

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Luboš Chovanec

Autoreferát dizertačnej práce

RIADENIE SLABO TLMENÝCH DYNAMICKÝCH
SYSTÉMOV

na získanie

akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Robotika a kybernetika

v študijnom odbore:

9.2.7 Kybernetika

Miesto a dátum:

Bratislava, 2017

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave robotiky a kybernetiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Luboš Chovanec
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU
Ústav robotiky a kybernetiky
Ilkovičová 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: prof. Ing. Peter Hubinský, PhD.
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky STU
Ústav robotiky a kybernetiky
Ilkovičová 3, 812 19 Bratislava

Oponent: prof. Ing. Juraj Spalek, PhD.
Žilinská univerzita
Elektrotechnická fakulta
Katedra riadiacich a informačných systémov
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Oponent: doc. Ing. Peter Frankovský, PhD.
Technická univerzita Košice
Strojnícka fakulta
Katedra mechatroniky
Letná 9, 042 00 Košice

Autoreferát bol odoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:

na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičová 3, Bratislava, v miestnosti D424 pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce doktorandského štúdia vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie 9.2.7 Kybernetika.

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan FEI STU

Názov

Riadenie slabo tlmených dynamických systémov

Hlavnou témou tejto práce je využitie vizuálneho systému pre riadenie slabo tlmených dynamických systémov. V analytickej časti sa autor venuje rôznym typom žeriavových konštrukcií a ich matematickým modelom. Rozoberá tiež aj metódy na elimináciu reziduálnych kmitov. Ďalej navrhuje fyzickú realizáciu laboratórneho modelu vežového žeriava, identifikuje jeho matematický model a navrhuje modulárny systém pre jeho riadenie. Tiež je predstavený návrh grafickej značky, ktorá bude umiestnená nad hákom a aj algoritmu pre jej detekciu. Navrhnutý je aj spätnoväzobný algoritmus pre potlačenie oscilácií bremena. Všetky navrhnuté riadiace metódy sú aj implementované a overené pri riadení laboratórneho modelu vežového žeriava na rôznych situačných experimentoch.

Title

Control of low damped dynamical systems

The main theme of this thesis is the application of visual servoing for control of low damped systems. In the analysis chapter, the author engages in the various types of crane constructions and their mathematical models. He deals with methods for elimination of residual oscillation. Also, he designs physical model of tower crane, identifies its mathematical model and also creates modular system for crane control. Next, it is introduced the design of graphical sign, located above the hook, and algorithm for the its detection. Feedback control algorithms are also designed for suppress oscillations of the payload. All designed methods for control of the tower crane are implemented and tested on various experiments.

Obsah

Úvod	5
0.1 Ciele dizertačnej práce	5
1 Návrh riešenia	7
1.1 Návrh architektúry riadiaceho systému	7
1.1.1 Modul Nucleus	8
1.1.2 Modul Camera	8
1.1.3 Modul Hook	8
1.1.4 Modul Maxon	8
1.1.5 Modul Model	8
1.1.6 Modul Aruco	9
1.1.7 Modul 3Dcad	9
1.1.8 Modul PlotOctave	9
1.1.9 Modul Joystick, Keyboard	9
1.2 CAD modelu vežového žeriava	10
1.3 Tvorba simulačného modelu	11
1.4 Návrh parametrov PID regulátora nulovej výchylky	12
1.5 Predikcia polohy zastavenia	16
1.6 Kalibrácia kamery	16
1.7 Grafická značka umiestnená na háku	17
1.8 Algoritmus detekcie značky	18
2 Overenie riešenia	20
2.1 Porovnanie modelu a reálneho systému	20
2.1.1 Demonštrácia využitia modelu pri výpadkoch detekcie háku	20
2.1.2 Asistencia modelu pri výpadkoch detekcie háku počas akčného zásahu	22
2.2 Základné pohyby žeriavu	24
2.2.1 Odozva kyvadla na skokovú zmenu rýchlosti	24
2.3 ZV tvarovač	25
2.3.1 Odozva fyzikálneho modelu na skokovú zmenu rýchlosti	26
2.4 Spätnoväzobné riadenie	27
2.4.1 Prenášanie bremena pomocou spätnej väzby	27
2.4.2 Potlačenie vzniknutých oscilácií	28
2.5 Ukážka merania	29

3	Zhodnotenie	30
3.1	Vyhodnotenie experimentov	30
3.2	Prínosy dizertačnej práce	31
4	Záver	32

Úvod

Žeriavy sa stali neodmysliteľnou súčasťou nášho sveta. Stretávame sa s nimi na každom kroku: v stavebnom priemysle, strojárskom, lodnom, či hutníckom priemysle, kde sú využívané na prenos materiálov. Hoci mnohé z nich sa vyznačujú robustnou konštrukciou, ich najzraniteľnejšou časťou sú však závesné systémy bremena. Pri polohovaní mačky žeriava je možné pozorovať kmity na zavesenom bremene. Tu vzniká neželaný efekt, keď po zastavení mačky žeriava bremeno osciluje okolo želanej polohy a trvá určitý čas, kým s nejakou presnosťou dosiahne želaný cieľ. Ďalším kritickým miestom riadenia je prenos bremena žeriavu cez prekážky. Operátor sa snaží navigovať žeriav tak, aby nedochádzalo k stretu bremena s okolím. Avšak pri vybudení neželaných oscilácií môže práve k takémuto stretu dôjsť, čo by viedlo k poškodeniu neseného objektu či prekážky. Podobný problém vzniká prenášaní tekutín v kontajnerových nádobách na žeriavoch, kde je lano nahrádzané pevným ramenom (napr. prenášanie horúceho železa v železiarňach), a tu je možné pozorovať vznik vln na hladine. Tie je možné vybudiť až tak, že dôjde k preliatiu tekutiny cez okraj kontajnera, a tým k znehodnoteniu technického procesu[1].

Preto je veľmi dôležité takéto slabo tlmené systémy riadiť a znižovať tak možné riziká, ku ktorým pri manipulácii s bremenom dochádza. Táto práca sa preto zaoberá rôznymi metódami riadenia žeriavov s použitím vizuálneho systému ako nie veľmi tradičného snímača využívaného na tieto účely.

0.1 Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je návrh algoritmov, ktoré umožnia kooperovať s operátorom pri jeho poveloch z joysticku a zamedzia tak osciláciám bremena, ktorá pri prenášaní bremena vznikajú. Hák by mal byť snímaný vizuálnym systémom a bude treba navrhnúť algoritmus, ktorý bude vedieť detegovať hák v priestore, a poskytovať túto informáciu pre účely identifikácie či riadenia.

Hlavné tézy dizertačnej práce sú:

- Navrhnúť matematické modely rôznych typov žeriavov.
- Navrhnúť vhodné metódy pre potlačenie oscilácií bremena, ktoré by kooperovali s operátorom.
- Navrhnúť spôsob získavania polohy žeriavového háku prostredníctvom vizuálneho systému využiteľnú pre identifikáciu a riadenie žeriavu.

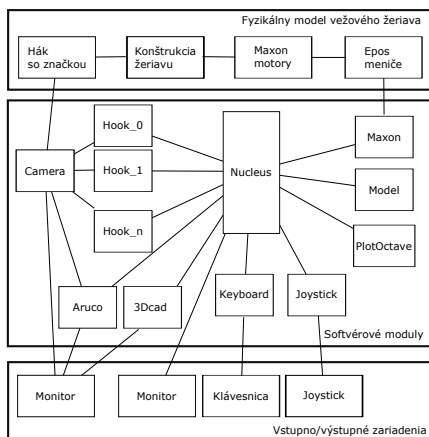
- Vytvoríť vizualizáciu získavaných údajov.
- Overiť navrhnuté metódy na reálnom zariadení.

1 Návrh riešenia

V prvej časti tejto kapitoly sa bude navrhovať modulárna architektúra riadiaceho systému, ktorý by mal byť nasadený pre testovacie účely na klasickom kancelárskom počítači, či viacerých malých minipočítačoch. Následne prezentovaný návrh *CAD* modelu ako aj simulačného modelu vytvoreného v prostredí *Scilab/Xcos*. Ďalej tu budú navrhnuté realizácie vybraných riadiacich štruktúr a predikcie polohy zastavenia bremena. Predstavená bude tiež grafická značka umiestnená na háku žeriava a algoritmus pre jej detekciu.

1.1 Návrh architektúry riadiaceho systému

Prvotná myšlienka návrhu bola vytvoriť jednoduchú C-aplikáciu. Časom sa však začali paralelné procesy v podobe nových vlákien rozrastať a bolo pomerne ťažké aplikáciu udržiavať a pridávať nové vlákna. Tak vznikla myšlienka vytvorenie jednotlivých modulov, ktorú budú medzi sebou komunikovať cez UDP neskôr cez TCP/IP protokol. Každý modul mal tak svoju adresu a port na čítanie či odosielanie údajov. Hoci je tento spôsob komunikácie pomalší ako cez vlákna, je ho možné distribuovať na viacerých počítačoch a jednoduchšie prepájať. Aktuálna kostra tohto modulárneho systému sa nachádza na obr. 1.1.



Obr. 1.1: Modulárny systém pre riadenie žeriava

1.1.1 Modul Nucleus

Hlavný proces, ktorý spúšťa a vypína ostatné procesy. Tiež v ňom boli implementované spätnoväzobné metódy riadenia a tvarovače.

1.1.2 Modul Camera

Tento modul slúži na vyčítanie obrazu z kamery v zvlášť vlákne, prevedenie do šedo-tónovej škály, komprimáciu obrazu do formátu *JPEG* a preposlanie ostatným procesom. Vo finálnej fáze napokon obsahoval aj algoritmus na detekciu háku a vykresľovanie háku pre operátora.

1.1.3 Modul Hook

Vstupom do tohto procesu bola informácia získaná z modulu Camera. Následne tu zbíhal algoritmus pre detekciu háku, a ak úspešne našiel hák v obraze preposlal ho ďalej do Modelu a Nucleusa. Bolo navrhnutých niekoľko modulov Hook, kde paralelne bežali rôzne algoritmy na detekciu a porovnávala sa ich rýchlosť a kvalita výstupu. Mohli byť teda ľubovoľne vypínané, po úprave skompilované a znovu spustené. To umožnilo robiť rýchle zmeny parametrov, či funkčnosti kódu. Tieto moduly Hook boli po testovacej fáze odstránené a najlepší algoritmus pre detekciu háku sa presunul do modulu Camera.

1.1.4 Modul Maxon

Tento modul zabezpečoval komunikáciu medzi procesom Nucleus a meničom Epos. Tiež mohol byť spúšťaný s parametrom „virtual“, kedy sa nemusela inicializovať sériová komunikácia s meničom Epos a mohlo sa tak pracovať na vývoji aj mimo fyzikálneho žeriavu napr. doma.

1.1.5 Modul Model

Odvođený matematický model žeriava bol používaný pre estimáciu polohy háku počas výpadkov detekcie. Modul Nukleus mu poskytoval neustále informácie vychýlení háku, dĺžke lana, vzdialenosti vozíka od veže a tiež, aby si neustále mohol adaptovať svoje stavy a zosilnenia. Aj akčné zásahy, ktoré boli aktuálne preposielané do modulu Epos mu boli poskytované. Modul Model mohol byť tiež v ľubovoľnom čase vypnutý a vtedy už modul Nucleus nedostával späť estimovanú polohu háku. V inom prípade Ak napríklad bol z nejakých príčin ukončený modul Camera, Model plne nahrádzal informáciu z kamery (viac v kap. 2.1). Ak neprišla informácia z kamery do stanoveného

časového limitu a bol zároveň spustený algoritmus nulovej výchyľky kyvadlo, došlo k prepnutiu do úplného manuálneho režimu a žeriav zastavil.

1.1.6 Modul Aruco

Pre vykresľovanie virtuálnych objektov či prekážok boli použité Aruco značky. Tento modul prijímal komprimovaný obraz z procesu Camera a používal knižnicu pre detekciu týchto značiek. Pre riadenie žeriavu však v tejto fáze rozpracovanosti mali iba informačný charakter pre operátora, nakoľko algoritmus detekcie bol pomalý a tak nemohol byť použitý pre ďalšie experimenty.

