły w Axenie i in. (2022)), wykorzystując redundantną nadkompensację i prawo sterowania wysokoczęstotliwościowego. W niniejszej pracy rozszerzamy tę ideę na tryby ślizgowe drugiego rzędu i wpływ krzywizny rozmaitości ślizgowej na ruch układu zamkniętego.

Po drugie, w większości praktycznych układów ruch ślizgowy jest niezależny od sterowania i jest determinowany jedynie przez właściwości układu sterowania oraz położenie (lub równania) powierzchni nieciągłości. Umożliwia to układowi zamkniętemu w ruchu ślizgowym osiągnięcie zachowania antykruchości. Co więcej, problem początkowy można rozdzielić na oddzielne podproblemy niższego wymiaru, w których sterowanie jest „wydane” po prostu na skonstruowanie trybu ślizgowego, a wymagany charakter ruchu na przecięciu rozmaitości nieciągłości jest określony przez akceptowalny wybór ich równań.

W syntezie sterowania antykruchego rozważamy tryby ślizgowe wyższego rzędu, aby uzyskać płynniejszą dynamikę w pobliżu rozmaitości ślizgowej. Zakłada się, że jeśli rząd jest wyższy, zazwyczaj tworzone jest dodatkowe ograniczenie, liniowa kombinacja pierwotnego ograniczenia (tj. rozmaitości ślizgowej) i jego kolejnych całkowitych pochodnych czasowych, jak wykazano w pracy Levanta (2005).

Eksperymenty i wyniki

Oceniane systemy sterowania to:

- BASELINE – zoptymalizowane statyczne planowanie ruchu, które wykorzystuje wstępnie zapisane plany czasowe obliczone offline na podstawie danych historycznych w świecie rzeczywistym.
- OPTIMAL – optymalna metoda sterowania oparta na implementacji optymalizacji planu fazowego MILP inspirowana pracami Ouyang i in. (2020).
- ROBUST – podstawowa implementacja odpornego sterowania oparta na sieci oscylatorów Kuramoto (Strogatz (2000)) dla każdego kierunku w sieci drogowej, inspirowana pracami Agrawal i in. (1998) oraz Owena i Zamesa (2020).
- ANTIFRAGILE – sterowanie antykruche z regularyzującym prawem sterowania ślizgowego u.

Dyskusja

Tradycyjnie optymalizacja czasu trwania fazy dla skoordynowanej sygnalizacji świetlnej opiera się na średnim czasie przejazdu między skrzyżowaniami i średnim natężeniu ruchu na każdym skrzyżowaniu. Przedstawiamy teraz główne wnioski z badania oraz nową instancję sterowania antykruchego.

4.1. Modelowanie

Nasze badanie wprowadza nową instancję sterowania antykruchego dla nowego modelu optymalizacji czasu trwania fazy ruchu drogowego, mającego zastosowanie do dowolnego układu, skali i architektury ruchu drogowego (tj. liczby pasów ruchu w każdym kierunku itp.). Dokładniej rzecz ujmując, wykorzystując oparty na oscylatorach model Strogatz (2000) dynamiki przepływu ruchu w dużych sieciach dróg z sygnalizacją świetlną, proponowany system sterowania w pętli zamkniętej wykorzystuje okresową naturę cyklicznego fazowania sygnalizacji świetlnej, podobnie jak Akbas i Ergun (2005); Fang i in. (2013).

Nasza instancja sterowania antykruchego wykracza poza optymalne i odporne podejścia sterowania, uwzględniając ważne zaburzenie zewnętrzne (np. wagę odniesienia czasu cyklu F), modulację przepływu k oraz wagę topologii przestrzennej A , które są regularyzowane przez prawo sterowania o trybie ślizgowym u .

Takie podejście do modelowania i sterowania dostosowuje się do nieprzewidywalnych zakłóceń w przepływach ruchu (np. wypadków, zmian tras, niekorzystnych warunków pogodowych) do pewnego stopnia, w którym dynamika zakłócenia nie zakłóca samoorganizacji sprzężonych oscylatorów w ramach dynamiki ślizgowej pętli zamkniętej, biorąc pod uwagę prawo sterowania.

