

Návrh pokročilých algoritmů v úloze aktivní detekce chyb

Jan Škach¹

1 Úvod

Složitost technických systémů roste stejně tak jako důležitost diagnostiky chyb, která může pomoci zvýšit bezpečnost, zachovat kvalitu a snížit ekonomické náklady. V poslední době je věnována zvýšená pozornost aktivnímu přístupu k detekci chyb, který využívá ke zvyšování kvality detekce chyb vhodně navržený budící vstupní signál. Návrh aktivního detektoru chyb je formulován jako optimalizační úloha s obecným kritériem penalizujícím chybná rozhodnutí. Optimální řešení takové úlohy nelze nalézt analyticky a numerické řešení využívající dynamické nebo lineární programování je výpočetně extrémně náročné. Klíčovým krokem pro nalezení suboptimálního řešení s přijatelnými výpočetními nároky je použití pokročilých algoritmů, které umožňují provést návrh aktivního detektoru na základě on-line naměřených dat.

Navrhované suboptimální řešení tvoří v podstatě tři části. Původní úloha je nejdříve přeformulována jako úloha s plně známým stavem. Tento krok zahrnuje algoritmus odhadu stavu, například banku Kalmanových filtrů. Suboptimální aktivní detektor chyb je nalezen pomocí pokročilých algoritmů, které iterativně vylepšují suboptimální řešení. Algoritmy inspirované aproximačním dynamickým programováním a zpětnovazebním učením představující nadějný směr výzkumné práce. Mezi úspěšně použité techniky algoritmů patří kvantizace, parametrická a neparametrické aproximace Bellmanovy funkce, adaptivní výběr parametrů nebo učení na základě zkušenosti, které využívá techniku temporální diference (TD) a Q-učení.

2 Ilustrace navrhovaného řešení na systému spojených nádrží

Uvažujme systém spojených nádrží zobrazený na Obrázku 1, kde může nastat chyba vlivem zanesení průtoku mezi první a druhou nádrží. Nechť je chování systému v každém časovém okamžiku $k \in \mathcal{T} = \{0, 1, \dots\}$ popsáno jedním ze dvou linearizovaných modelů

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1,1} \\ \mathbf{x}_{k+1,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{v_{12}^{\mu_k} A_{12}^{\mu_k} \sqrt{2gT_s}}{2S_1^{\mu_k} \sqrt{\bar{x}_1^{\mu_k} - \bar{x}_2^{\mu_k}}} & \frac{v_{12}^{\mu_k} A_{12}^{\mu_k} \sqrt{2gT_s}}{2S_1^{\mu_k} \sqrt{\bar{x}_1^{\mu_k} - \bar{x}_2^{\mu_k}}} \\ \frac{v_{12}^{\mu_k} A_{12}^{\mu_k} \sqrt{2gT_s}}{2S_1^{\mu_k} \sqrt{\bar{x}_1^{\mu_k} - \bar{x}_2^{\mu_k}}} & 1 - \frac{v_{12}^{\mu_k} A_{12}^{\mu_k} \sqrt{2gT_s}}{2S_1^{\mu_k} \sqrt{\bar{x}_1^{\mu_k} - \bar{x}_2^{\mu_k}}} - \frac{v_{23}^{\mu_k} A_{23}^{\mu_k} \sqrt{2gT_s}}{2S_2^{\mu_k} \sqrt{\bar{x}_2^{\mu_k}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k,1} \\ \mathbf{x}_{k,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s}{S_1^{\mu_k}} \\ 0 \end{bmatrix} u_k + \mathbf{G}^{\mu_k} \mathbf{w}_k,$$

$$y_k = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k,1} \\ \mathbf{x}_{k,2} \end{bmatrix} + h^{\mu_k} v_k, \tag{1}$$

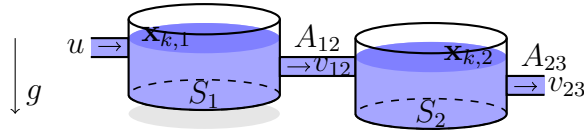
kde $\mathbf{x}_k = [\mathbf{x}_{k,1}, \mathbf{x}_{k,2}]^T \in \mathbb{R}^2$ [m] je stav jehož prvky představují rozdíl výšky hladiny v příslušné nádrži od pracovních bodů linearizace $\bar{\mathbf{x}}^{\mu_k} = [\bar{x}_1^{\mu_k}, \bar{x}_2^{\mu_k}]^T$ při konstantním přítoku kapaliny do první nádrže $\bar{u} = 0.015$ [m³/s], $\mu_k \in \mathcal{M} = \{1, 2\}$ je neznámý index modelu systému, $u_k \in \{0, 0.01, 0.02\}$ [m³/s] je vstup v podobě rozdílu přítoku kapaliny do první nádrže od \bar{u} , $y_k \in \mathbb{R}$ [m] je měřený výstup, tedy výška hladiny v druhé nádrži, $\mathbf{w}_k \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_2)$ je stavový šum,