1.1.7 Modul 3Dcad

Online vizualizácia procesov je veľmi dôležitá pre vzdialené riadenie, kedy operátor nesedí v kabíne žeriava ale v pohodlí riadiaceho centra. Tento modul preberá z modulu Nucleus informáciu o polohe háku. Ďalej bolo potrebné získať aj otočenie nosníka a polohu vozíka. A keďže tieto informácie sa nezískavali z meničov, boli dopočítané integrovaním odosielanej rýchlostí v čase a následne posielané do modulu Maxon. Lubovoľný CAD model žeriava, ktorý má byť zobrazovaný je potrebné rozdeliť na jednotlivé pohyblivé časti a tie vyexportovať do súborov typu *.OBJ* následne pomocou knižnice OpenGL a základných matematických operácií akými sú rotácia a translácia boli jednotlivé časti žeriavu vykresľované.

1.1.8 Modul PlotOctave

Keďže program Octave je možné stále jednoducho spustiť ako konzolovú aplikáciu *Octave-CLI* a vykresliť veľké množstvo nameraných údajov, nie je potrebné hľadať grafické knižnice, ktoré by bolo treba zapracovať a prispôbiť po vizuálnej stránke pre danú C-aplikáciu. Preto tento modul spúšťal program Octave prostredníctvom dávkové súboru.

1.1.9 Modul Joystick, Keyboard

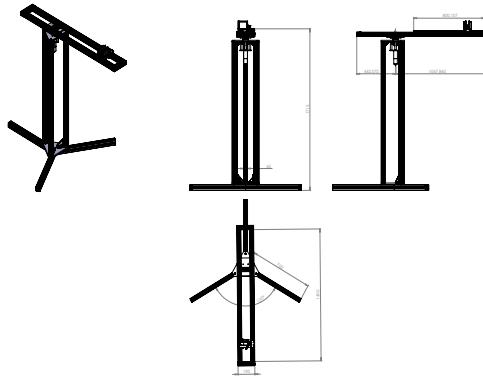
Ovládacích zariadení, ktorými by bolo možné ovládať žeriav je v súčasnosti veľmi veľa: (tablet, grafické bezkontaktné pero, trackball, 3D myš a pod.) V tejto práci boli použité štandardná počítačová klávesnica a 3-osový joystick.

Každý z uvedených modulov si ukladať všetky prijaté aj svoje procesné veličiny do textového súborov typu *.TXT*. Tie boli potom vykresľované pomocou programu Octave či \LaTeX .

Hoci vyššie uvedené moduly boli spúšťané iba na jednom počítač (na lokálnej IP adrese 127.0.0.1) do budúca sa uvažuje aj o implementovaní bezpečnostných protokolov (napr. <http://www.open-safety.org/>), pre splnenie určitých priemyselných noriem.

1.2 CAD modelu vežového žeriava

Fyzikálny model bol navrhovaný z hliníkových profilov. Je navrhnutý tak, aby ho v budúcnosti bolo možné prerobiť (zväčšiť, rozšíriť) (obr. 1.2). Preto bol postavený z hliníkových profilov.



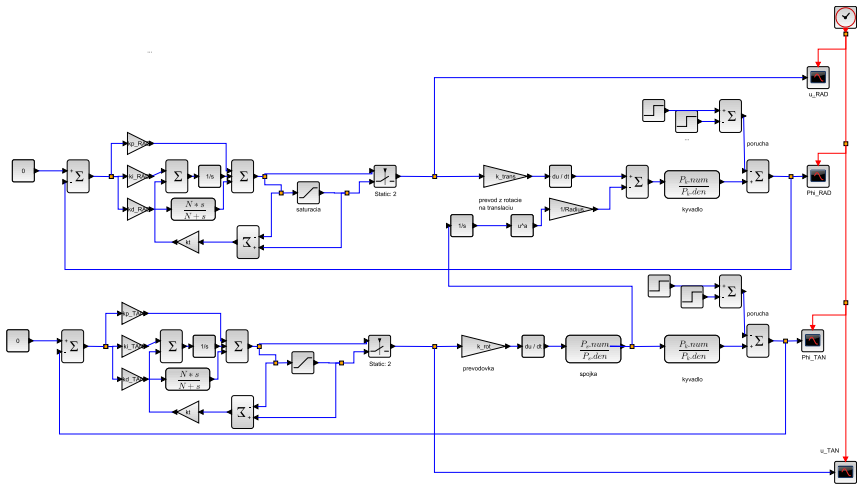
Obr. 1.2: CAD model vežového žeriava

Žeriav je vysoký približne $1.7[m]$, tak aby ho bolo možné preniesť do iného laboratória. Dĺžka hlavného nosníka $1.5[m]$, pričom vozík je na iba $0.8[m]$ koľajniciach. Tri nohy s dĺžkou $0.7[m]$ a rozostupom 120° je možné ľahko demontovať kvôli prenositeľnosti. Hliníkové profil sú pospájané uholníkmi a skrutkami. Veža žeriavu má spevnenú podstavu pomocou vyfrézovaného kovového trojuholníka a rovnaký sa nachádza aj na vrchu veže s veľkou dierou uprostred kvôli uloženie ložiskového domčeka. Avšak v návrhu neboli zahrnuté niektoré detaily, ako uchytenie kamery, centrovanie výstupu z navijaka lana, a tak boli dorábané dodatočne. Ako sa neskôr zistilo, aj vertikálny rozmer vozíka bol veľmi malý na to, aby sa dalo namontovať väčšie vývodové koliesko pre motor 2, ktoré by zrýchliło pohyb vozíka v radiálnom smere. Avšak tieto konštrukčné nedokonalosti je možné v budúcnosti poľahky prerobiť a

to vyfrezovaním nových dielov vozíka. Avšak fyzikálny model v tomto štádiu plne postačoval na vykonávanie rôznych experimentov a pomohol úspešne verifikovať mnohé simulačné modely a metódy riadenia.

1.3 Tvorba simulačného modelu

Pred samotnou realizáciou riadiacich metód bol vyhotovený model v prostredí Scilab/Xcos. Toto prostredie umožňuje písať vlastné skripty aj grafické programovanie. Model žeriava bol rozdelený na dve sekcie: translačnú a rotačnú.



Obr. 1.3: Ukážka realizácie spätnoväzobného riadenia v prostredí Scilab/Xcos

Translačná sekcia predstavovala pohyb vozíka na nosníku v smere radiálnom. Vstupovali do nej otáčky z motora 2, ktoré boli prepočítavané cez prevodovku a ozubený prevod na rýchlosť lineárnu (translačnú). Deriváciou tejto rýchlosti v čase bolo získavané radiálne zrýchlenie vozíka, ktoré už vstupovalo do systému Kyvadlo (systém 2. rádu), ktorý na výstupe generoval uhol vychýlenia lana radiálnom smere vyjadrený v radiánoch.

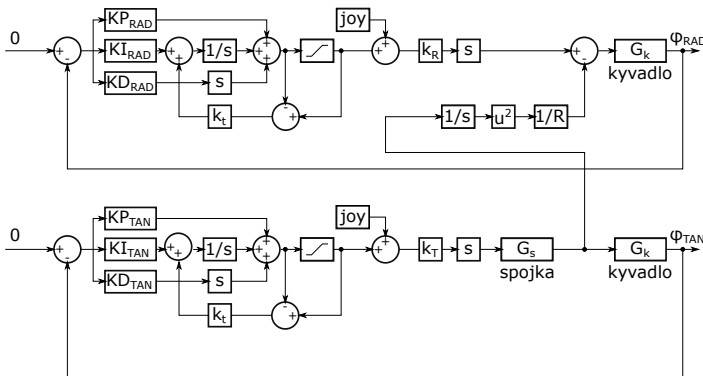
Rotačná sekcia predstavovala rotačný pohyb nosníka, resp. tangenciálny pohyb vozíka po kružnici. Vstupovali do nej otáčky motora 1, ktoré sa prepočítali cez prevodovku a následne na uhlovú rýchlosť a znej pomocou derivácie v čase bolo získané uhlové zrýchlenie. Uhlové zrýchlenie vstupovalo do systému Spojka (systém 2. rádu), ktorý generoval tangenciálne zrýchlenie. Tento signál

sa ďalej rozvetvoval na sekciu, ktorá generovala odstredivé zrýchlenie, ktoré bolo následne odčítané od vstupného radiálneho signálu zrýchlenia do systému Kyvadlo v radiálnom smere. Tangenciálne zrýchlenie generované systémom spojka ďalej vstupovalo do systému Kyvadlo (systém 2.rádu), kde na výstupe vznikol uhol vychýlenia lana v tangenciálnom smere v radiánoch.

Je dôležité na tomto mieste pripomenúť, že v systéme Spojka sa menili čitateľ prenosu (zosilnenie K_s) a uhlová frekvencia ω_s v závislosti od polohy vozíka v radiálnom smere. Tiež v systéme kyvadlo sa menil čitateľ prenosu (zosilnenie K_k) a uhlová frekvencia ω_k v závislosti od dĺžky lana L .

1.4 Návrh parametrov PID regulátora nulovej výchylky

Výber paralelnej PID štruktúry bol zvolený kvôli tomu, že po jeho kompletnej implementácii je možné testovať na ňom aj rôzne modifikácie regulátora (PI , PD , P , D) a to tak, že sa nepoužívajú zosilnenia položia rovné nule (obr. 1.4).



Obr. 1.4: Regulácia nulovej výchylky kyvadla

Pri tomto type riadiacej štruktúry bude žiadanou veličinou nulová výchylka kyvadla. Použitie akčné členy sa budú svojim zásahom do vozíka a nosníka snažiť, čo najrýchlejšie utlmiť oscilácie, ktoré vzniknú externým vybudením (vetrom), resp. operátorom. Signál z joysticku bude pripočítavaný k akčnému zásahu vygenerovaným regulátorom nulovej výchylky kyvadla.

Pre zjednodušenie bude dynamika motorov rovná jednej, keďže je o niekoľko rádov rýchlejšia ako dynamika kyvadla, spojky a nebude sa uvažovať pri syntéze parametrov regulátora. Na obr. 1.4. je možné vidieť dve hlavné

vetvy systému. Tá vrchnejšia generuje výchylku kyvadla v radiálnom smere a druhá v tangenciálnom smere. Rozdelia sa teda na dve samostatné vetvy s vlastným regulátorom.

Správanie sa kyvadla v tangenciálnom smere je prezentované prenosovou funkciou Kyvadla a Spojky. Zosilnenie K_T zahŕňa prevodovku a prevod z otáčok na uhlovú rýchlosť. Prenosová funkcia *PID* regulátora v jeho paralelnom má tvar:

$$G_R(s) = \frac{K_p + K_i s + K_d s^2}{s} \quad (1.1)$$

Prenosová funkcia *Kyvadla*:

$$G_K(s) = \frac{K_k}{s^2 + 2b_k \omega_k s + \omega_k^2} \quad (1.2)$$

Prenosová funkcia *Spojky*:

$$G_S(s) = \frac{K_s}{s^2 + 2b_s \omega_s s + \omega_s^2} \quad (1.3)$$

Následne bude mať prenos otvoreného regulačného obvodu takýto tvar:

$$G_{ORO}(s) = G_R k_T s G_S G_K \quad (1.4)$$

Uzavretý regulačný obvod so zápornou spätnou väzbou:

$$G_{URO}(s) = \frac{G_R k_T s G_S G_K}{1 + G_R k_T s G_S G_K} \quad (1.5)$$

Po dosadení prenosu prenosovej funkcie regulátora, Spojky a Kyvadla vznikne:

$$G_{URO}(s) = \frac{(K_p + K_i s + K_d s^2) K_s K_k}{s^4 + s^3 (2b_k \omega_k + 2b_s \omega_s) + s^2 (\omega_k^2 + 4b_s b_k \omega_s \omega_k + \omega_s^2) + \omega_s^2 \omega_k^2 + s (2b_s \omega_s \omega_k^2 + 2b_k \omega_k + \omega_s^2) + (K_p + K_i s + K_d s^2) K_T K_s K_k} \quad (1.6)$$

Ďalej sa už parametre zosilnení regulátora budú hľadať pomocou metódy rozmiestňovania pólov. Je to metóda vhodná na pomerne rýchle ladenie dynamiky celého systému. Pri tejto metóde sa volí želaný charakteristický polynóm a jeho dynamické správanie sa prostredníctvom pásma priepustnosti a tlmenia. Následne sa porovnávaním prislúchajúcich koeficientov pri s^n získava systém rovníc, z ktorých je možné získať jednotlivé zosilnenia regulátora.

