
POSUDEK DIZERTAČNÍ PRÁCE

Název: Monte Carlo-Based Identification Strategies for State-Space Models

Autor: Ing. Milan Papež, Vysoké učení technické v Brně

Posudek vypracoval: doc. Ing. Ondřej Straka, Ph.D, Západočeská univerzita v Plzni

Dizertační práce Ing. Milana Papeže se věnuje metodám odhadu stavu a parametrů obecně nelineárních negaussovských modelů s důrazem na sekvenční metody Monte Carlo. Práce je napsaná anglicky v rozsahu 223 stran, z čehož 20 stran tvoří přílohy a 19 stran literatura. Samotná práce je členěna do osmi kapitol. Úvodní kapitola popisuje základní principy a techniky metod Monte Carlo jako je sekvenční metoda Monte Carlo či metoda založená na markovských řetězcích. **Kapitola 2** se věnuje stavovým modelům dynamických stochastických systémů v diskrétním čase a aplikaci state-of-the-art metod Monte Carlo v úloze odhadu stavu a parametrů těchto modelů. Kapitola se také stručně věnuje jednodušším metodám odhadu stavu založeným na předpokladu sdružené gaussovosti predikce stavu a měření. Kapitoly 3-7 se věnují jednotlivým cílům dizertační práce. V **kapitole 3** se jedná o sdružený odhad stavu a statických parametrů stavových modelů popsanych hustotou pravděpodobnosti z exponenciální rodiny, přičemž se odhad provádí částicovým filtrem doplněným o techniku Rao-Blackwellizace a aproximaci hustot pravděpodobnosti založené na projekci. **Kapitola 4** se zabývá stejnou úlohou jako kapitola 3, avšak uvažuje časovou proměnnost parametrů. K odhadu stavu a parametrů se zde používá navržený částicový filtr doplněný o techniku Rao-Blackwellizace a o alternativní stabilizované zapomínání, které je reakcí na neznámou dynamiku měnících se parametrů. **Kapitola 5** se věnuje úloze odhadu stavu skokově se měnících nelineárních modelů s markovským typem skoků. Zde je cílem odhadu jak stav, tak diskrétní parametr popisující změnu nelineárních modelů. K odhadu se používá navržený částicový vyhlazovací algoritmus s technikou Rao-Blackwellizace a technikou nazvanou „particle Gibbs ancestor sampling“. **Kapitola 6** se věnuje podobné úloze jako kapitola 5 s tím rozdílem, že je matice pravděpodobností přechodu mezi jednotlivými modely neznámá. K odhadu stavu a parametrů autor používá EM algoritmu se stochastickou aproximací a technikou Rao-Blackwellizace. **Kapitola 7** se pak svým zaměřením mírně odlišuje od předchozích čtyřech kapitol a věnuje se dynamickému přenosu znalosti mezi dvěma Kalmanovými filtry v úloze odhadu stavu.

Stěžejních pět kapitol (kapitoly 3-7) představuje v podstatě text převzatý z pěti publikací, kde je Ing. Papež autorem či spoluautorem, a kapitoly 1-2 mají za cíl uvést do problematiky. Zvolená podoba dizertační práce je tak relativně jednoduchá z pohledu její přípravy, avšak nezbytným důsledkem je fakt, že výklad některých metod a principů se v práci několikrát opakuje a například sekvenční metoda Monte Carlo je tak v práci vysvětlována celkem čtyřikrát. Dalším důsledkem je fakt, že techniky navržené v jednotlivých kapitolách nejsou navzájem konfrontovány, ačkoliv řeší podobný problém.

Cíl dizertační práce je zmíněn v úvodní kapitole. Základním cílem je návrh algoritmů pro dvě obecné třídy nelineárních a negaussovských stavových modelů, a to

- 1) Podmíněně konjugované stavové modely, které obsahují vedle spojitého stavu i neznámé parametry.
- 2) Skokově se měnící nelineární modely s markovským typem skoků, které vedle spojitého stavu obsahují i markovský řetězec řídící skoky mezi modely.

