

Antykruche systemy sterowania: Przypadek śledzenia trajektorii robotów mobilnych w warunkach niepewności i zmienności

By kama3 kama3
paź 8, 2025

Streszczenie

Proponujemy nowe ramy projektowania sterowania oparte na zasadach antykruchości. W niniejszej pracy przedstawiamy formalną koncepcję sterowania antykruchego i przedstawiamy procedury projektowania w celu stworzenia antykruchego kontrolera śledzącego trajektorię robota mobilnego.

[Read more](#)

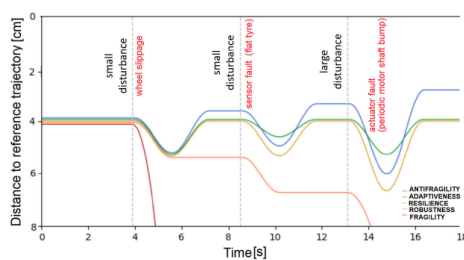


FIGURE 1. Fragility-robustness-antifragility spectrum in robot trajectory tracking. Existing approaches can compensate for an increase in amplitude and timing (i.e., uncertainty and volatility) of the disturbance of the system, while antifragile control aims at gaining from these adverse events.

WIDMO KRUCHOŚCI-WYTRZYMAŁOŚCI-ANTYKRUCHOŚCI W STEROWANIU ROBOTAMI

Antykruchość, zgodnie z definicją w [4] i [5], to cecha systemu, która pozwala mu czerpać korzyści z niepewności, nieprzewidywalności i zmienności, w przeciwieństwie do kruchości. Reakcja systemu antykruchego na zaburzenia zewnętrzne lub błędy wewnętrzne jest ponadprzeciętnie odporna i odporna, tak że niewielkie obciążenia

mogą zwiększyć przyszłą reakcję systemu poprzez dodanie znaczącego komponentu antycypacyjnego (patrz rys. 1).

Aby zapewnić intuicyjne zrozumienie ram kontroli antykruchości, przedstawiamy spektrum kruchości-odporności-antykruchości

na Rys. 1. Jest to podstawowa reprezentacja sposobu działania różnych typów sterowników w obliczu rosnącego poziomu niepewności, np. usterek czujników i siłowników, np. poślizgu kół, usterki siłownika lub czujnika.

Należy pamiętać, że jest to efekt teoretyczny, zaprojektowany ze względów ilustracyjnych. Głównym celem naszej pracy jest osiągnięcie antykruchej wydajności sterowania w zamkniętej pętli, która nie tylko zyskuje na nieprzewidywanym, coraz silniejszym działaniu defektów, ale także przyzwyczaja się do nich. Istotną uwagą jest to, że w niniejszym badaniu rozszerzamy wewnętrzną i dziedziczną heurystykę wykrywania kruchości-odporności-antykruchości z [5] poprzez nowego typu, zwanego **indukowaną antykruchością**. Nasze badanie proponuje realizację antykruchości poprzez zaprojektowanie zamkniętego układu sterowania, który kompensuje **niepewność (tj. amplitudę defektu) i zmienność (tj. początek i czas trwania defektu)** podczas śledzenia trajektorii.

Typowe kontrolery dążą do przywrócenia pożądanego zachowania robota poprzez „tłumienie” niepewności (tj. sterowanie odporne), jej modelowanie (tj. sterowanie adaptacyjne) lub przewidywanie (tj. sterowanie odporne). Natomiast nasz kontroler antykruchy zwiększa wydajność (tj. minimalny błąd śledzenia) poprzez przewidywanie. **Trzy kluczowe komponenty projektu** – wyjaśnione w kolejnych sekcjach – pomagają to osiągnąć.

1) PRELIMINARIES

Let us consider the dynamical system associated with the mobile robot, assumed to be fully observable and controllable, in the form

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, d_x) \\ z = g(x, u, d_z), \end{cases} \quad (4)$$

where $x \in \mathbb{R}^n$ is the state, $u \in \mathbb{R}^p$ is the input, $z \in \mathbb{R}^m$ is the output, $d_x \in \mathbb{R}^n$ and $d_z \in \mathbb{R}^m$ are faults acting on the state and output of the system, respectively. Considering system (4), we can reformulate the definition of antifragility given in [5].

Definition 1 (Local Antifragility): The system (4) is locally antifragile iff $\forall x(t_0) \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$, for $u = 0$, $d_x \in \mathcal{D}_x \subset \mathbb{R}^n$, and $d_z \in \mathcal{D}_z \subset \mathbb{R}^m$, the error $z - y_d = g(x, 0, d_z) - y_d$, where $y_d \in \mathbb{R}^m$ is the desired output, is a convex function.

Definition 2 (Global Antifragility): The system (4) is globally antifragile iff $\forall x(t_0) \in \mathbb{R}^n$, for $u = 0$, $d_x \in \mathcal{D}_x \subset \mathbb{R}^n$, and $d_z \in \mathcal{D}_z \subset \mathbb{R}^m$, the error $z - y_d = g(x, 0, d_z) - y_d$, where $y_d \in \mathbb{R}^m$ is the desired output, is a convex function. Consequently, fragility is defined as the “opposite” of antifragility, i.e.,

Definition 3 (Fragility): The system (4) is fragile iff $\exists x(t_0) \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$ such that, for $u = 0$, $d_x \in \mathcal{D}_x \subset \mathbb{R}^n$, and $d_z \in \mathcal{D}_z \subset \mathbb{R}^m$, the error $z - y_d = g(x, 0, d_z) - y_d$, where $y_d \in \mathbb{R}^m$ is the desired output, is a concave function.