Charakteristický polynóm z predchádzajúcej prenosovej funkcie bude teda daný:

$$N(s) = s^4 + s^3 (2b_k\omega_k + 2b_s\omega_s) + s^2 (\omega_k^2 + 4b_s b_k \omega_s \omega_k + \omega_s) + \omega_s^2 \omega_k^2 + s (2b_s \omega_s \omega_k^2 + 2b_k \omega_k + \omega_s^2) + (K_p + K_i s + K_d s^2) K_T K_s K_k \quad (1.7)$$

Želaný charakteristický polynóm:

$$N_0(s) = (s^2 + 2b_0\omega_0 s + \omega_0^2)^2 \quad (1.8)$$

Porovnaním prislúchajúcich koeficientov vyjdú vzťahy pre výpočet jednotlivých zosilnení *PID* regulátora:

$$K_P = \frac{4b_0^2\omega_0^2 + \omega_0^2 - \omega_k^2 - 4b_s b_k \omega_s \omega_k - \omega_s}{K_T K_s K_k} \quad (1.9)$$

$$K_I = \frac{\omega_0^4 - \omega_k^2 \omega_s^2}{K_T K_s K_k} \quad (1.10)$$

$$K_D = \frac{4b_0^2\omega_0^2 + \omega_0^2 - \omega_k^2 - 4b_s b_k \omega_s \omega_k - \omega_s + \dots}{K_T K_s K_k} \quad (1.11)$$

Následne sa vhodnou voľbou parametrov pásma priepustnosti ω_0 , tmenia b_0 hľadali vhodné parametre zosilnení *PID* regulátora, tak aby nedochádzalo k saturácii akčného zásahu pri skokových zmenách rýchlosti o veľkosti 2100[ot/min] t.j. 30% z maximálnej možnej rýchlosti.

Podobný postup bol zvolený aj pre určenie pohybu kyvadla v radiálnom smere, kde sa už nachádza iba prenos Kyvadla. Zosilnenie K_R v sebe skrýva prevodovku, prevod z rotačného pohybu na translačný a prevod z otáčok na uhlovú rýchlosť. Prenosová funkcia *PID* v jeho paralelnom tvare:

$$G_R(s) = \frac{K_p + K_i s + K_d s^2}{s} \quad (1.12)$$

Prenosová funkcia *Kyvadla*:

$$G_K(s) = \frac{K_k}{s^2 + 2b_k \omega_k s + \omega_k^2} \quad (1.13)$$

Príspevok odstredivého zrýchlenia z rotačného pohybu žeriavu tu vstupuje ako poruchová veličina a pri syntéze ju možno zanedbať pre uľahčenia výpočtov. Tiež musel byť pridaný do priamej vetvy filter prvého rádu ($1/(T_n s + 1)$), bez

ktorého by inak pri analytickom výpočte vychádzali iba dve rovnice o troch neznámych. Následne bude mať prenos otvoreného regulačného obvodu takýto tvar:

$$G_{ORO}(s) = G_R K_R s \frac{1}{T_n s + 1} G_K \quad (1.14)$$

Uzavretý regulačný obvod so zápornou spätnou väzbou:

$$G_{URO}(s) = \frac{G_R K_R s \frac{1}{T_n s + 2} G_K}{1 + G_R K_R s \frac{1}{T_n s + 1} G_K} \quad (1.15)$$

Po dosadení prenosu prenosovej funkcie regulátora a Kyvadla vznikne:

$$G_{URO}(s) = \frac{\frac{K_p + K_i s + K_d s^2}{T_n}}{s^3 + s^2 \frac{T_n 2b_k \omega_k + 1 + K_D K_R K_k}{T_n} + s \frac{T_n \omega_k + 2b_k \omega_k + K_I K_R K_k}{T_n} + \frac{\omega_k + K_P K_R K_K}{T_n}} \quad (1.16)$$

Charakteristický polynóm bude teda:

$$N(s) = s^3 + s^2 \frac{T_n 2b_k \omega_k + 1 + K_D K_R K_k}{T_n} + s \frac{T_n \omega_k + 2b_k \omega_k + K_I K_R K_k}{T_n} + \frac{\omega_k + K_P K_R K_K}{T_n} \quad (1.17)$$

Želaný charakteristický polynóm:

$$N_0(s) = s^3 + \omega_0 (2b_0 + k) s^2 + \omega_0^2 (1 + 2b_0 k) s + k \omega_0^3 \quad (1.18)$$

Porovnaním prislúchajúcich koeficientov vyjdu vzťahy pre výpočet jednotlivých zosilnení *PID* regulátora:

$$K_P = \frac{k \omega_0^3 T_n - \omega_k}{K_R K_k} \quad (1.19)$$

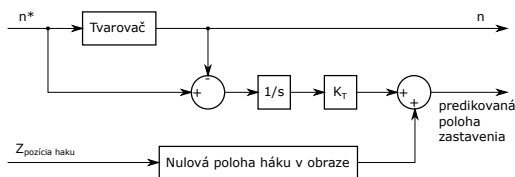
$$K_I = \frac{\omega_0^2 (1 + 2b_0 k) T_n - T_n \omega_k - 2b_k \omega_k}{K_R K_k} \quad (1.20)$$

$$K_D = \frac{\omega_0^2 (2b_0 + k) T_n - T_n 2b_k \omega_k - 1}{K_R K_k} \quad (1.21)$$

Následne sa vhodnou voľbou parametrov pásma priepustnosti ω_0 , tlmenia b_0 a posunom reálneho pólu k , hľadali vhodné parametre zosilnení *PID* regulátora, tak aby nedochádzalo k saturácii akčného zásahu pri skokových zmenách rýchlosti o veľkosti $120[\text{ot}/\text{min}]$ t.j. 30% z maximálnej možnej rýchlosti. rýchlosti.

1.5 Predikcia polohy zastavenia

Pri použití pre úpravu vstupného signálu získavaného napríklad z joysticku, vznikajú oneskorenia, medzi vstupnými povelmi a ich realizáciou. Preto je dôležité navrhnúť riešenie, ktoré bude neustále operátora informovať o tomto probléme. Vzhľadom k tomu, že je operátorovi poskytovaný obraz z kamery, kde sa mu zobrazujú aj užitočné informácie ohľadom riadenia a polohy háku, bude navrhnutý grafický spôsob zobrazenia predikovanej polohy zastavenia v podobe červeného kruhu na monitore. Pre vykreslenie takéhoto kruhu v obraze je potrebné poznať súradnice stredu kruhu. Tie budú prepočítavané z metrických, ktoré budú generované navrhnutou štruktúrou (obr. 1.5).



Obr. 1.5: Obvod predikcie

Takýto obvod bude spracovávať signál rýchlosti spreď a za tvarovačom. Následne sa integráciou tohto signálu podľa času získa poloha. Tá je ďalej prenasobená zosilnením K_T (to môže predstavovať prevodovku, prevody z rotačného pohybu na lineárny a pod.). Výstup sa sčíta s polohou háku v radiálnom alebo tangenciálnom smere, ktorý už bude posunutý v rámci kalibračných kriviek uvádzaných.

1.6 Kalibrácia kamery

Ako už spomenuté pri návrhu fyzikálneho modelu, kamera bude upevnená tesne vedľa výstupu lana z bubna, aby dokázala zachytiť aj extrémne výkyvy bremena obraze. Jej osadenie však nikdy nebude ideálne, bude zrotovaná, posunutá vo všetkých troch osiach od pomyslenej osi, ktorú vytvára lano. Preto je nutné vykonať kalibráciu vždy po osadení kamery resp. vtedy, ak sú pozorované dlhotrvajúce ofsety posunutia háku obraze.

Najjednoduchší spôsob kalibrácie fyzikálneho modelu bol zber polohy x, y, z háku počas odvíjania alebo navíjania lana. V laboratórnych podmienkach je zabezpečené bezvetrie sa dá nájsť kalibračná krivka pre nulovú výchylku lana v radiálnom aj tangenciálnom smere, ako funkcia, do ktorej

bude vstupovať informácia o z-ová osi značky. Viac sa touto kalibráciou bude zaoberať kap. ??.

1.7 Grafická značka umiestnená na háku

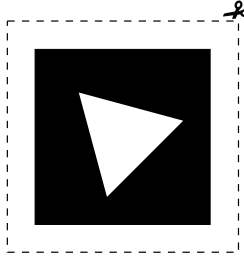
Pre identifikáciu či riadenie reálneho modelu žeriava je veľmi dôležitá informácia o polohe háku. Táto informácia by mala prichádzať z procesu Camera, kde bude zbiehať algoritmus pre detekciu háku.

Značka by mala byť:

- unikátna v danom prostredí
- čo najmenších rozmerov, aby nedochádzalo často k jej poškodeniu, nezaťažovala pri manipulácii s hákom, neprejavoval sa pri nej plachetnicový efekt, či nezavádzalo vo výhlade kamery pri krátkom lane,
- ľahko a rýchlo detegovateľná,
- farebne stála,
- poskytovať získanie jej polohu a natočenie voči kamere.

V tomto prípade sa táto práca zamerala priamo na otestovanie rôznych jednoduchých odporúčaných značiek (farebných, špecifických geometrických útvarov). Pretože ako sa pri experimentovaní ukázalo vytvoriť značku, ktorá by bola unikátna v danom prostredí je pomerne náročná záležitosť. Preto boli vykonané rôzne experimenty aj so značkami, ktoré vo svojich prácach použili autori [25],[31], [24].

Odporúčaná detekcia oranžovej loptičky na háku sa ukázala ako neuspokojivá. Nakoľko svetlo dopadajúce na loptičku z jednej strany spôsobovalo problémy pri určovaní presného priemeru kružnice získavanej pomocou Houghovej kruhovej transformácie. Nebolo tak možné pomocou tejto značky vypočítavať presnú vzdialenosť háku od kamery. Postupne sa prechádzalo na testovanie dvojrozmerných grafických značiek obsahujúce geometrické útvary. Finálna podoba značky je uvedená na obr. 1.6, pričom presne stredom značky bude vyseknutý malý kruhový otvor s priemerom $2[mm]$ pre lano fyzikálneho modelu. Takéto umiestnenie značky na háku modelu sa javilo ako najjednoduchšie po konštrukčnej stránke. Ako sa neskôr ukázalo práve lano pretínajúce obraz kamery spôsobovali pri návrhu algoritmu na jeho detekciu nemalé problémy. Značka počas experimentov rotovala okolo lana v intervale $\pm\infty[rad]$. To však obohatilo autorove skúsenosti pri hľadaní vhodného riešenia detekcie.



Obr. 1.6: Finálny návrh značky

Prie reálnom žeriave však lano vstupuje do háku a vystupuje hneď minimálne $2x$. Je to spôsobené sústavou kladiek, ktoré majú redukovat silu potrebnú na zdvíhanie bremena. Na reálny systémoch by teda značka mala byť umiestňovaná na háku, tesne vedľa lán, na privrátenej strane ku kamere. Sústava lán už zabráni extrémnej rotácii háku, ktorá by nemala presiahnuť interval $\pm\pi/2[\text{rad}]$.

Značka má ešte jedno špecifikum. Pri návrhu hrán štvorca a trojuholníka sa bral ohľad na ich pomer, a teda či sú v pomere známeho zlatého rezu:

$$(hrana_{\text{štvorca}} + hrana_{\text{trojuholníka}}) / hrana_{\text{štvorca}} = hrana_{\text{štvorca}} / hrana_{\text{trojuholníka}}$$

Týmto pomerom mala značka prispieť ku svojej jedinečnosti a zároveň môže byť ľubovoľne zväčšovaná. Pomer hrán geometrických objektov, z ktorých značka pozostáva zostane nezmenený.