4.2. Sterowanie antykruche

W rzeczywistości „stromie pochodne” przepływów ruchu nie pozwalają optymalnemu i odpornemu sterowaniu na osiągnięcie najlepszej wartości czasu trwania fazy. Aby osiągnąć wysoką wydajność (tj. minimalizując metryki, takie jak strata czasu lub maksymalizując średnią prędkość), zsyntetyzowaliśmy sterownik antykruchy dla modelu sieci oscylatorów. Taki sterownik „popycha” zaburzoną dynamikę pod wpływem zakłóceń w kierunku dynamiki, która „napędza” sieć sprzężonych oscylatorów w kierunku fazy optymalnej. W ten sposób system sterowania ANTIFRAGILE jest w stanie rozwiązywać lokalne i globalne problemy z dynamiką ruchu, wykorzystując sprzężenie między różnymi oscylatorami opisującymi okresowość ruchu pod wpływem zakłóceń. Zaproponowany przez Ouyang i in. (2020) optymalny system sterowania – nazywany w naszych eksperymentach OPTIMAL – wykorzystywał dokładne techniki programowania matematycznego (tj. mieszane programowanie liniowe całkowitoliczbowe) do optymalizacji sterowania sygnalizacją świetlną i wykazał jedynie ograniczone możliwości adaptacyjne. Jak pokazuje nasza ocena, OPTIMAL dobrze sobie radzi, na przykład minimalizując długość trasy, ale wiąże się z dużym kosztem obliczeniowym ze względu na proces optymalizacji, który wymaga iteracji w celu uzyskania zbieżności.

Wreszcie widzimy, że sterowanie ANTIFRAGILE wyróżnia się zarówno pod względem metryk prędkości, jak i strat czasu, co obrazuje fakt, że wybór prawa sterowania opartego na efektach drugiego rzędu rekomputacji sygnału może uchwycić taką dynamikę systemu zamkniętej pętli. Ponadto wyniki wyraźnie wskazują na przewagę sterowania ANTIFRAGILE nad ROBUST i OPTIMAL pod względem parametrów przejściowych i błędu stanu ustalonego. W naszych eksperymentach zaobserwowaliśmy, że sterowanie OPTIMAL starało się optymalizować metryki wydajności w danym przedziale czasowym, ale było bardzo wrażliwe na parametry modelu sieciowego opartego na oscylatorach, podczas gdy sterowanie ROBUST starało się optymalizować stabilność i jakość odpowiedzi przy umiarkowanym poziomie niepewności (tj. zakłóceniach) w modelu opartym na oscylatorach. Sterowanie ANTIFRAGILE wykorzystuje sterowanie zmienną strukturą do obsługi zarówno niepewności strukturalnej, jak i niestrukturalnej w modelu poprzez syntezę sterowania uwzględniającego efekty drugiego rzędu, przesuującego system do pożądanego obszaru antykruchości w przestrzeni stanów.

Wniosek

Sterowanie ruchem drogowym to wielowymiarowy problem, który należy optymalizować w warunkach głębokiej niepewności. Modelowanie dynamiki ruchu ma fundamentalne znaczenie dla sterowania ruchem drogowym. Dążąc do uchwycenia okresowej natury ruchu, proponujemy instancję sterowania antykruchego dla modelu miejskiego ruchu drogowego, wykorzystując sieć oscylatorów rejestrujących interakcje przestrzenne i czasowe między różnymi punktami w sieci drogowej.

Aby adaptacyjnie radzić sobie z nieoczekiwanymi zakłóceniami w przepływie ruchu, sterowanie antykruche wykorzystuje kontroler drugiego rzędu o trybie ślizgowym, który wzmacnia swoje zdolności adaptacyjne w kierunku globalnego konsensusu w warunkach zakłóceń o dużej skali i niepewności. System jest lekki i wykorzystuje interakcje sprzężeń między różnymi sterowanymi oscylatorami. Nasza ocena systemu w oparciu o dane rzeczywiste i najnowocześniejsze metody pokazuje zalety sterowania antykruchego.

Od rejestrowania okresowej dynamiki fazowania ruchu, przez osadzanie korelacji przestrzennej między przepływem ruchu w jego wymiarach czasowych, aż po solidną adaptację do nieoczekiwanych zakłóceń w ruchu, sterowanie antykruche wyróżnia się jako elastyczne rozwiązanie do obliczania czasu trwania fazy czasu „zielonego”. Wierzymy, że sterowanie antykruche jest silnym kandydatem do wdrożenia w rzeczywistych warunkach.