An uncontrolled dynamics ($u = 0$) can be fragile in nature, but it is possible to induce an antifragile behaviour through control.

CZYNNOŚCI WSTĘPNE

Rozważmy układ dynamiczny związany z robotem mobilnym, zakładany jako w pełni obserwowalny i sterowalny, w postaci m to błędy działające odpowiednio na stan i wyjście układu. Rozważając układ (4), możemy przeformułować definicję antykruchości podaną w [5]. Definicja 1 (Antykruchosc lokalna): Układ (4) jest lokalnie antykruchy wtedy i tylko wtedy, gdy $x(t_0) \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$ jest pożądanym wyjściem, jest funkcją wypukłą.

Definicja 2 (Antykruchosc globalna): Układ (4) jest globalnie antykruchy wtedy i tylko wtedy, gdy $x(t_0) \in \mathbb{R}^n$ jest pożądanym wynikiem i jest funkcją wypukłą. W związku z tym kruchosc definiuje się jako „przeciwnieństwo” antykruchosci, tj.

Definicja 3 (Krucosc): System (4) jest kruchy wtedy i tylko wtedy, gdy m jest pożądanym wynikiem i jest funkcją wklęską.

Niekontrolowana dynamika ($u = 0$) może być krucha z natury,

ale możliwe jest wywołanie antykruchego zachowania poprzez kontrolę.

Wytworzenie antykruchego zachowania w pętli sprzężenia zwrotnego (indukowana antykruchosc)

wymaga unikalnej metody projektowania i syntezy, w której:

- 1) zbędna nadmierna kompensacja może spowodować, że system przejdzie w tryb przeregulowania, w którym gromadzi się dodatkowa pojemność i możliwości w oczekiwaniu na rozwój;
- 2) zmienność struktury może wywołać czynniki stresogenne niosące ze sobą wewnętrzne informacje, które ujawniają się jedynie w warunkach zmienności i nieprzewidywalności dynamiki systemu, na którą wpływa zastosowanie składnika o wysokiej częstotliwości;
- 3) skale czasowe rozdzielania dynamiki oddziałującego systemu ulegają redukcji porządku, zmierzając w kierunku pożądaney antykruchosci region operacyjny.

Poniższe sekcje poświęcone są integracji powyższej metodologii z problemem śledzenia trajektorii robota.

SYNTEZA KONTROLI

Prace [6] i [7] stanowiły próbę ujęcia projektu sterowania w ramy sterowania geometrycznego i geometrii riemannowskiej. Umożliwiło to nam działanie w środowisku bez współrzędnych, bazując na osadzeniu rozmaitości **w rozszerzonej przestrzeni dynamicznej**, co pozwoliło na skonstruowanie praw sterowania, które były prostsze i odpowiednie dla rozmaitości z krzywizną. W niniejszej pracy przedstawiono konkretną metodę syntezy sterowania, konsolidując tę metodologię i redukując szereg wcześniejszych założeń.

Innymi słowy, aby sterować ewolucją stanu układu zamkniętego do rozmaitości, tak aby wzdłużny x_e , błąd poprzeczny y_e i błąd kątowy φ_e były wewnętrznie wzajemnie sprzężone, prowadząc do zbieżności wszystkich trzech zmiennych, w naszej syntezy sterowania rozdzielamy dwie pętle sterowania wewnętrznego na rys. 3

(patrz ciemno zacieniowane pola oznaczone jako Sterowanie antykruche i Sterowanie PID), aby opisać konkretne kroki projektowania: 1) redundantną nadkompensację; 2) zmienność struktury; oraz 3) separację skal czasowych w celu izolacji niepewności.

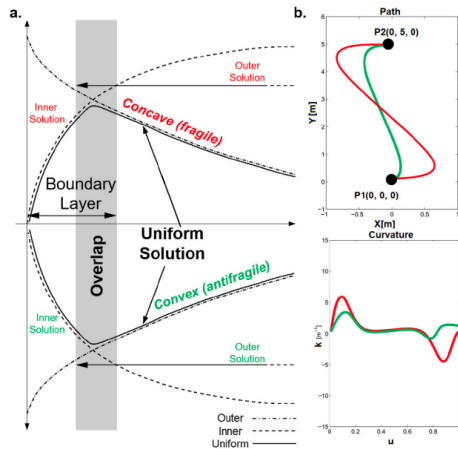


FIGURE 4. Singular perturbation for time scale separation in antifragile controller synthesis. Using boundary layers and matched asymptotic expansions to probe antifragile behaviour. a) Generic depiction of a boundary layer and the types of solutions in singularly perturbed dynamic systems. b) Mapping the boundary layers and shape (convexity/concavity) of the solution to robot velocity planning akin to the desired dynamics to track in the presence of uncertainty.