1.8 Algoritmus detekcie značky

V predchádzajúcej kapitole bola navrhnutá značka, ktorej parametre budú popísané práve prostredníctvom algoritmu pre jej detekciu. Tu bola snaha o vytvorenie takého algoritmu, ktorý zamedzí chybným detekciám a zároveň bude čo najrýchlejší kvôli neskoršiemu nastaveniu taktu pre modul Camera.

Postup prehľadávania obrazu je nasledovný:

1. Obraz je prevedený z RGB formátu získaného z kamery do šedo-tónovej škály (každý pixel teraz nesie iba 8-bitová informácia jasu).
2. Následne je prahovaný prostredníctvom adaptívnej metódy, ktorá prispôbuje prahovú hodnotu jasu pre každý objekt zvlášť. V tomto prí-

pade bola použitá Gaussova metóda (Gaussovo okno) rozloženia nad blokom pixlov. Výsledkom bol čierno-biely obraz.

3. Nad takýmto binárnym obrazom boli vykonané ešte morfológické operácie. Erózia pomohla vo veľkej miere odstrániť šumové informácie z obrazu a dilatácia vytvorí väčšie súvislé plochy. Práve pri odstraňovaní lana, prekryvajúceho značku zohrali ich správne nastavenie kľúčovú úlohu.
4. Ďalej boli nájdené v obraze všetky uzatvorené kontúry, ktoré mali definovanú chybu celistvosti kontúry, kvôli prekryvom lana so značkou. Zároveň bola otestovaná aj konvexnosť kontúry a jej plocha musela byť väčšia ako zvolená prahová hodnota. Tým sa odstránili veľmi malé plôšky z obrazu.
5. Následne sa vybrali tie kontúry, ktoré majú práve tri vrcholy (vertexy). Ak tieto vrcholy ležali od seba v rovnakých euklidovských vzdialenostiach, išlo teda o rovnostranný trojuholník. Ak nie, začni od začiatku algoritmu.
6. Potom sa prezreli všetky susedné štruktúry, ktoré boli hierarchicky na nižšej úrovni a hľadala sa kontúra so štyrmi vrcholmi. Ak sa nenašla, začni od začiatku algoritmu.
7. Nájdená 4 vrcholová kontúra bola opäť preverovaná, testom či sú všetky vrcholy od seba rovnako vzdialené a zároveň vzdialenosti dvoch protilahlých vertexov sú rovnaké. Tým sa získal štvorec. Ak nebol nájdený štvorec, nepokračovalo sa ďalej.
8. Teraz sa porovnávali jednotlivé hrany štvorca a hrany trojuholníka, či sú v pomere zlatého rezu. Ak tento pomer nesedel v definovanom blízkom okolí, algoritmus sa vrátil na začiatok.
9. Značka bola úspešne nájdená a z najväčšieho útvaru (kvôli zvýšeniu presnosti) t.j. zo štvorca boli prevzaté pozície štyroch jeho vrcholov a ťažisko.
10. Následne bolo týchto päť bodov z obrazu porovnávaných so skutočnými rozmermi značky. Do výpočtov boli zahrnuté *matica_{kamery}* a *vektor_{skreslení}*, ktoré boli získané pri kalibrácii kamery.
11. Algoritmus teraz vrátil polohu háku v pixloch (pre neskoršie vykresľovanie v obraze) a tiež aj metrickú informáciu o posunutí háku voči kamere

v osiach x, y, z a tiež aj rotáciu značky voči kamere okolo osí x, y, z pre ostatné metrické výpočty iných procesov.

Algoritmus spolu so značkou boli napokon testovaná v prostredí, v ktorom boli voľne pohodené veľmi podobné, nie však rovnaké značky. Dokonca boli stiahnuté z internetu fotografie, či vyextrahované fotografie z videí, ktoré zobrazovali pracovné prostredia stavebného priemyslu, v ktorých najčastejšie takýto vežový žeriav operuje. Značku sa nepodarilo nájsť na žiadnom z obrázkov.

2 Overenie riešenia

V predchádzajúcich kapitolách boli analyzované rôzne problémy, ktoré vznikajú pri riadení. Následne sa navrhli konkrétne riešenia a tie boli aj implementované prostredníctvom aplikácie napísanej v jazyku *C*. Teraz už ich iba zostáva overiť na niektorých typických problémových situáciách, ktoré sa v praxi vyskytujú.

2.1 Porovnanie modelu a reálneho systému

Úspešne implementovaný model žeriava bol paralelne spustený spolu s riadnym fyzikálnym modelom žeriava pri všetkých nasledujúcich experimentoch. Model si neustále upravoval svoje stavy podľa reálneho systému. Vstupom do neho boli rovnaké signály rýchlosti, aké boli posielané aj do fyzikálneho modelu (obr. 2.1). Výstupné údaje z modelu mali estimovať výpadky detekcie háku a zvyšovať tak schopnosť navrhnutého riešenia reagovať na poruchy.

2.1.1 Demonštrácia využitia modelu pri výpadkoch detekcie háku

Pri tomto type experimentu bol spustený model paralelne s reálnym systémom. Obrázok 2.2 prezentuje celý priebeh merania. Pre lepšiu analýzu bude graf rozdelený na jednotlivé zaujímavé časové intervaly:

2.7 – 3.5[s]: Kyvadlo bolo vychyľované rukou diagonálne v rámci kamery a následne bolo uvoľnené.

3.5 – 12.8[s]: Kyvadlo už samovoľne osciluje bez zásahu ruky či motorov. Tu je možné pozorovať čiastočné výpadky detekcie háku, ktorá je ihneď nahrádzaná modelom, ktorý generuje signál výchylky bremena pre ostatné radiace štruktúry. Akonáhle príde nová vzorka skutočnej polohy háku, model preberie skutočnú polohu háku a uhlová rýchlosť kyvadla je vypočítavaná z aktuálnej reálnej polohy háku a predchádzajúcej modelovej polohy.



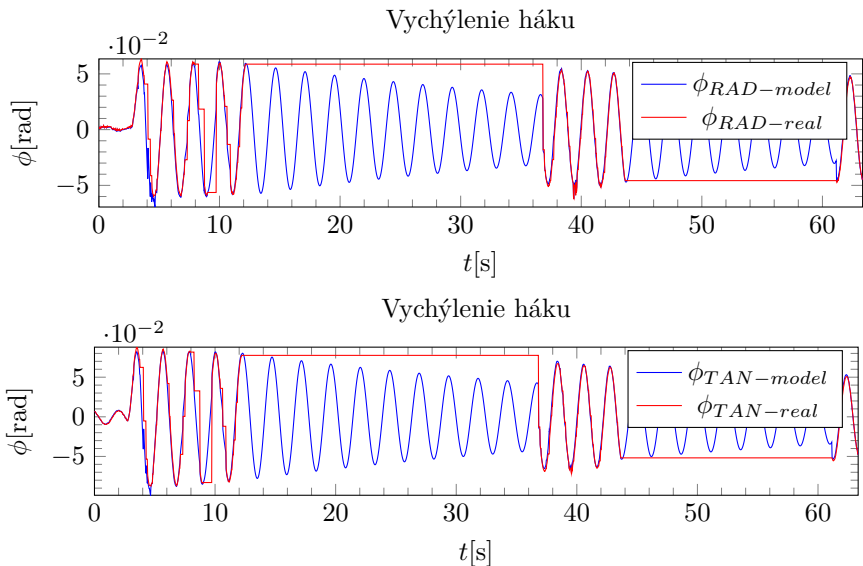
Obr. 2.1: Vytvorený fyzikálny model vežového žeriavu

12.2 – 36.8[s]: Kamera je prekrytá rukou. Teraz už model kompletne nahrádza reálny systém a poskytuje tak informácie o polohe háku pre iné procesy. Tu je dobré si všimnúť zlé identifikované tlmenie systému Kyvadla. V ďalších simuláciách sa už viac priblížilo k reálnemu tlmeniu systému.

36.8 – 43.6[s]: Na začiatku intervalu si treba všimnúť takmer dokonalé nadviazanie reálneho systému na model. Opäť sú tu čiastočné výpadky detekcie háku.

43.6 – 61.1[s]: Experiment s prekrytím kamery rukou sa zopakoval. V čase 61.1[s] bola ruka z kamery stiahnutá práve v momente, keď kyvadlo dosahovalo maximálnu výchylku a teda prudko sa menilo uhlové zrýchlenie kyvadla. Keďže derivácia bola vypočítavaná z rozdielu skutočnej pozície háku a simulovanej mohli vzniknúť takéto nedokonalosti. Tie boli neskôr odstránené použitím filtra.

Experiment teda potvrdil dobre identifikované parametre reálneho sys-



Obr. 2.2: Adaptácia modelu z reálneho systému a úplná náhrada vizuálnej spätnej väzby pomocou modelu

tému (konkrétne frekvencia a tlmenie) a model bol navyše použitý aj ako kompenzácia výpadku detekcie značky.

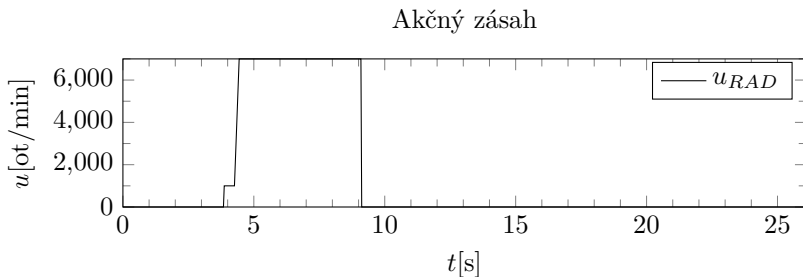
2.1.2 Asistencia modelu pri výpadkoch detekcie háku počas akčného zásahu

V rámci experimentovania a overovania matematického modelu bolo treba otestovať aj schopnosť modelu reagovať na vstupný signál rýchlosti. Tým by sa dalo overiť, či zosilnenie systému (čitateľ prenosu) je dobre identifikovaný. Celý priebeh experimentu je zobrazený na obr.2.4.

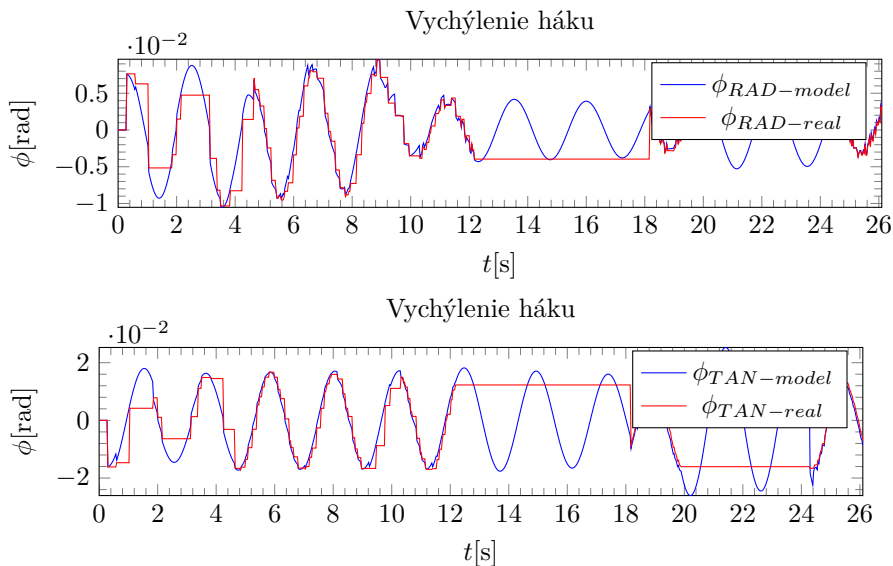
Experiment bol realizovaný po západe slnka, čo sa odzrkadlilo aj na častých výpadkoch detekcie háku. Opäť bude celý priebeh analyzovaný po jednotlivých významných časových intervaloch:

$-\infty - 3.87[s]$: Kyvadlo samovoľne oscilovalo v radiálnom aj axiálnom smere.