Nové algoritmy pro odhad stavu a parametrů pro podmíněně konjugované stavové modely byly navrženy v kapitolách 3 a 4, zatímco algoritmy pro skokově se měnící nelineární modely byly navrženy v kapitolách 5 a 6. Navíc byl v kapitole 7 navržen způsob předávání informací mezi Kalmanovými filtry, který nově pracuje dynamicky a on-line. Lze tedy konstatovat, že cíl, kterým bylo navrhnout nové algoritmy pro úlohu odhadu stavu, byl v práci splněn.

Práce se obecně zabývá teoreticky velmi náročnou úlohou odhadu stavu a parametrů dynamických stochastických systémů, která nachází uplatnění v řadě dalších oblastí jako je automatické řízení, identifikace systémů, detekce poruch či zpracování signálů. Z tohoto pohledu tedy námět práce odpovídá oboru disertace, kterým je Kybernetika, automatizace a měření.

Práce vykazuje původní přínosné části, konkrétně se jedná o

1. Návrh techniky aproximace složité hustoty pravděpodobnosti jednoduchou hustotou, který byl použit v částicovém filtru s technikou Rao-Blackwellizace k redukci počtu členů hustoty pravděpodobnosti v rámci exponenciální rodiny.
2. Návrh techniky založené na hypotézách, která umožňuje pracovat s možným časovým vývojem parametrů v rámci částicového filtru doplněného o techniku Rao-Blackwellizace.
3. Návrh vyhlazovacího algoritmu pro odhad stavu a parametrů skokově se měnících nelineárních modelů založeného na kombinaci techniky Rao-Blackwellizace, metodě markovských řetězců a techniky nazvané „particle Gibbs ancestor sampling“.
4. Návrh vyhlazovacího algoritmu pro odhad stavu a parametrů skokově se měnících nelineárních modelů založeného na EM algoritmu se stochastickou aproximací a technice Rao-Blackwellizace. Oproti předchozímu algoritmu umožňuje tento i odhad pravděpodobností přechodu mezi modely.
5. Návrh mechanismu pro přenos znalosti mezi dvojicí Kalmanových filtrů, přičemž tento mechanismus má charakter dynamický a on-line.

Jednotlivé klíčové části práce autor publikoval ať již samostatně, či jako spoluautor ve formě pěti publikací prezentovaných na kvalitních mezinárodních konferencích. V dalších šesti konferenčních člancích pak publikoval příspěvky zabývající se úlohou odhadu stavu. Ze seznamu publikací vyplývá, že Ing. Milan Papež nepostrádá vědeckou erudici. Bylo by vhodné, aby některý výsledek (výsledky) publikoval formou časopiseckého článku.

K práci mám následující připomínky:

- Kapitoly, které se zabývají vlastním přínosem jsou uvedeny ve formě konferenčních příspěvků, které jsou někdy mírně rozšířené. Navržené techniky a metody jsou numericky ilustrované převážně na jednorozměrném modelu nestacionárního růstu s neznámými parametry. Tento model se často používá v odborné literatuře jako srovnávací pro své komplikované nelineární chování a vzhledem k omezenému rozsahu konferenčních článků je i proto pochopitelné jeho použití. Pro dizertační práci by však bylo vhodné uvažovat větší množství testovacích příkladů, které by umožnily lépe a kvalifikovaněji posoudit výhody navrhovaných technik a algoritmů.
- V simulačních příkladech analyzujících výkon navržených algoritmů se často používá nízký počet Monte Carlo simulací systému (typicky několik desítek). Vzhledem k silně nelineárnímu chování uvažovaného modelu nestacionárního růstu by byl vhodnější vyšší počet simulací, tedy o jeden až dva řády. Některé závěry o kvalitě jednotlivých metod jsou tak činěny na základě pouze 20 simulací jednoho konkrétního nelineárního systému. Obecnější platnost daných závěrů je tak přinejmenším nejistá.
- Navíc by pro porovnání chování jednotlivých algoritmů bylo vhodné uvést kvalitu odhadu formou tabulky, protože z některých obrázků nelze jednoznačně určit, která z metod poskytuje přesnější odhady.
- V práci se v některých pasážích používá nezvyklé značení střední hodnoty $\pi(f)$ funkce $f(x)$, kde veličina x je popsána hustotou pravděpodobnosti $\pi(x)$ – viz. (1.2). V jiných částech se pak používá standardního operátoru střední hodnoty $E[f(x)]$.
- Dirakova funkce $\delta_{x,i}$ je definována jinak, než je uvedeno pod vztahem (1.3).
- Vztah pro počet vzorků N v prvním odstavci stránky 22 není správně, protože člen na pravé straně σ_N^2 je již funkcí N .
- Estimátor σ_N^2 na straně 22 není nestranný, jak tvrdí poznámka 3.