ROZDZIELENIE SKALI CZASU

Biorąc pod uwagę interakcje między dwiema zagnieżdżonymi pętlami sterowania przedstawionymi na rys. 3, aby poradzić sobie z niepewnością i zjawiskami o wysokiej częstotliwości, układ pętli zamkniętej rozdziela skale czasowe pętli. Bardzo użytecznym narzędziem takich interwencji jest teoria zaburzeń (singularnych) [28]. Dynamika o wysokiej częstotliwości jest rozważana w tym paradygmacie poprzez uwzględnienie jej na innej osi czasu.

Podobnie jak równoległa mapa transportu na rozmaitości riemannowskiej trajektorii stanu układu, transformacja ta jest realizowana poprzez dynamiczną zmianę kolejności kontrolowanego układu jako zaburzenie parametrów. Taka zmiana dynamiki kontrolowanego układu jest bardziej „nagła” niż zaburzenie normalne, na które narażony jest układ – stąd zaburzenie osobliwe.

Głównym argumentem przemawiającym za zastosowaniem takiego podejścia w naszym projekcie sterowania antykruche jest fakt, że tego typu zjawiska o wysokiej częstotliwości pozwalają na budowanie zdolności reagowania na zmiany o dużej amplitudzie w działaniu robota (np. poślizg kół, przebicie opony i wygięcie wału). Podstawową ideą separacji skali czasu jest uchwycenie dominującej dynamiki zjawisk, a następnie uchwycenie czynników stresogennych, co zwykle osiąga się poprzez rozszerzenia serii „zewnętrznych” lub rozszerzenia warstwy granicznej „wewnętrznej” [28], jak pokazano na rys. 4.

Dokładniej, rozważając układy dynamiczne o osobliwym zaburzeniu, możemy skorzystać z rozwiązań z szybkimi strefami wariacyjnymi. Obszary te, widoczne w rozwiązaniu lub jego pochodnych, nazywane są warstwami i często występują w pobliżu granicy domeny (patrz rys. 4). Rozwiązania wewnętrzne znajdują się dla warstw, natomiast rozwiązania zewnętrzne – dla regularnych, wyróżnionych granic. Rozwiązanie jednorodne jest opisane przez krzywiznę (tj. efekt drugiego rzędu) obszaru nakładania się warstwy wewnętrznej i zewnętrznej.

Co ciekawe, można to wykorzystać w naszym projekcie do zdefiniowania kruchych i antykruchych reżimów sterowania (definicje od 1 do 4), w zależności od krzywizny w obszarze nakładania się rozwiązań (tj. atraktorów /rozwiązań w przestrzeni stanów). Zgodnie z definicją 4, obszar antykruchy to obszar wypukły krzywej rozwiązania (patrz rys. 4a). Zatem odpowiedź układu zamkniętego jest antykrucha, jeśli krzywizna jest ujemna, w przeciwnym razie jest krucha.

wygeneruje dwie możliwe ścieżki: kruchą (czerwoną) i antykruchą zieloną (tj. antykruche sygnały sterujące do śledzenia, jeśli krzywizna jest ujemna,

W przeciwnym razie kruche. Zarówno kruche (czerwone), jak i antykruche (zielone) są wykonalnymi rozwiązaniami. Rozwiązanie antykruche ograniczy krzywiznę i, pośrednio, wielkość sygnału sterującego $v(t)$ i $w(t)$. Zmniejsza to obciążenie siłowników robota i zapewnia większą odporność w przypadku niepewności, przy jednoczesnym zachowaniu komfortu. Krucha ścieżka i krzywizna będą charakteryzować się wyraźniejszą zmiennością krzywizny odpowiednio na początku i na końcu linii krzywej, co może zmniejszyć odporność w przypadku poślizgu kół lub uszkodzenia mechanicznego podczas nawigacji.

NADMIERNE REKOMPENSATY

W dalszej części powracamy do głównej idei rozdzielenia skali czasu, przedstawionej graficznie na rys. 4. Rozważmy bardziej ogólną formę modelu robota w równaniu (1), gdzie f , g są ciągłymi różniczkowalnymi funkcjami x , z , ε , t .

Skalar $\varepsilon > 0$ kwantyfikuje wszystkie małe parametry systemu (tj. l_m , l_w itd.), które w ramach sterowania antykruchej określane są jako czynniki stresujące dla budowania zdolności. Ponadto, biorąc pod uwagę dwie małe stałe czasowe T_1 i T_2 , możemy założyć, że $T_1 = \varepsilon$ i $T_2 = \alpha\varepsilon$, gdzie $\alpha = T_2/T_1$ jest znaną stałą. Teraz, jeśli ustawimy $\varepsilon = 0$ w równaniu (6), wymiar przestrzeni stanów systemu zmniejsza się z $n+m$ do n , ponieważ drugie równanie degeneruje się do $0 = g(x, z, 0, t)$, gdzie z może szybko zbiegać do pierwiastka z_g ze względu na swoją prędkość $\dot{z} = g/\varepsilon$, co może być wysokie, jeśli ε jest małe.