$3.87[s]$: Bol privedený akčný zásah v radiálnom smere v podobe skokovej



Obr. 2.3: Akčného zásahu v radiálnom smere počas výpadku kamery



Obr. 2.4: Spolupráca modelu a reálneho systému pri výpadkoch kamery a pridaním akčného zásahu v radiálnom smere počas výpadku kamery

zmeny rýchlosti z 0 – 1000[ot./min]

4.44[s]: Ďalší privedený akčný zásah v radiálnom smere v podobe skokovej zmeny z 1000 – 7000[ot./min]

9.12[s]: Vynulovanie signálu rýchlosti.

0 – 12.18[s]: V tomto časovom intervale je možné pozorovať silné výpadky detekcie háku. Model pomerne dobre nahrádzal chýbajúce stavy polohy pre vykresľovanie grafov, či pre iné moduly.

12.18 – 18.18[s]: Kamera bola prekrytá rukou.

18.18 – 19.89[s]: Háč opätovne detegovaný v intervale polperiódy kmitu, kedy sa bohužiaľ ruka ocitla mimo kamery.

19.89 – 24.27[s]: Opätovné prekrytie dlaňou.

24.27 – ∞ [s]: Odkrytie kamery.

Približne v prvej tretine merania je možné pozorovať dlhodobé výpadky detekcie a súčasne bolo zrealizovaných niekoľko skokových zmien rýchlosti.

Experiment v tomto prípade potvrdil, že model so svojim identifikovaným zosilnením je veľmi podobný reálnemu systému a teda aj ich odozvy na akčný zásah sú podobné.

Počas celej dĺžky trvania experimentu 26.28[s] bolo 686 snímok z celkového počtu 877 takých, na ktorých háč nebol úspešne detegovaný. Je to spôsobené dlhými prekrytiami kamery rukou aj výpadkami za šera.

2.2 Základné pohyby žeriavu

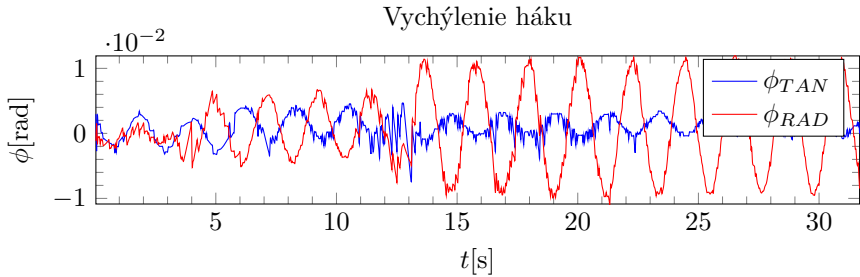
Nasledujúce experimenty budú realizované pri pokojovom stave kyvadla. Kyvadlo bolo vždy pred experimentom čo najlepšie ustálené rukou. Realizovali sa skokové zmeny rýchlosti, či zmeny rýchlosti generovanej joystickom (tie do istej miery nahrádzajú signálom typu rampa, a tie sa teda realizovať už nebudú) v radiálnom a aj tangenciálnom smere.

2.2.1 Odozva kyvadla na skokovú zmenu rýchlosti

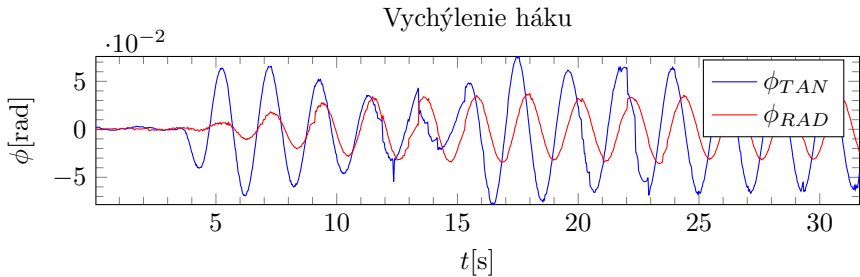
V tomto prípade sa vozík žeriavu pohyboval v takmer celom pracovnom rozsahu t.j. 0.25 – 0.65[m] od veže. Vykonala sa jedna skoková zmena rýchlosti na začiatku experimentu a tesne v okolí vzdialenosti 0.65[m] od veže sa signál rýchlosti vynuloval.

Privedený signál spôsobil vybudenie oscilácií v radiálnom smere. Keďže maximálne možné translačné zrýchlenie v radiálnom smere je pomerne malé a vstupuje do systému Kyvadla s malým zosilnením, vzniknuté oscilácie nemajú veľkú amplitúdu.

Podobný experiment sa konal aj pri rotačnom pohybe nosníka. Opäť sa vykonala jedna skoková zmena rýchlosti na začiatku experimentu a nosník žeriava sa otočil vždy približne o 90[°] a následne sa signál rýchlosti vynuloval.



Obr. 2.5: Odozva systému Kyvadlo v radiálnom smere na jednotkový skok rýchlosti



Obr. 2.6: Odozva fyzikálneho modelu v tangenciálnom smere na jednotkový skok rýchlosti

Privedený signál v tomto prípade spôsobil vybudenie oscilácií nielen v tangenciálnom ale i radiálnom smere. To má za následok odstredivé zrýchlenie, ktoré pôsobilo na bremeno v radiálnom smere počas pohybu po štvrt kružnici.

2.3 ZV tvarovač

Tento typ tvarovača upravuje signál pomocou presne vypočítaných zosilnení a časových intervalov prislúchajúcim k špecifickým parametrom systému. Preto je dôsledná znalosť systému a teda aj jeho presná identifikácia veľmi dôležitá. Tento typ riadenia by mal zamedziť osciláciám bremena v ustálených stavoch. Pri experimentoch bol takto upravovaný signál z klávesnice a joysticku a následne odosielaný priamo na motory 1 a 2. V radiálnom smere

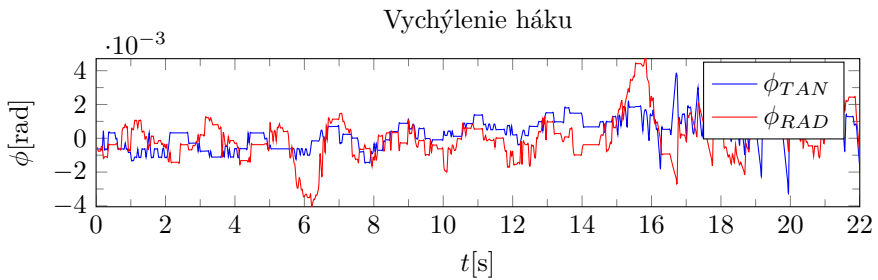
bol použitý jeden ZV tvarovač, pre tlmenie oscilácií kyvadla. V tangenciálnom boli použité dva tvarovače ZV. Jeden kvôli osciláciám generovaných spojkou a druhý pre kyvadlo.

V oboch smeroch dochádzalo k oneskoreniam medzi povelom operátora. Pri radiálnom to bolo o polperiodu $T_{kyvadlo}/2$ a pri tangenciálnom o $(T_{kyvadlo}/2 + T_{spojka}/2)$. Preto bolo zavedený aj obvod predikcie polohy bremena, ktorý bol pre operátora vysvietený na monitore v podobe červeného bodu.

Nasledujúce experimenty budú realizované pri pokojovom stave kyvadla. Kyvadlo bolo vždy pred experimentom čo najlepšie ustálené rukou. Realizovali sa skokové zmeny rýchlosti, či zmeny rýchlosti generovanej joystickom v radiálnom a aj tangenciálnom smere.

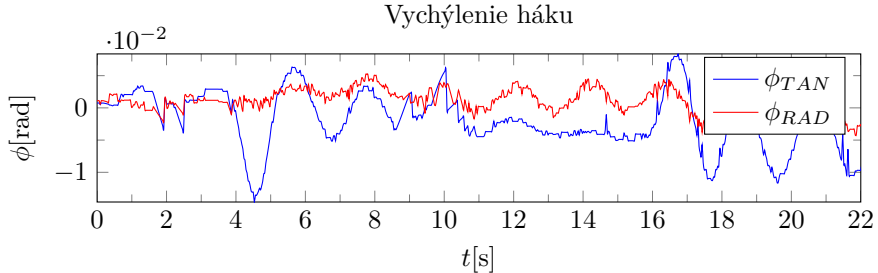
2.3.1 Odozva fyzikálneho modelu na skokovú zmenu rýchlosti

V tomto prípade bol signál generovaný operátom z klávesnice tak, aby sa vozík žerjavu pohyboval v takmer celom pracovnom rozsahu t.j. $0.25 - 0.65[m]$ od veže. Vykonala sa jedna skoková zmena rýchlosti na začiatku experimentu v čase $5.37[s]$ a tesne v okolí vzdialenosti $0.65[m]$ dal operátor pokyn k vynulovaniu rýchlosti (čas $15[s]$). Odozva systému je potom vyobrazená na obr. 2.7.



Obr. 2.7: Odozva fyzikálneho modelu v radiálnom smere na jednotkový skok s použitím ZV tvarovača

Hoci boli vybudené mierne oscilácie v radiálnom smere pri porovnaní so signálom nameraným v kap. 2.2.1 obr. 2.5, kde nebola použitá žiadna úprava signálu, bola amplitúda reziduálnych oscilácií približne 5-krát menšia. Teoreticky by v ustálených stavoch už nemali byť žiadne, avšak na danom modeli existujú aj frekvenčne vyššie oscilačné módy, ktoré boli vybudené a neidentifikované.



Obr. 2.8: Odozva fyzikálneho modelu v tangenciálnom smere na jednotkový skok s použitím ZV tvarovača

Podobný experiment sa konal aj pri rotačnom pohybe žeriava. Opäť sa vykonala jedna skoková zmena rýchlosti na začiatku experimentu v čase 6.15[s] a nosník žeriava sa začal otáčať a v čase 17.61[s]. Keď sa už operátor blížil k pootočeniu o 90[°], signál rýchlosti vynuloval. Odozva systému je potom vyobrazená na obr. 2.8. V porovnaní z obr. 2.6 z kap. 2.2.1 je amplitúda reziduálnych oscilácií až 7-krát menšia.

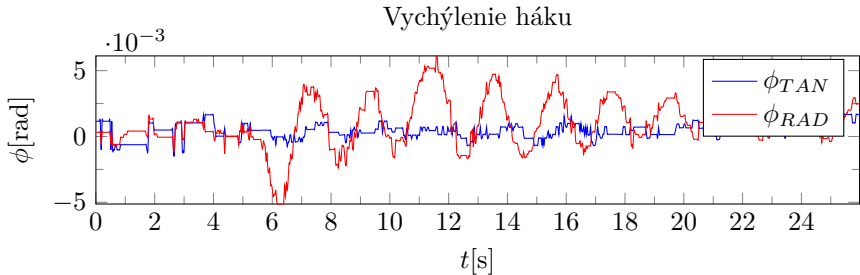
2.4 Spätnoväzobné riadenie

Pri manipulácii s bremenom vo vonkajších priestoroch možno pozorovať na reálnych žeriavoch tzv. plachetnicový efekt. Bremeno svojou veľkosťou zachytáva poryvy vetra a je samovoľne vychyľované radiálnym či tangenciálnym smerom od vozíka. Využitím spätnej väzby s vizuálneho systému a dobre navrhutej detekcie značky je možné sledovať akúkoľvek zmenu v polohe háku. Následne môžu byť nasadzované ľubovoľné spätnoväzobné algoritmy, ktoré budú asistovať operátorovi pri potlačaní oscilácií bremena.

2.4.1 Prenášanie bremena pomocou spätnej väzby

V nasledujúcom experimente riadil operátor žeriav prostredníctvom joysticku a spätnoväzobného algoritmu nulovej výchylky. Bremeno bolo prenášané v rozsahu 0.65 – 0.25[m] od veže. Operátor vykonal prudký pohyb joystickom na maximálny rozsah a vo vzdialenosti 0.25[m] od veže prudko uvoľnil joystick (obr. 2.9).