- Ve vztahu (1.13) zřejmě u $\pi(f)$ chybí druhá mocnina.
- Definice 1.2 a 1.3 a 1.4 a 1.5 nejsou definicemi, nýbrž se jedná o matematické věty.
- Ve vztazích (2.16) a (2.18) není nutné, aby byly šumy popsány gaussovskou hustotou.
- Značení použité v kapitole 7 je nekompatibilní se značením v předchozích kapitolách.

Dizertační práce Ing. Milana Papeže přinesla řadu nových algoritmů pro úlohu odhadu stavu a parametrů nelineárních stochastických modelů v diskrétním čase. Navržené algoritmy autor porovnal formou numerických simulací s řadou dalších metod založených na technice Monte Carlo a ukázal, že navržené algoritmy poskytují kvalitní odhad stavu a parametrů při nízkých výpočetních nárocích. V práci také navrhl dynamický on-line způsob předávání znalostí mezi dvěma Kalmanovými filtry. Vedle nových algoritmů také představil poměrně obsáhlý přehled moderních sekvenčních metod Monte Carlo pro úlohu odhadu stavu, který může sloužit jako vhodné uvedení do problematiky.

Dizertační práce splňuje podmínky samostatné tvůrčí práce, obsahuje původní výsledky, které byly autorem publikovány, a **doporučuji ji tedy k obhajobě.**

V Plzni, 18. 2. 2019

Doc. Ing. Ondřej Straka, Ph.D.



OTÁZKY PRO OBHAJOBU:

- 1) Co je důvodem použití estimačních algoritmů ke generování exaktních trajektorií stavu a módu v kapitole 5 (RBPGAS s 1024 vzorky) a kapitole 6 (RBPSAEM s 1024 vzorky), když se jedná o simulaci a skutečné trajektorie stavu a módu jsou k dispozici?
- 2) Jaký je vztah veličiny $\mathbf{x}_n$, kterou odhaduje primární filtr a veličiny $\mathbf{x}_{n,e}$, kterou odhaduje externí filtr?
- 3) Co to znamená, že model stavu a měření je podmíněný hustotami? (viz. (7.4))
- 4) V části 7.1.2 se píše, že cílem je návrh mechanismu pro přenos distribucí definovaných v několika časových krocích a dosažení dynamického a on-line přenosu znalostí. Lze mluvit o on-line přenosu znalostí, když výpočet normalizační funkce γ je zajišťován zpětným během informačního filtru?
- 5) Porovnejte navržený přenos informací mezi Kalmanovými filtry a metody informační fúze, například metodu průniku kovariancí [1], která nepředpokládá znalost vzájemné korelace mezi slučovanými odhady?
[1] S.J. Julier, J.K. Uhlmann, *A non-divergent estimation algorithm in the presence of unknown correlations*, in: *Proceedings of the IEEE American Control Conference*, vol. 4, Albuquerque, NM, USA, 1997, pp. 2369–2373
- 6) Čím je způsobeno, že přidáním znalosti z měření s vyšší variancí šumu měření R je odhad stavu horší, než pokud tato znalost přidána nebyla? (viz. obrázek 7.2, NT vs. DT) V případě informační fúze totiž platí, že pokud se dělá fúze odhadů správně, použití i nekvalitního odhadu vede na zlepšení odhadu kvalitního. Přinejmenším se však kvalitní odhad nemůže zhoršit.
- 7) Jaký počet Monte Carlo simulací byl použit pro získání hodnot RMSE zobrazených na obrázcích 2.2, 2.3 a 2.4?
- 8) Posuďte použitelnost navržených technik pro vícedimenzionální systémy, V jakých aplikacích vidíte jejich využití?