Z bardziej intuicyjnej perspektywy, model w (6) jest techniką modelowania zredukowanego rzędu, która pozwala nam przekształcić uproszczenie (redukcję) dynamiki robota w zaburzenie parametrów, zwane „osobliwym”. Rozwiązania „wolnej” dynamiki $x(t, \varepsilon)$ i „szybkiej” dynamiki $z(t, \varepsilon)$ osobliwie zaburzonego układu w (6) składają się z szybkiej warstwy granicznej i wolnego stanu quasi-stacjonarnego, jak pokazano na rys. 4. Z perspektywy geometrii riemannowskiej sterowania antykruchej istnieje rozmierność M_ε zależna od ε , którą można zdefiniować w przestrzeni $n + m \times i$ z taką, że $M_\varepsilon : z = \varphi(x, \varepsilon)$. Zmniejsza to wymiar przestrzeni stanów, ograniczając ją do pozostania na M_ε . Teraz wprowadzono jawną koncepcję i implementację redundantnej nadkompensacji i separacji skali czasowej. W tym celu dla każdego silnika prądu stałego wykorzystujemy regulator proporcjonalno-różniczkująco-całkujący (PID), aby uzyskać redundantną nadkompensację.

Następnie problem sformułowano w dziedzinie Laplace'a z częstotliwością zespoloną s , aby skoncentrować się na projekcie osobliwego zaburzenia. Później wrócimy do dziedziny czasu, aby opisać rzeczywistą separację skali czasowej. Funkcja przejścia regulatora PID wynosi $u(s)/e(s) = K_p(1 + K_D s + K_I \frac{1}{s})$, gdzie błąd $e(s) = w(s) - y(s)$.

Ponadto rozważamy model silnika prądu stałego z [9], gdzie w praktyce L jest małe i może służyć jako nasz parametr ε . Odpowiada to naszemu ogólnemu sformułowaniu w (6), jeśli $\omega = x$, $i = z$ i $R = 0$. Redukcję modelu rozwiązuje się poprzez zignorowanie indukcyjności L i rozwiązanie równania $-k\omega - R i + u = 0$ w celu uzyskania wartości prądu $i = u - k\omega$

R , którego następnie używamy do uzyskania modelu pierwszego rzędu silnika prądu stałego w postaci $J\dot{\omega} = -k R \omega + k R u$.

Pozwala to na znalezienie rozmierności M_ε i ograniczenie dynamiki silnika prądu stałego, aby pozostała na niej. W naszym projekcie celem jest wyrażenie efektu całkowania regulatora PID, który jest znacznie wolniejszy niż składowe proporcjonalna i różniczkująca. Zaburzenie osobliwe

Teoria wspiera nas w zadaniu przepisania prawa sterowania u , biorąc pod uwagę fakt, że K_P i K_D zapewniają odpowiednio szybkość i stabilność układu, podczas gdy K_I redukuje błąd e do zera.

Szybkie zmienne zwiększają zdolność reakcji antykruchej na niepewne zdarzenia w działaniu robota, takie jak poślizg kół, przebicie opony czy wygięcie wału siłownika silnika prądu stałego.

Dokładniej rzecz ujmując, wybór k_1 i k_2 musi zostać dokonany w taki sposób, aby w części PD sterownika silnika macierz układu była macierzą Hurwitza.

ZMIENNOŚĆ STRUKTURY

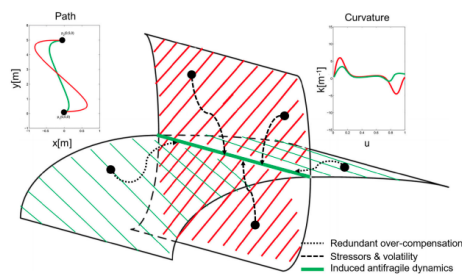


FIGURE 5. VSC through sliding modes in antifragile control synthesis with fragile (red) and antifragile (green) control signals and dynamics. The antifragile control manages to drive the system's dynamics toward the antifragile region benefiting from redundant overcompensation, stressors, and volatility.

Sterowanie Zmienną Strukturą (VSC) oferuje bardzo skuteczne narzędzie do radzenia sobie z niepewnością w pętli zamkniętej [29], zapewniając silną reakcję na minimalne odchylenia od wybranego ograniczenia. Zazwyczaj VSC jest praktycznie implementowane poprzez sterowanie w trybie ślizgowym [29].

W naszym modelu VSC jest związane z redundantną nadkompensacją, jak pokazano na rys. 4 i 5. Sterownik antykruchy musi dostarczać odpowiedni sygnał sterujący (tj. parę (v, ω)), tak aby

ścieżka od punktu początkowego do docelowego (patrz rys. 5) była śledzona w warunkach ograniczeń czasowych, niepewności co do powierzchni napędowej, awarii siłowników i przy zwiększonym komforcie (tj. minimalnej krzywiznie). Aby poradzić sobie z niepewnością co do powierzchni napędowej i awarii siłowników, osiąga się to poprzez odpowiednią syntezę prawa sterowania (patrz warunki początkowe dynamiki systemu zbiegającej się z zielonej rozmaitości do indukowanej dynamiki antykruchej z rys. 5).