PID regulátor bol nastavený tak, aby sa k jeho akčnému zásah mohol ešte pripočítať signál z joysticku a nedochádzalo k saturácii rýchlosti. Napriek

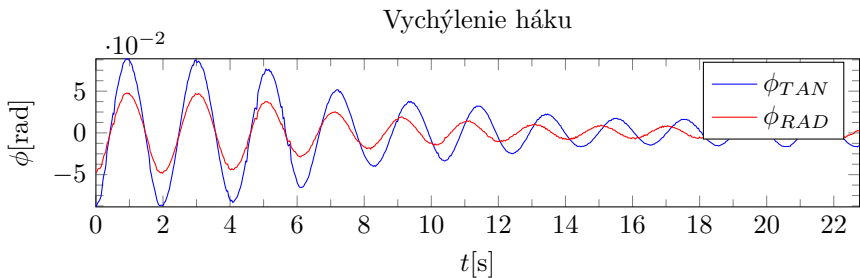


Obr. 2.9: Vyžitie spätnej väzby pri prenášaní bremena

tomu, že boli vybudené oscilácie, sú postupne pomocou regulačnej slučky potláčané (obr. 2.9).

2.4.2 Potlačenie vzniknutých oscilácií

Pri tomto experimente bolo bremeno rozkývané rukou. Následne bol čas 3.45[s] zapnutý spätňoväzobný algoritmus na potlačenie oscilácií a v čase 19.6[s] vypnutý.



Obr. 2.10: Potlačenie vzniknutých oscilácií - priebeh jednotlivých vychýlení kyvadla

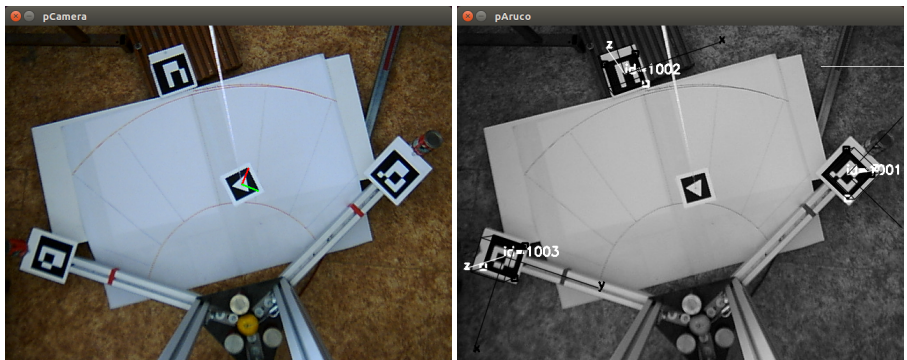
Ako vidno z priebehov akčných zásahov (obr. 2.10) operátor už do tohto experimentu nezasahoval pohybom joysticku iba zapínal a vypínal algoritmus podľa potreby. Pri iných experimentoch sa testovali aj ručne ladené zosilnenia *PID* či rôzne zosilnenie pre anti-windup štruktúru, ktorá ovplyvňovala

integračnú zložku regulátora. V niektorých prípadoch sa ukázalo, že na rýchle potlačenia oscilácií stačí iba *PD* regulátor. Avšak tu dochádzalo k pomerne častej saturácii maximálnej rýchlosti, kde už operátor nemohol prispievať signálom z joysticku.

Takýto spätnoväzobný mechanizmus by bolo možné využiť aj pri synchronizovanom prenášaní dlhých bremien, kedy musia spolu kooperovať dva žeriavy. Napríklad pri osádzaní veľmi dlhých prekladov, pri ktorých na seba žeriavníci nemusia ani vidieť by jeden z nich bol „*Master*“ a ťahal by bremeno spolu s hákom druhého „*Slave*“ žeriavu, ktorý by mohol robiť už iba mierne korekcie zrotovanie nosníka na miesto osadenia.

Tiež by sa našlo uplatnenie tohto typu riadenia aj pri ukladaní, či osádzaní ľahších objektov na miesto určenia. Navigátor na zemi by už nemusel vysielacťou alebo gestami dávať pokyn žeriavnikovi, ale sám by dokázal objekt mierne vychýliť a žeriav by ho sledoval. Pravdaže musela by tu byť vyriešená aj bezpečnosť, a teda navigátor by musel mať neustále stlačené bezpečnostné tlačidlo, pomocou ktorého by preberal kontrolu nad žeriavom, doplnené o tlačidlá navíjania a odvíjania lana háku. Tým by sa pravdepodobne zrýchlili ukladania menších objektov na miesto určenia.

2.5 Ukážka merania



Obr. 2.11: Pohľad z kamery umiestnenej na vozíku pre detekciu značiek

3 Zhodnotenie

3.1 Vyhodnotenie experimentov

V kap. 2 Overenie riešenia boli realizované experimenty, ktoré môžu nastať aj pri riadení reálnych žeriavov. Hoci boli realizované aj mnohé iné experimenty napr. pokusy riadiť laboratórny model s laickými operátormi bez použitia algoritmov potláčajúcich oscilácie a s použitím, už neboli spísané v tejto práci, ale budú neskôr uverejnené v iných publikáciách autora.

Ešte pred samotným testovaním riadiacich štruktúr bola overená presnosť pozície žeriavového háku voči konkrétnemu bodu v komore pri odvíjaní lana v určitom rozsahu. Vznikla tu veľmi veľká presnosť, ktorá potvrdila, že ofsetové kalibračné krivky sú nastavené správne a nebude tu dochádzať pri sledovaní háku k trvalej regulačnej odchýlke.

Pri prvom experimente bolo preukázané, ako môže dobre identifikovaný model systému pomôcť pri estimácii polohy háku pri výpadkoch detekcie značky. Kamera tu bola prekrytá rukou a opätovne po určitom čase odokrytá pričom po odkrytí sa skutočná pozícia háku napojila na pozíciu, ktorú dovtedy generoval model. Potvrdili sa tým dobre identifikované parametre systému (frekvencia a tlmenie).

Pri ďalšom podobnom experimente bol už privedený akčný zásah do modelu aj reálneho systému. Opäť odozva modelu bola veľmi podobná tej z reálneho systému vďaka dobre identifikovaným parametrom (zosilnenie, tlmenie, frekvencia).

Pri ďalších meraniach bola zaznamenávaná výchylka kyvadla, ako reakcia na jednotkový skok rýchlosti, či signál rýchlosti generovaný joystickom. Pri oboch vstupných signáloch rýchlosti boli vybudené oscilácie bremena, ktoré odozneli až po veľmi dlhom čase. Tu sa teda poukázalo na potreby využitia riadiacich štruktúr, ktoré sú témou tejto práce nevybudia reziduálne oscilácie alebo potláčia už vzniknuté oscilácie.

Ďalej boli testované tvarovače pre potlačenie oscilácií vybudene v nosníku prostredníctvom pružnej spojky, či kmity kyvadla vybudené zrýchlením vozíka v radiálnom alebo tangenciálnom smere. Preukázalo sa, že nasadené tvarovače dokázali niekoľkonásobne potlačiť oscilácie kyvadla pri použitých signáloch skok a signál z joysticku. Hoci takéto algoritmy spôsobovali oneskorenie

medzi povelom operátora a skutočným pohybom žeriavu, tento neduh bol kompenzovaný obvodom predikcie, ktorý v dostatočnej vzdialenosti označoval miesto zastavenia bremena operátorovi na obrazovke.

Vhodnosť algoritmu nulovej výchylky bol testovaný prostredníctvom operátora, ktorý v súčinnosti s ním riadil žeriav. Bolo preukázané, že ak sa vhodne nastaví parametre regulátora a nebude dochádzať k saturácii rýchlosti, operátor môže pohodlne riadiť žeriav, pričom akékoľvek vzniknuté poruchy, výchylky kyvadla by boli ihneď odstraňované.

Pri ďalšom experimente s algoritmom nulovej výchylky, bolo bremeno vychýlené rukou a zapnutý algoritmus. Tým sa mala demonštrovať jeho vhodnosť pri potláčaní už vzniknutých oscilácií bremena, ktoré by v reálnom prostredí vznikli vplyvom konštrukcie alebo vetra. Ukázalo sa, že boli postupne znižované amplitúdy meraných výchyliek. Rýchlosť potláčania amplitúdy vzniknutých oscilácií je možné meniť pomocou zvyšovania dynamiky celého systému prostredníctvom zvyšovania zosilnení regulátora využívajúce spätnú väzbu od výchylky bremena.

Posledným realizovaným experimentom bolo zdvíhanie dlhého bremena. V tomto prípade sa použil tiež algoritmus nulovej výchylky bremena. Operátor teraz ovládal iba navíjanie lana, ale mohol zasahovať aj v ďalších dvoch riadených osiach žeriavu. V tomto prípade počas celého navíjania lana vozík sledoval značku háku a neustále robil také korekcie, aby vzdialenosť medzi značkou a vozíkom bola čo najmenšia. Inak povedané, zabezpečoval nulovú výchylku lana v radiálnom či tangenciálnom smere.

Všetky experimenty tak potvrdili, že má zmysel nasadzovať takéto algoritmy, ktoré by kooperovali s operátorom žeriavu a pomáhali potláčať oscilácie. Tým by sa mohli znížiť aj časy prekladania bremien a znížiť kolízie oscilujúceho bremena s okolím.

Hoci boli navrhnuté riešenia tejto práce aj experimentálne overené na fyzikálnom modeli nemusia rovnako fungovať aj na reálnych zariadeniach. Avšak pri dôkladnej hĺbkovej analýze práve konkrétnych reálnych zariadení a určitej modifikácií navrhnutých algoritmov by mnohé z týchto riešení mohli skvalitniť proces prenášania bremien v rôznych odvetviach priemyslu.

3.2 Prínosy dizertačnej práce

Riešenia tejto dizertačnej práce priniesli mnohé prínosy pre aplikovaný výskum v oblasti riadenia žeriavov pomocou vizuálneho systému. Mnohé navrhnuté teoretické metódy boli aj prakticky overené na vytvorenom fyzikálnom modeli.

Preukázalo sa, že vizuálny systém je možné nasadzovať pri identifikáciách

aj pri riadení reálneho systému, pričom sa dosahovala aj pomerne vysoká presnosť. Práve možnosť bezkontaktného snímania a pomerne jednoduchého nasadenia na ľubovoľný typ žeriavu je možné prezentovať prostredníctvom výsledkov experimentov realizovaných v tejto práci.

Tiež sa tu poukázalo na vhodnosť modelovania a presného identifikovania parametrov modelu. To umožnilo veľmi rýchle ladenie zosilnení riadiacich štruktúr v simulačnom prostredí, a tie isté mohli byť plynule nasadzované aj na laboratórnom modeli.

Modulárnosť celého navrhnutého softvérového riešenia umožnila testovať rôzne druhy algoritmov detekcie háku, ladenia po jednotlivých moduloch a následného spájania do jedného komplexného celku.

Tiež bola celá práca realizovaná pomocou voľne dostupných simulačných prostredí *Scilab/Xcos*, *Octave*, operačného systému *Ubuntu*, aby sa poukázalo aj na ich využiteľnosť pri riešení praktických problémov či pri edukácií v školstve.

Výsledky tejto práce budú pravdepodobne v blízkej dobe testované aj na reálnych mostových žeriavoch vybavených lanom a hákom, kde by práve navrhnutý systém detekcie háku prostredníctvom vizuálneho systému mohol dostať svoj priestor. Pre iné typy mostových žeriavov napr. s pevným vertikálnym nosníkom nahrádzajúci lano a ukončený hákom, či lopatovým mechanizmom by bol modul kamery nahradený v navrhnutom systéme modulom čítajúcim údaje z akcelerometra. Tu sa predpokladá, že v konštrukciách budú vznikať vyššie frekvencie, ktoré by pravdepodobne neboli detegovateľné kamerou. Aj v tejto oblasti už započal výskum.

4 Záver

V súčasnosti sa kladie veľký dôraz na znižovanie nákladov a zrýchľovanie procesných úkonov. Preto je veľmi dôležité hľadať nové inovatívne metódy, pomocou ktorých vieme dosahovať vytýčené ciele. Efektívne riadenie žeriavov je nepochybne jednou veľkou výzvou z pohľadu automatizácie, a preto sa práve táto práca naň detailnejšie zamerala.