¹ student doktorského studijního programu Aplikované vědy a informatika, obor Kybernetika, e-mail: janskach@kky.zcu.cz

$v_k \sim \mathcal{N}(0, 1)$ je šum měření, w_k a v_k jsou vzájemně nezávislé bílé šумы, $\mathbf{G}^1 = \mathbf{G}^2 = 10^{-4}\mathbf{I}_2$ a $h^1 = h^2 = 10^{-3}$ určují dynamiku příslušných šumů. Parametry $v_{12}^1 = v_{12}^2 = v_{23}^1 = v_{23}^2 = 0.99$ jsou příslušné rychlostní součinitele průtokového potrubí, $A_{12}^1 = A_{23}^1 = A_{23}^2 = 0.0063 [\text{m}^2]$, $A_{12}^2 = 0.0043 [\text{m}^2]$ jsou příslušné průřezy průtokového potrubí, $S_{12}^1 = S_{12}^2 = S_{23}^1 = S_{23}^2 = 0.3142 [\text{m}^2]$ jsou příslušné průřezy dna nádrží, $g = 9.81 [\text{m/s}^2]$ je tíhové zrychlení a $T_s = 0.5 [\text{s}]$ je perioda vzorkování. Přepínání mezi dvěma chováními systému může být popsáno maticí pravděpodobností přechodu $\Pi(\mu_{k+1} = j | \mu_k = i) = 0.02$ pro $i, j \in \mathcal{M}$, $i \neq j$. Počáteční prediktivní střední hodnota stavu je $\hat{\mathbf{x}}_{0|-1} = [0, 0]^T$, prediktivní kovarianční matice stavu je $\Sigma_{0|-1}^x = 2 \cdot 10^{-4}\mathbf{I}_2$ a počáteční pravděpodobnost modelu $P(\mu_0 = 1) = 1$. Cílem je navrhnout aktivní detektor chyb generující rozhodnutí $d_k \in \mathcal{M}$ o modelu systému μ_k a budící vstupní signál u_k tak, aby bylo minimalizováno kritérium J penalizující chybná rozhodnutí na nekonečném časovém horizontu,

$$J = \lim_{F \rightarrow \infty} \mathbb{E} \left\{ \sum_{k=0}^F \eta^k L^d(\mu_k, d_k) \right\}, \quad L^d(\mu_k, d_k) = \begin{cases} 0 & \text{pokud } \mu_k = d_k, \\ 1 & \text{jinak,} \end{cases} \quad (2)$$

kde $\eta = 0.9$ je diskontní faktor a $L^d : \mathcal{M} \times \mathcal{M} \mapsto \mathbb{R}^+$ je funkce penalizující chybná rozhodnutí.



Obrázek 1: Systém spojených nádrží.

Aktivní detektor chyb byl navržen pomocí TD učení (AFD-TDL), TD Q-učení (AFD-TDQL) a TD ϵ -hladového Q-učení (AFD-TDeQL)¹. Hodnocení nulového vstupního signálu (Constant (0)), vstupního signálu ve formě sinusoidy s amplitudou 0.01 a frekvencí 1 [Hz] (Sine (1 [Hz])) a jednotlivých aktivních detektorů z hlediska odhadu \hat{J} kritéria (2) a výběrového rozptylu $\text{var}\{\hat{J}\}$ je zobrazeno v Tabulce 1. Hodnota \hat{J} je odhadnuta na základě 1000 Monte Carlo (MC) simulací na konečném horizontu 501 kroků a $\text{var}\{\hat{J}\}$ je vypočítána metodou bootstrap. Hodnota odhadu kritéria \hat{J} i variance $\text{var}\{\hat{J}\}$ je pro všechny tři navržené aktivní detektory chyb nižší v porovnání se zvolenými vstupními signály, což ukazuje jejich vyšší kvalitu.

Input signal generator	\hat{J}	$\text{var}\{\hat{J}\}$
Constant (0)	1.2537	0.0043
Sine (1 [Hz])	1.2537	0.0044
AFD-TDL	0.4799	0.0009
AFD-TDQL	0.7000	0.0014
AFD-TDeQL	0.6897	0.0014

Tabulka 1: Hodnocení aktivních detektorů chyb a vybraných vstupních signálů pomocí MC simulací.

¹Z důvodu omezené délky není v příspěvku uvedena detailní struktura algoritmů a konkrétní volba jejich parametrů. Bližší informace poskytne autor.