Zaczynając od kruchego obszaru rozwiązań systemu (czerwona rozmaitość na rys. 5), kontroler radzi sobie ze stresorami i zmiennością (tj. zwiększa krzywiznę trajektorii, a następnie podąża za pożądanym torem), wykorzystując dostarczoną „bezwładność”, aby zbiec do indukowanej dynamiki antykruchej.

Aby osiągnąć taką dynamikę przy indukowanej kontroli antykruchej, poniższy podrozdział omawia odpowiednie kroki projektowania VSC dotyczące naszego problemu.

ADAPTACYJNA KONTROLA COFAJĄCEGO SIĘ HORYZONTU

Aby podejść do adaptacyjnego sterowania z oddalaniem się horyzontu, rozważyliśmy sterowanie predykcyjne (MPC) jako odpowiedniego kandydata ze względu na jego możliwości predykcyjne, które dobrze kontrastują z możliwościami antycypacyjnymi kontrolera antykruchej. Dokładniej rzecz biorąc, nasz projekt opiera się na projekcie kontrolera z [25].

Proponowany kontroler wykorzystuje model dynamiczny robota jako model kontrolera, co zwiększa dokładność śledzenia, jednocześnie uwzględniając dynamiczną stabilność robota podczas procedury śledzenia. Dodatkowo, poprzez adaptacyjne podniesienie wagi funkcji kosztu, rozwiązuje się problem komfortu jazdy spowodowany użyciem typowego kontrolera MPC, gdy pojazd zbacza z zamierzonego toru.

WYTRZYMAŁA KONTROLA

Wreszcie, w celu przedstawienia odpornego projektu sterownika, rozważany jest sterownik z logiką rozmytą, ponieważ zapewnia on efektywne podejście do aproksymacji dowolnej gładkiej dynamiki nieliniowej w postaci reguł JEŻELI-TO. Konkretna implementacja w naszych eksperymentach opiera się na pracach [26].

W niniejszym badaniu zaproponowano metodę śledzenia trajektorii, która imituje zachowanie człowieka podczas jazdy, wykorzystując zestaw reguł logiki rozmytej. Szacunkowe informacje o następnym zakręcie przed robotem są przesyłane do systemu rozmytego, a odpowiadającym im wyjściem jest prędkość

przelotowa wymagana, aby robot bezpiecznie podążał ścieżką w wyznaczonym czasie. Sterownik z logiką rozmytą jest określany jako RESILIENT w naszych badaniach, w których opracowano 4-regułowy system wnioskowania rozmytego Takagi-Sugeno-Kang.

Kontrola robota antykruchego GitLab

Aby ocenić strategie sterowania i zademonstrować korzyści płynące z zastosowania konstrukcji antykruchej, opracowaliśmy systematyczne ramy analizy i oceny, które:

- 1) generują trajektorie odniesienia dla sterowania robotem w pętli zamkniętej,
- 2) wspierają wprowadzanie niepewności zdefiniowanej przez użytkownika, np. poślizgu kół, awarii siłownika lub awarii czujnika,
- 3) wspierają parametryzację (tj. czas trwania, amplitudę, częstotliwość) niepewności zdefiniowanej przez użytkownika,
- 4) porównują wydajność w przypadku wprowadzenia różnych typów niepewności i/lub usterek.

Rozważane regulatory są sparametryzowane w następujący sposób:

- Sterowanie ROBUST: oddzielone powierzchnie x_e i φ_e w projekcie z trybem ślizgowym; parametryzacja sterowania PID;
- Sterowanie ADAPTIVE: MPC z funkcją kosztu opartą na błędzie położenia poprzecznego y_e i błędzie kursu φ_e ;
- Sterowanie RESILIENT: regulator 2-wejściowy (d_e i $|\varphi_e|$), 2-wyjściowy (v_l , v_r); 4 reguły IF-THEN;
- Sterowanie ANTYKRUCHE: łączone błędy x_e , y_e i rozdzielone powierzchnie φ_e w projekcie komponentów o zmiennej strukturze; sterowanie PID z osobliwym zaburzeniem.

Wszystkie eksperymenty, analizy i dodatkowe eksperymenty nieomówione w tym artykule można odtworzyć za pośrednictwem bazy kodu dostępnej na GitHubie.

USTERKI I NIEPEWNOŚĆ UKŁADU WTRYSKU

System wstrzykiwania błędów i niepewności opiera się na pracach [22]. Zasadniczo, oszacowanie stanu robota w obecności niepewności i błędów jest uzyskiwane poprzez uwzględnienie zmieniającej się dynamiki robota w zależności od rodzaju niepewności i błędu. Osiąga się to poprzez modelowanie niepewności i błędów za pomocą zestawu filtrów Kalmana.

Innymi słowy, wykorzystujemy zdolność filtru Kalmana do minimalizacji kowariancji szacowanego błędu w określonych warunkach, implementując w ten sposób optymalny estymator za pomocą szeregu równań predykcji i korekcji. Mówiąc dokładniej, w naszych testach każdy filtr Kalmana odzwierciedla model kinematyczny robota, ale z odrębnym zestawem parametrów (tj. reprezentujących różne typy defektów lub niepewności).

Główną ideą tego frameworka jest to, że dla tego samego wektora wejściowego (z szumem) każdy filtr oblicza predykcję wektora stanu robota. Każdy filtr jest powiązany z pewną formą niepewności lub błędu.