Pri operátorskom riadení žeriavov dochádza k vybudeniu kmitov, ktoré vedú k oneskorenému dosiahnutiu želaného cieľa, či ku kolíznym situáciám. Preto bolo potrebné zaviesť určité riadiace prvky, ktoré urýchlia, zefektívnia proces prenášania bremien operátorovi.

Táto práca sa zaoberala práve riadením slabo tlmených mechatronických systémov, u ktorých vznikajú oscilácie pri prenášaní bremena. Sú v nej popísané jednotlivé metódy, ktoré sú navrhnuté po dôkladnej analýze riadeného

systemu, práve na potláčanie neželaných oscilácií.

Detailne tu boli spracované rôzne typy modelov žeriavov, ktoré by v budúcnosti opäť mohli poslúžiť pri návrhu nových spôsobov riadenia vo voľne dostupných simulačných prostrediach. Tým sa zjednoduší a urýchli vývoj, a tiež aj testovanie navrhovaných algoritmov, ktoré budú neskôr nasadené na reálnych systémoch.

Tiež pomocou vhodnej voľby a umiestnenia značky na háku bolo možné merať aj dĺžku lana. Poukázalo sa tu aj na možnosť využiť kameru za účelom získavania parametrov systému pre účely modelovania, či návrhu zosilnení riadiacich štruktúr.

Práca sa podrobne zaoberala riadením žeriavov pomocou dopredných metód bez využitia spätnej väzby, so zameraním na spektrálnu úpravu riadiaceho signálu, ktorá vedie k zamedzeniu vzniku reziduálnych kmitov.

Tiež tu boli navrhnutá a otestovaná spätnoväzobná riadiaca štruktúra pre potlačenie vzniknutých oscilácií. Tá bola poňatá netradične - pomocou vizuálneho systému. Využitím kamery, umiestnenej na vozíku žeriava, bolo možné snímať a presne určovať pozíciu zaveseného bremena, a sledovať tak procesnú veličinu, ktorá bola porovnávaná so žiadanou, a následne bol generovaný akčný zásah z regulátora.

Práca teda poskytla prehľadnú štúdiu riadiacich algoritmov slabo tlmených systémov, špeciálne teda žeriavových systémov.

V súčasnosti sa navyše aplikujú nové prísnejšie pravidlá ohľadom bezpečnosti práce, pri ktorých by práve vizuálny systém umiestnený na žeriave mohol robiť navyše v určitom obmedzení dohľad nad celým pracoviskom. Tiež by mohol detegovať pohyb ľudí pod bremenom, alebo zaznamenávať a ukladať kolízie bremena so statickými objektami, ktorých býva v stavebnom odvetví neúrekom.

Našli sa už aj firmy, ktoré po vzhliadnutí videí z experimentov, či aktívnou účasťou na živých ukázkach algoritmov na fyzikálnom modeli, prejavili záujem a sprístupnili by tak autorovi niektoré reálne žeriavové systémy pre ďalšie rozširujúce testovanie.

Víziou do budúcnosti, teda pokračovaním tejto práce, je syntéza signálov z akcelerometrov umiestnených v rôznych častiach konštrukcie, predovšetkým na vozíku žeriava pre presnejšie identifikovanie ostatných oscilačných módov žeriavu. Ďalej pokračovať v detekcii háku prostredníctvom vizuálneho systému avšak už bez použitia značiek, a teda s využitím učiacich sa metód. Tiež aj implementácia iných spätnoväzobných riadiacich štruktúr, ktoré by mohli úspešne eliminovať oscilácie.

Literatúra

- [1] P. Hubinský, T. Pospiech, B. Vranka. *Slosh-free Positioning Of Liquid- Containers Using A Machine With Flexible Conveyor Belt*. 9th International Conference CONTROL OF POWER SYSTEMS 2010, Máj 18-20, Tatranské Matliare, Vysoké Tatry, Slovensko. Zborník na CD ROM. ISBN978-80-89402-24-3
- [2] M. Vaněk, K. Strnad, P. Noksievič. *Použití programu matlab - simulink a virtual reality toolboxu při návrhu a experimentálním ověření řízení jeřábové kočky*. VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení.
- [3] M. Strižko. *Aplikácia metód eliminácie reziduálnych kmitov v mechatronickom systéme s dvojitým kyvadlom*. Diplomová práca, Slovenská technická univerzita, Bratislava, 2005.
- [4] F Ju, Y Choo, and F Cui. *Dynamic response of tower crane induced by the pendulum motion of the payload*. International Journal of Solids and Structures, 43(2):376–389, 2006.
- [5] J. Štefanka, P. Hubinský. *Riadenie slabo tlmeného polohového systému s elimináciou reziduálnych kmitov a predikciou polohy*. AT&P Journal Plus č.1: Mobilné robotické systémy (2008), s.73-75. ISSN 1336-5010.
- [6] W. Singhose, N. Singer, W. Seering. *Design and implementation of time-optimal negative input shapers*. In International Mechanical Engineering Congress and Exposition, DSC 55, volume 1, s. 151–7. Citeseer, 1994.
- [7] V. Hlaváč, M. Sedláček. *Zpracování signálu a obrazu*. Vydavatelstvo ČVUT, Praha, 2005, ISBN 80-01-03110-1.
- [8] P. Hubinský. *Riadenie mechatronických systémov s nízkym tlmením*. Vydavateľstvo STU, Bratislava, 2010, ISBN 978-80-227-3310-1.
- [9] W.E. Singhose. *Command generation for flexible systems*. Dizertačná práca, 1997.
- [10] A.I. Zverev. *Handbook of filter synthesis*. Wiley, 1967.
- [11] N. C. Singer, W. P. Seering. *Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration*, 1990.
- [12] N.C. Singer. *Residual vibration reduction in computer controlled machines*. Dizertačná práca, 1989.

- [13] N.C Singer, N. St. Suite, W. P. Seering. *An Extension of Command Shaping Methods for Controlling Residual Vibration Using Frequency Sampling The Impulse Shaping Method*. Mechanical Engineering, s. 800-805, 1992.
- [14] O.J.M. Smith . *Feedback Control Systems*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1958
- [15] B.W. Rappole, N.C. Singer, W.P. Seering. *Input shaping with negative sequences for reducing vibrations in flexible structures*. In American Control Conference, 1993, n. 6, s. 2695–2699. IEEE.
- [16] John Y Hung. *Posicast Control Past and Present*. Engineering Education, 2(1):s. 7-11, 2007.
- [17] M.a. Ahmad, H. Ishak, A.N.K. Nasir, M.S. Ramli. *Comparison of Active Sway Control of a Gantry Crane System*. PhD thesis, 2009.
- [18] A. Bockstedte, E. Kreuzer. *Crane Dynamics with Modulated Hoisting*. Pamm, 5(1): s. 83-84, December 2005.
- [19] A. Bockstedte and E. Kreuzer. *Hoisting Manipulation for Flying Cranes*. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 290: s.289–290, 2006.
- [20] A. Seyranian. *The swing: Parametric resonance*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 68(5): s.757–764, 2004.
- [21] M.A. Pinsky, A.A. Zevin. *Oscillations of a pendulum with a periodically varying length and a model of swing*. International journal of non-linear mechanics, 34(1): s.105–109, 1999.
- [22] A. O. Belyakov, Alexander P. Seyranian, Angelo Luongo. *Dynamics of the pendulum with periodically varying length*. Physica D: Nonlinear Phenomena, 238(16): s.1589–1597, 2009.
- [23] E. Kreuzer,C. Rapp. *Modal Coupling for Active Damping of Load Swing of Container Cranes*. Pamm, 10(1): s.625–626, December 2010.
- [24] K. Chen, Ch. Peng, W. Singhose. *A vision-based predictive hook-tracker for industrial cranes*. Sound And Vibration, s.18–22, 2010.
- [25] Hideki Kawai, Young Bok Kim, Yong Woon Choi. *Anti-sway system with image sensor for container cranes*. Journal of Mechanical Science and Technology, 23(10): s.2757–2765, 2009.

- [26] Faisal Altaf. *Modeling and Event-Triggered Control of Multiple 3D Tower Cranes over WSNs*. Electrical Engineering, 2010.
- [27] Jason W Atwood, Adam B Reich, William E Singhose. *Robustness of Input Shaping to Non-linear Crane Dynamics*. Mechanical Engineering.
- [28] David Bowling, Gregory Starr, John Wood, Ron Lumia. *Wide Band Suppression of Motion-Induced Vibration*. Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, s. 4530–4536.
- [29] T.H. Bradley, J. Danielson, J. Lawrence, W. Singhose. *Command Shaping Under Nonsymmetrical Acceleration and Braking Dynamics*. Journal of Vibration and Acoustics, 130:054503, 2008.
- [30] Eugene I Butikov. *Parametric resonance in a linear oscillator at square-wave modulation*. European Journal of Physics, 26(1): s.157–174, 2005.
- [31] M.P. Cartmell, L. Morrish, A.J. Taylor. *Dynamics of spreader motion in a gantry crane*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 212(2):85–105, 1998.
- [32] Cheng-yuan Chang, Kuo-hung Chiang, and A System Description. *The nonlinear 3-D crane control with an intelligent operating method*. 2008 SICE Annual Conference, s.2917–2921.
- [33] T. Crane. *Design, Construction and Control of a Novel Tower Crane*. masterbuilder.co.in, 1(180): s.119–126, 2007.
- [34] D. Economou, I. Antoniadis. *Vibration Reduction of Gantry Crane Loads with Hoisting Using Finite Impulse Response (FIR) Digital Filters*. wseas.us.
- [35] S. Garrido, M. Abderrahim, a. Gimenez, R. Diez, C. Balaguer. *Anti-Swinging Input Shaping Control of an Automatic Construction Crane*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 5(3):549–557, 2008.
- [36] G.Glossiotis, I.Antoniadis. *Payload sway suppression in rotary cranes by digital filtering of the commanded inputs*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 217(2): s.99–109, 2003.
- [37] J.R. Huey. *The intelligent combination of input shaping and PID feedback control*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 2006.

- [38] Hubinský P., Ivanov I. *Riadenie systémov s malým tmením*. AT&P Journal Plus 5/2004,s.28-31, ISSN 1336-5010
- [39] S.C. Kang, Eduardo Miranda. *Physics based model for simulating the dynamics of tower cranes*. In International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, ICCCBE, Weimar, Bauhaus-University, Germany, volume 10, s.248–253, 2004.
- [40] M. Kenison, W. Singhose. *Input shaper design for double-pendulum planar gantry cranes*. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications (Cat. No.99CH36328), s. 539–544, 1999.
- [41] L. Jurišica, P. Hubinský, J. Kardoš. *Robotika, študijné materiály (nepublikované)*, 2005.
- [42] P.S Landa, A.A Zaikin, M.G Rosenblum, J Kurths. *Control of noise-induced oscillations of a pendulum with a randomly vibrating suspension axis*. Physical Review E, 56(2): s.1465, 1997.
- [43] Jason Lawrence, William Singhose, Keith Hekman. *Friction-Compensating Command Shaping for Vibration Reduction*. Journal of Vibration and Acoustics, 127(4): s.307, 2005.
- [44] N.A. Nayfeh. *Adaptation of delayed position feedback to the reduction of sway of container cranes*. PhD thesis, 2002.
- [45] Hahn Park, Dongkyoung Chwa, Keum-shik Hong. *A feedback linearization control of container cranes: Varying rope length*. International Journal of Control Automation and Systems, 5(4): s.379, 2007.
- [46] Alessandro Pisano, Stefano Scodina, Elio Usai. *Load swing suppression in the 3-dimensional overhead crane via second-order sliding-modes*. In Variable Structure Systems (VSS), 2010 11th International Workshop on, s. 452–457. IEEE.
- [47] J. Puffer. *Knihovna input shaping pro Matlab*. PhD thesis, 2007.
- [48] Naiming Qi, Kai Dong, Xianlu Wang, Yunqian Li. *Spacecraft Propellant Sloshing Suppression Using Input Shaping Technique*. 2009 International Conference on Computer Modeling and Simulation, s.162–166.
- [49] T. Singh, W. Singhose. *Input shaping/time delay control of maneuvering flexible structures*. Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No.CH37301), s. 1717–1731.

