

Násobné inverzní kyvadlo jako měřítko dovedností v oblasti automatického řízení

Vlastimil Šetka¹

1 Úvod

Tento příspěvek si klade za cíl seznámení s úlohou řízení n -násobného inverzního kyvadla. Pro svou náročnost jak v oblasti matematického modelování a návrhu algoritmů řízení, tak v oblasti návrhu mechanické konstrukce a instrumentace při realizaci skutečného modelu takového kyvadla, je schopnost řešit tuto úlohu vědeckou komunitou někdy označována jako měřítko (*benchmark*) dovedností v oblasti automatického řízení.

Cílem úlohy řízení n -násobného inverzního kyvadla je pouze pomocí pohybu vozíku, ke kterému je volnými klouby sériově připojeno n pohyblivých ramen, s využitím zpětné vazby dosáhnout přechodu všech ramen ze spodní klidové polohy do horní vzpřímené polohy, která je nestabilním rovnovážným bodem systému (úloha vyšvihnutí - *swing-up*), a dále ramena v blízkém okolí této polohy udržet (úloha balancování - *stabilization*). Rozšířenou úlohou je pohyb vozíku do požadovaného bodu při současném udržení ramen v okolí horní vzpřímené polohy (*side-stepping*).

Naše výzkumná skupina úspěšně realizovala řešení všech naznačených úloh řízení u trojnásobného inverzního kyvadla, a to nejen na úrovni matematického modelu, ale i na skutečném modelu s vlastním návrhem jeho konstrukce a s řadou vlastních hardwarových a softwarových komponent řídicího systému.

Pokud je nám známo, řízení skutečného modelu s více než třemi rameny nebylo dosud nikým předvedeno, ale podle našich závěrů je minimálně matematicky realizovatelné.

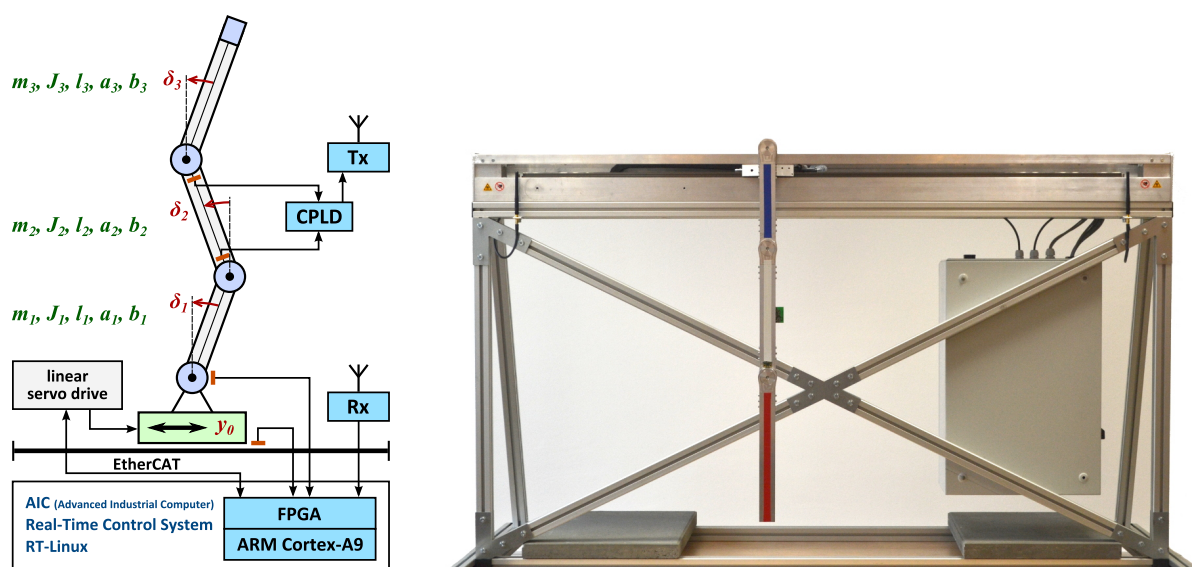
2 Násobné inverzní kyvadlo – teorie, model, řízení

Z pohledu teorie řízení lze n -násobné inverzní kyvadlo označit jako nelineární nemi-nimálně-fázový podaktuovaný systém, což z něj činí z teoretického hlediska mimořádně zajímavý problém. V případě trojnásobného kyvadla na vozíku, kterému se budeme dále věnovat, má systém 4 stupně volnosti, ale jen jeden z nich je přímo ovlivnitelný aktuátorem (motorem).