W związku z tym bierzemy pod uwagę

- 1) filtr nominalny, który odpowiada bezbłędemu działaniu robota;

2) filtr, który ma ten sam model kinematyczny robota, ale zmodyfikowane parametry, aby podkreślić błąd przebiecia prawej opony (tj. promień prawego koła ma stopniowo mniejszą wartość);

3) filtr, który modeluje i przewiduje dynamikę błędu przebiecia lewej opony;

4) filtr, który modeluje i przewiduje ugięcia wału siłownika prawego koła; oraz

5) filtr, który modeluje i przewiduje ugięcia wału siłownika lewego koła napędowego robota.

Oprócz oszacowania stanu, każdy filtr generuje oszacowanie wektora pomiarowego na etapie przewidywania, które jest wykorzystywane na etapie korekcji filtra.

OCENA

W celu oceny czterech podejść do sterowania śledzeniem trajektorii robota, sparametryzowaliśmy opisany powyżej system wprowadzania błędów i niepewności dla 4 typów błędów układu zamkniętego, a mianowicie: 2 błędów czujników (np. obserwowanie ciągłego zmniejszania się promienia koła podczas pracy, podobnego do przebitej opony) i 2 błędów siłowników (np. okresowy mimośrodowy ruch mechaniczny wału silnika prądu stałego, podobny do uderzenia koła).

Błędy są sparametryzowane amplitudowo i czasowo, zakładając zasadniczo progresywną zmianę promienia koła w określonym czasie lub stały przyrost amplitudy promienia koła w okresowych odstępach czasu. Taka parametryzacja jest możliwa dzięki podejściu banku filtrów Kalmana opracowanemu przez [22].

Dokładniej rzecz ujmując, parametryzacja błędów dla trajektorii na rys. 7 i analizy na rys. 9 przedstawia się następująco: amplituda uderzenia wału silnika prądu stałego wynosi 1,5 cm i występuje okresowo, począwszy od czasu $t_{injection} = 20$ s śledzenia trajektorii (tj. po pierwszej połowie pętli na panelach a, b, c, d); w przypadku przebitej opony promień koła zmniejsza się z czasem z $r_{flat_free} = 30$ cm do $r_{flat_tire} = 26$ cm, począwszy od czasu $t_{injection} = 20$ s.

Intuicyjnie, wpływ każdego rodzaju błędu na sterowanie śledzeniem trajektorii w układzie zamkniętym jest inny i zależy od jego wpływu na kinematykę i dynamikę robota. Przeanalizowaliśmy wpływ każdego z 4 rodzajów błędów na rys. 9, biorąc pod uwagę wpływ na prosty schemat sterowania bazowego (tj. bez żadnej adaptacji). Wybór ten wynika z faktu, że chcemy zrozumieć, jak każdy z błędów przekłada się na zachowanie robota bez możliwości adaptacji.

Jak widać, sterowanie ANTYKRUCHE dominuje w sterowaniu położeniem robota w warunkach niepewności, tuż za nim plasują się strategie sterowania ROBUST i ADAPTIVE, a na końcu sterowanie RESILIENT. Co ciekawe, sterowanie ANTYKRUCHE zajmuje dopiero trzecie miejsce, jeśli chodzi o sterowanie kierunkiem ruchu robota, gdzie sterowanie ROBUST i RESILIENT przodują dzięki wyraźnemu oddzieleniu kierunku ruchu od pozycjonowania kartezjańskiego w projekcie prawa sterowania. Istnieją również bardziej subtelne aspekty, które omówimy w następnej sekcji.

Antifragile Robot Control GitLab

ROZDZIELENIE SKALI CZASU

Silnym elementem syntezy sterowania ANTFRAGILE jest element separacji skali czasu, odpowiedzialny za odporność sterowania aktuatorów niskiego poziomu. Wykorzystując osobliwą teorię zaburzeń,

zaimplementowaliśmy separację skali czasu w regulatorze ANTFRAGILE w oparciu o analizę kształtów dynamicznych warstw granicznych (patrz rys. 4) oraz kształt zadanych wielkości ścieżki i krzywizny, podanych jako odniesienie dla aktuatorów.

Co ciekawe, udało nam się uzyskać separację reżimów sterowania w systemach antykruchych i kruchych wyłącznie na podstawie krzywizny jednorodnego kształtu rozwiązania układu zamkniętego, określonego wzorem 5. Ta separacja jest następnie wykorzystywana do obliczania sygnału sterującego aktuatora (tj. $v(t)$ i $w(t)$), który przyjmuje postać dynamiki „szybkiej” lub „wolnej”. Podobne, a przynajmniej porównywalne zachowanie, osiągnięto w projekcie ROBUST poprzez sterowanie o zmiennej strukturze. Dokładniej rzecz ujmując, projekt regulatora niższego rzędu wykorzystujący sterowanie równoważne (patrz 19) uwzględnia technikę zredukowanego rzędu analogiczną do efektu, jaki oferuje zaburzenie osobliwe.