- [50] W Singhose. *Effects of hoisting on the input shaping control of gantry cranes*. Control Engineering Practice, 8(10): s.1159–1165, 2000.
- [51] S. Skogestad, I. Postlethwaite. *Multivariable feedback control analysis and design*, volume 8. John Willey & sons, New Yourk, 1998.
- [52] Khalid L. Sorensen, William Singhose, and Stephen Dickerson. *A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes*. Control Engineering Practice, 15(7): s.825–837, 2007.
- [53] J. Vaughan, Anderson Smith, William Singhose. *Using a predictive graphical user interface to improve tower crane performance*. In Proceedings of the Conference, volume 664, s.17.
- [54] M. Šonka, V. Hlaváč, and Boyle. *Image processing, analysis and machine vision*, ISBN 0-534-95393-X, 1998
- [55] M. Šonka and V. Hlaváč. *Počítačové vidění*. Grada, ISBN 80-85424-67-3, 1992.
- [56] Y. Yoshida, K. Tsuzuki. *Visual tracking and control of a moving overhead crane load*. 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2006., s. 630–635, 2006.
- [57] Yasuo Yoshida. *Feedback Control and Time-Optimal Control about Overhead Crane by Visual Servo and These Combination Control*. Transportation.

Publikované práce autora

ADM - Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

DUCHOŇ, František - DEKAN, Martin - BABINEC, Andrej - CHOVANEC, Luboš - VITKO, Anton. Detection of Welds in Automated Welding. In Applied Mechanics and Materials. Vol. 611 (2014), s. 519-528. ISSN 1660-9336.

Citované v:

1. Ivan Virgala, Michal Kelemen, Alexander Gmiterko, Tomáš Lipták. Control of Stepper Motor by Microcontroller. Journal of Automation and Control. Vol. 3, No. 3, 2015, pp 131-134

2. Ivan Virgala, Michal Kelemen, Tomáš Lipták, Erik Prada: Stepper Motor Control by ATMEL AVR Microcontroller. In: Applied Mechanics and Materials, Vol. 816, 2015, pp. 321-326

DUONG QUANG, Khanh - CHO VANEC, Luboš - HUBINSKÝ, Peter - VOZÁK, Daniel - MAŤUGA, Michal - VARGA, Pavol. Comparison of input shaper based on genetic algorithms with analytical approach. In International Journal of Artificial Intelligence. Vol. 15, Iss. 1 (2017), s. 21-32. ISSN 0974-0635. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85015326520.

PÁSZTÓ, Peter - KLÚČIK, Marian - CHO VANEC, Luboš - TÖLGYESSY, Michal - HANZEL, Jaroslav - DUONG QUANG, Khanh - HUBINSKÝ, Peter. Object Relative Position Estimation Based on Hough Transform Using One Camera. In International Journal of Imaging and Robotics. Vol. 13, Iss. 2 (2014), s. 1-11. ISSN 2231-525X. V databáze: SCOPUS.

Citované v:

1. EL-ATTAR, A. - TAIRI, H. - TREMEAU, A. - KARIM, M. Design and comparison of calibration algorithms of a heterogeneous 3D acquisition system composed by time-of-flight and colour cameras. In International Journal of Imaging and Robotics, 2014-01-01, 14, 3, pp. 97-111. ISSN 2231525X., SCOPUS
2. Ponglangka, Wirot - Theera-Umpon, Nipon - Auephanwiriyaikul, Sansanee. Using iris region eigenvalues for user-independent eye-gaze distance estimation in single-camera setup. In International Journal of Imaging and Robotics, 2015-01-01, 15, 3, pp. 35-42. ISSN 2231525X., SCOPUS
3. Widyotriatmo, Augie - Hong, Keum Shik. Configuration control of an autonomous vehicle under nonholonomic and field-of-view constra. In International Journal of Imaging and Robotics, 2015-01-01, 15, 3, pp. 126-139. ISSN 2231525X., SCOPUS

TÖLGYESSY, Michal - CHO VANEC, Luboš - PÁSZTÓ, Peter - HUBINSKÝ, Peter. A Plane Based Real-Time Algorithm for Controlling a Semi-Autonomous Robot with Hand Gestures Using the Kinect. In International Journal of Imaging and Robotics. Vol. 13, Iss. 2 (2014), s. 126-133. ISSN 2231-525X.

Citované v:

1. WANG, Lijun - ZHOU, Jianbin - XING, Long - ZHANG, Shenfeng. Numerical simulation and space motion trajectory analysis of 6R serial manipulators. In International Journal of Applied Mathematics and

Statistics, 2013-01-01, 51, 21, pp. 438-446. ISSN 09731377., SCOPUSg and Robotics, 2014-01-01, 14, 3, pp. 97-111. ISSN 2231525X., SCOPUS

2. MIKOVÁ, L. - MEDVECKÁ-BEŇOVÁ, S. - KELEMEN, M. - TREBUŇA, F. - VIRGALA, I. Application of shape memory alloy (SMA) as actuator. In Metalurgija, 2015-01-01, 54, 1, pp. 169-172. ISSN 05435846., SCOPUS
3. RAKESH KUMAR, S. - RAMKUMAR, K. Design of skid-steer mobile robot with single landmark based localization using visual control system. In International Journal of Imaging and Robotics, 2016-01-01, 16, 1, pp. 32-42. ISSN 2231525X., SCOPUS

TÖLGYESSY, Michal - HUBINSKÝ, Peter - CHOVANEC, Luboš - DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej. Controlling a group of robots to perform a common task by gestures only. In International Journal of Imaging and Robotics. Vol. 17, Iss. 1 (2017), s. 1-13. ISSN 2231-525X. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85011075586.

ADF - Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

HUBINSKÝ, Peter - CHOVANEC, Luboš. The Position Prediction for Bridge Crane Using Input Shaping Methods. In ATP Journal plus. č. 1 : Systémy automatického riadenia (2011), s.34-37. ISSN 1336-5010.

CHOVANEC, Luboš - HUBINSKÝ, Peter. Advanced Mathematical Model of the Tower Crane Using Visual Feedback Control. In ATP Journal plus. Č. 1 : Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems (2012), s.53-56. ISSN 1336-5010.

AED - Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

PALKOVIČ, Lukáš - RODINA, Jozef - CHOVANEC, Luboš - HUBINSKÝ, Peter. MATLAB Simulink Block for MEMS Based Attitude Sensor. In Selected Topics in Modelling and Control Vol. 8. Bratislava : Slovak University of Technology Press, 2012, s.116-120. ISBN 978-80-227-3840-8.

AFC - Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

DEKAN, Martin - CHOVANEC, Luboš - BABINEC, Andrej - VITKO, Anton. New Modules for the iRobot Create Platform. In *Procedia Engineering : Modelling of Mechanical and Mechatronics Systems. 5th International Conference. Zemplínska Šírava, Slovakia, November 6- 8, 2012. Vol. 48 (2012), s.65-72. ISSN 1877-7058.*

DEKAN, Martin - DUCHOŇ, František - CHOVANEC, Luboš - PÁSZTÓ, Peter - TÓLGYESSY, Michal. Survey: IRobot create in the educational and research process at Slovak University of Technology. In *SMMS 2015 : International conference on simulation, modelling and mathematical statistics. Chiang Mai, Thailand. November 22-23, 2015. Lancaster : DEStech Publications, 2015, S. 239-245. ISBN 978-1-60595-112-6.*

PALKOVIČ, Lukáš - RODINA, Jozef - CHOVANEC, Luboš - HUBINSKÝ, Peter. Integration of Inertial Measuring Unit Platform into MATLAB Simulink. In *9th IFAC Symposium on Advances in Control Education, June 19-21, 2012, Nizhny Novogorod, Russia. New York : IFAC, 2012, s.200-205. ISBN 978-3-902823-01-4. V databáze: SCOPUS.*

PÁSZTÓ, Peter - KLÚČIK, Marian - CHOVANEC, Luboš - SMOLÁK, Martin - HUBINSKÝ, Peter. Mobile Robot Navigation with Android Device Using OpenCv. In *IN-TECH 2012 : Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, Rijeka, Croatia, 26. - 28. 09. 2012. Rijeka : Faculty of Engineering University of Rijeka, 2012, s.499-502. ISBN 978-953-6326-77-8.*

PÁSZTÓ, Peter - SMOLÁK, Martin - DUCHOŇ, František - HUBINSKÝ, Peter - CHOVANEC, Luboš. Android based mobile robotic platform performance testing for real-time navigation. In *Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 447 Robot Intelligence Technology and Applications 4 : 4th International conference on robot intelligence technology and applications (Rita 2015). Bucheon, Korea. December 14 - 16, 2015. [s.l.] : Springer, (2016), [22] s., ISBN 978-3-319-31291-0. ISSN 2194-5357. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-84978538427.*

AFD - Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

DEKAN, Martin - CHOVANEC, Luboš - SZABOVÁ, Martina - BABINEC, Andrej. Methodology for probabilistic model creation of lidar measurement. In *EAN 2017 : 55th International conference on experimental stress analysis. Nový Smokovec, Slovakia. May 30 - June 1, 2017. Košice : Technical University*

of Košice, 2017, S. 712-721.

DUCHOŇ, František - TÖLGYESSY, Michal - CHOVANEC, Luboš - PÁSZTÓ, Peter - BABINEC, Andrej - GARDIAN, Pavol. RGB-D map for robot navigation. In ELEKTRO 2014 [elektronický zdroj] : 10th International Conference. Rajecké Teplice, Slovakia, May 19-20, 2014. Žilina : University of Žilina, 2014, CD-ROM, s. 154-158. ISBN 978-1-4799-3721-9.

Citované v:

1. HOCK, Ondrej - DRGONA, Peter - JAROS, Viliam - HAVRILA, Rastislav. Transposition method for inverse kinematics. In ELEKTRO 2016 11th International Conference, Proceedings, 2016-07-13, pp. 152-155., SCOPUS

CHOVANCOVÁ, Anežka - FICO, Tomáš - CHOVANEC, Luboš - HUBINSKÝ, Peter. Mathematical Modelling and Parameter Identification of Quadrotor (a survey). In Procedia Engineering [elektronický zdroj] : The 6th International Conference on Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems MMaMS 2014, 25-27 November 2014, Vysoké Tatry, Slovakia. Vol. 96, (2014), p. 172-181. ISSN 1877-7058.

PALKOVIČ, Lukáš - RODINA, Jozef - CHOVANEC, Luboš - CHOVANCOVÁ, Anežka - HUBINSKÝ, Peter. Remote Laboratory with Modular Inertial Measuring Unit Platform. In Procedia Engineering [elektronický zdroj] : The 6th International Conference on Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems MMaMS 2014, 25-27 November 2014, Vysoké Tatry, Slovakia. Vol. 96, (2014), p. 345-354. ISSN 1877-7058.

SZABOVÁ, Martina - DUCHOŇ, František - DEKAN, Martin - CHOVANEC, Luboš. Probabilistic localization of robot in outdoor environment using GNSS. In EAN 2017 : 55th International conference on experimental stress analysis. Nový Smokovec, Slovakia. May 30 - June 1, 2017. Košice : Technical University of Košice, 2017, S. 722-730.

VITKO, Anton - BABINEC, Andrej - DUCHOŇ, František - DEKAN, Martin - CHOVANEC, Luboš. Pokročilé technológie robotizovaného zvarovania. In Technológia zvarovania 2014 - Technológia rozvoja priemyslu Európskej únie [elektronický zdroj] : Vedecký seminár, Bratislava, 5. 6. 2014. 1. vyd. Trnava: AlumniPress, 2014, CD-ROM, [6] s. ISBN 978-80-8096-197-8.

BDF - Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

DUCHOŇ, František - CHOVANEC, Luboš - MYKHAILYSHYN, Roman - SAVKIV, Volodymyr. Pod hlavičkou Národného centra robotiky pracujú už aj odborníci zo zahraničia. In ATP Journal. Roč. 24, č. 3 (2017), s. 54-55. ISSN 1335-2237.