Pro návrh algoritmů vyšvihnutí kyvadla do cílové polohy a následné stabilizace je nutné znát jeho matematický model. Lagrangeovou metodou byly odvozeny pohybové rovnice v souřadnicích (obr. 1): y_0 poloha vozíku, $\delta_{1,2,3}$ úhel ramene od svislice. Přitom uvažujeme, že vozík je řízen ideálním regulátorem rychlosti, a akční veličinou u je zrychlení vozíku. Výsledkem odvození je soustava 8 dif. rovnic prvního řádu, tj. stavový popis, ve kterém se vyskytují inerciální a geometrické parametry ramen kyvadla označené: m_i hmotnost, J_i moment setrvačnosti kolem těžiště, l_i délka, a_i relativní poloha těžiště, b_i koeficient viskózního tření v kloubu.

Model je dále transformován do podoby, kde se vyskytují pouze tzv. základní inerciální parametry soustavy, které lze přímo identifikovat z experimentálně naměřených signálů $y_0, \delta_{1,2,3}$

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



Obrázek 1: Schéma trojitého kyvadla na vozíku; fotografie skutečného modelu.

a jejich derivací. Poznamenejme, že pro trojité kyvadlo je těchto parametrů 11, a pro návrh řízení je nutná jejich znalost s přesností zhruba 0,1 procenta.

Úloha vyšvihnutí a následné stabilizace pak představuje řešení dvoubodové okrajové úlohy nad stavovým modelem, kde hledáme takové řízení $u(t)$, které systém převede ze spodní stabilní polohy do horní vzpřímené polohy. Tato referenční trajektorie je navzorkována s periodou 1 ms, a v každém bodě je pro linearizovaný model navržen optimální stavový regulátor.

3 Skutečný model kyvadla a jeho řídicí systém

Problémy řízení trojitého kyvadla kladou mimořádné nároky i na realizaci skutečného modelu. Je požadována vysoká přesnost snímačů úhlů ramen a polohy vozíku, velmi nízké tření v kloubech, a poměrně velká rychlost (5 ms^{-1}) a zrychlení (50 ms^{-2}) vozíku bez mrtvého chodu a vůlí v převodech. Proto byl pro pohon vozíku použit přímý lineární servomotor, který splňuje požadavky na dynamiku a zcela eliminuje obvyklé problémy mechanických převodů.

Požadavek na celkovou délku ramen zhruba 1 metr vede na relativně rychlou dynamiku systému, která vyžaduje periodu vzorkování a běhu řídicích algoritmů kolem 1 milisekundy.

Ze snímačů na druhém a třetím ramenu navíc nelze skrz klouby vést kabely. Pro řešení tohoto problému byl vyvinut speciální elektronický modul, který je umístěn uvnitř druhého ramene, a zajišťuje napájení snímačů z baterie, precizní vyhodnocení signálů ze snímačů, a hlavně bezdrátový digitální přenos měření s velmi nízkým zpožděním (kolem $300 \mu\text{s}$).

Řídicí systém reálného času běží na průmyslovém počítači, jehož konstrukce a některé softwarové komponenty jsou výsledkem vlastního výzkumu. Hardwarová platforma s integrovaným hradlovým polem (FPGA) umožnila efektivní integraci speciálního bezdrátového přenosového systému, přesně definované vyhodnocení signálů z přímo připojených snímačů, a rychlou komunikaci s řídicí jednotkou servopohonu přes průmyslový protokol EtherCAT.

Poděkování

Tento příspěvek byl podpořen grantem SGS-2016-031.