Sterowanie ADAPTIVE próbuje dokonać separacji skali czasowej poprzez wybór wieloskalowej funkcji kosztu z członami regularyzującymi dla każdej wielkości skali czasowej (patrz 20). Jest to szczególnie widoczne w rozważanej przez nas instancji MPC, gdzie horyzont predykcji można ważyć oddzielnie dla dynamiki „szybkiej” i „wolnej”. Wreszcie, sterowanie RESILIENT może, w zasadzie, jawnie wywołać taką separację skali czasowej. W naszym przypadku można to osiągnąć za pomocą reguł wnioskowania rozmytego, które uwzględniają kowariancję pierwszej pochodnej członów błędu i tempo ich zmian w równaniu (21). Separacja skali czasowej jest elementem projektu, który określa sterowanie siłownikiem niskiego poziomu i korzyści płynące z syntezy prawa sterowania uwzględniającej krzywiznę (patrz rys. 4).

NADMIERNE WYNAGRODZENIE

Nadmiarowa nadkompensacja odnosi się do zdolności regulatora do budowania zdolności kompensacji (szybkiej) w przypadku niepewności i błędów. Budowanie tej „zdolności” można postrzegać jako miarę kompensacji, która wykracza poza uwzględnianie niepewnego zdarzenia, aż do uzyskania (tj. nagłej zbieżności błędu) z nieoczekiwanego zdarzenia.

Sterowanie ANTIFRAGILE wykorzystuje nadmiarową nadkompensację podczas projektowania sterowania niskiego poziomu siłownikami (patrz rys. 5). Po zidentyfikowaniu „szybkiej” i „wolnej” dynamiki zamkniętego układu siłowników, projekt koncentruje się na przepisaniu dynamiki w taki sposób, aby dynamika układu zamkniętego była opisana wyłącznie przez rozwiązanie w obszarze nakładania się na rys. 4, gdzie wypukłość odpowiedzi można zbadać za pomocą (5). Aby przeanalizować redundantne zachowanie nadmiernej kompensacji konkurencyjnych strategii sterowania, zaczynamy od szczegółowego przeglądu wyników eksperymentalnych przedstawionych na rys. 7. Widoczne są tu różnice w kompensacji krzywizny (tj. efektów drugiego rzędu) zadanej dynamiki (tj. trajektoria to miejsce i dynamika).

Dokładniej, na rys. 7b można zaobserwować, że regulatory ANTIFRAGILE i ROBUST ściśle podążają za zadaną trajektorią (patrz

Tabela 1 dla oceny ilościowej), z niewielkim przekroczeniem wartości w obszarach o dużej krzywiznie. Z drugiej strony, regulatory ADAPTIVE i RESILIENT rejestrują ogólne zmiany trajektorii, ale nie rejestrują płynnie obszarów silnie wypukłych i pozycji końcowej. Na koniec, aby uzyskać bardziej intuicyjne zrozumienie korzyści płynących z redundantnej nadkompensacji, analizujemy wyniki przedstawione na rys. 6.

Tutaj analizowane są wielkości kinematyczne (tj. prędkości liniowe i kątowe) oraz dynamiczne (tj. przyspieszenie liniowe i kątowe) opisujące ruch robota, dla prędkości i przyspieszeń odniesienia, sterowania

oraz rzeczywistych. Cechą charakterystyczną sterowania ANTIFRAGILE jest fakt, że sygnał prędkości liniowej sterowania przeskakuje w obszarach, w których zmienia się znak krzywizny (patrz rys. 6a) na trajektorii, co jest widoczne również w tempie zmiany prędkości, przedstawionym na rys. 6b.

Te zmiany o wysokiej częstotliwości są również determinowane przez syntezę sterowania o zmiennej strukturze, stanowiącą rdzeń projektu ANTIFRAGILE. Ten wzrost „pojemności” jest również widoczny w sygnałach sterowania kątownego, gdzie zarówno sygnały sterowania prędkością kątową, przedstawione na rys. 6c, jak i ich tempo zmian szybko przekraczają zadane wartości w zakrętach o dużej krzywiznie trajektorii. To zachowanie jest motywowane uproszczoną dynamiką silnika prądu stałego, która opisuje proporcjonalny efekt zmian dynamiki „szybkich zmiennych”.

KONTROLA ZMIENNEJ STRUKTURY

Ostatnim elementem projektu sterowania ANTIFRAGILE jest synteza sterowania o zmiennej strukturze. To podejście jest szeroko stosowane w dziedzinie projektowania sterowania odpornego na zakłócenia jako sposób na radzenie sobie z niepewnością, zarówno ustrukturyzowaną (tj. niepewność parametryczna), jak i nieustrukturyzowaną (tj. dynamika niemodelowana).

Jest to również wspólny element projektu dla regulatorów ROBUST i ANTIFRAGILE. Takie sterowanie kieruje system do rozmaitości opisującej określoną dynamikę układu zamkniętego i zapewnia, że system w niej pozostanie. Jak wspomniano wcześniej, rozmaitość staje się miejscem i dynamiką, jak pokazano na rys. 5.

Intuicyjnie, generowany sygnał sterujący będzie miał charakter nieciągły, a stabilność jest silnym warunkiem wstępnym (patrz (14)–(17)). Wywołane zachowanie sterowania o zmiennej strukturze zarówno w kontrolerach ROBUST, jak i ANTIFRAGILE jest widoczne na rys. 6. Jest to jeszcze bardziej widoczne, analizując wydajność w Tabeli 1.

Można tu zauważyć, że kontrolery ANTIFRAGILE i ROBUST przewyższają kontrolery ADAPTIVE i RESILIENT, pod względem najniższego RMSE dla odchyłeń podłużnych i poprzecznych, gdy uwzględniany jest jedynie scenariusz bezbłędny (bazowy). Ze względu na niejawne ważenie kursu w projekcie rozmaitości w kontrolerze ANTIFRAGILE, dominacja ulega zmianie w błędzie kursu, gdzie zajmuje on tylko trzecią pozycję (patrz (8)). Jest to dodatkowo podkreślone na rys. 8 i uzasadnione faktem, że w śledzeniu trajektorii kurs ma charakter drugorzędny.

Z kolei ogólna (euklidesowa) pozycja musi być jak najlepiej dopasowana do wyznaczonej trajektorii. Dzięki bazowemu modelowi sterowania predykcyjnego, sterowanie ADAPTIVE radzi sobie stosunkowo dobrze z odchyleniami RMSE w scenariuszach bezbłędnych, nawet lepiej niż sterowanie RESILIENT, które wyróżnia się minimalizacją błędów kursu. Rozważając scenariusze z niepewnością i błędami, rozważyliśmy ocenę wydajności różnych algorytmów sterowania trajektorią pod wpływem 4 rodzajów błędów (tj. 2 usterek czujników – modelowanych jako przebite opony – i 2 usterek siłowników – modelowanych jako okresowe uderzenia wału silnika – kół napędowych robota), jak pokazano w tabeli 1.

Ogólnie rzecz biorąc, sterowanie ANTIFRAGILE przewyższa inne techniki sterowania, zapewniając minimalny RMSE dla wszystkich typów błędów, aczkolwiek z dość niewielkim marginesem w porównaniu z ROBUST. W bliskiej odległości sterowanie ROBUST przewyższa ANTIFRAGILE i inne techniki w minimalizacji błędów orientacji.

Sterowanie ADAPTIVE zbliża się do ROBUST z niewielką karą, która może zależeć od wyboru funkcji kosztu.

Wreszcie, wolniej zmieniająca się reakcja jest oferowana za pomocą sterowania RESILIENT (podobnego do hipotetycznej sytuacji na rys. 1), ale ze stabilnym wynikiem.

W naszym ostatnim i najbardziej ekstremalnym przykładzie uwzględniono kaskadowe błędy i niepewność w procesie śledzenia trajektorii przez robota (patrz rys. 10). Ogólne kryteria oceny wybrano na podstawie odchylenia euklidesowego od zadanej trajektorii. Jak widać, a także wsparte wcześniejszą dyskusją i analizą, eksperymenty przybliżają nas do weryfikacji hipotezy (wizualnie opisanej na rys. 1). Analiza na rys. 10 pokazuje, że sterowanie ANTIFRAGILE (czerwony ślad) oferuje najmniejsze odchylenie, z małymi obszarami (zazwyczaj przed wystąpieniem nowego błędu), gdzie błędy jeszcze bardziej się zmniejszają.

Tuż za nimi znajduje się odporne zachowanie kontrolera ROBUST, który wykazuje oscylacyjne prawo sterowania o wysokiej częstotliwości, powodujące oscylacje w poleceniach siłownika, a ostatecznie w trajektorii, ze względu na jego zmienną strukturę (patrz zielony ślad na rys. 10). Wykorzystując predykcyjne właściwości modelu bazowego i oddalający się horyzont, ADAPTIVE maksymalizuje korzyści płynące z MPC, zapewniając jednocześnie wysoką wydajność. Ostatecznie każdy wprowadzony defekt powoduje powolną reakcję kontrolera RESILIENT, zwiększając całkowitą niedokładność położenia.

WNIOSEK

Radzenie sobie z niepewnością w sterowaniu robotem w pętli zamkniętej jest wciąż przedmiotem otwartej dyskusji i owocnych badań. Aby zająć się syntezą sterowania w tym kontekście, przedstawiamy sterowanie ANTIFRAGILE, nowatorskie ramy projektowe, których celem jest uchwycenie unikalnych cech reakcji systemu na sterowanie. W obszarach przestrzeni rozwiązań, gdzie system jest nie tylko odporny na niepewność i zmienność, ale także zdolny do czerpania z nich korzyści i przewidywania przyszłych niepewnych zdarzeń, efekty pierwszego i drugiego rzędu oferują użyteczne wskazówki dotyczące tego, kiedy i jak wysłać sygnały sterujące, które mogą sterować systemem.

To główny powód obecnych badań i sterowania ANTIFRAGILE. Udało nam się zweryfikować zarówno projekt sterownika dla zadania robotycznego, jak i ramy sterowania ANTIFRAGILE poprzez testy z parametryzowanymi błędami. Od tego zaczyna się opracowanie spójnej teorii i ram opartych na idei indukowanej antykruchości w systemach technicznych.

Sterowanie zmienną strukturą układów nieliniowych

New text