

dr hab. inż. Mariusz Giergiel, prof. n. AGH
Akademia Górniczo - Hutnicza
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Robotyki i Mechatroniki
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków, 17-12-2016

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Konrada Gaca
pt. „Sterownik robota hybrydowego do frezowania”

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Maciej Petko

1. Wybór tematu, cel i zakres pracy


W rozprawie podjęto temat opracowania architektury sprzętowo - programowej kompletnego sterownika prototypu pięcioosiowego robota - frezarki o hybrydowej strukturze kinematycznej, która umożliwi realizację wymaganych algorytmów z wysoką częstotliwością próbkowania. Roboty o zamkniętej strukturze kinematycznej wykorzystywane jako frezarki szybkoobrotowe dają duże możliwości obróbki materiałów przy stosunkowo małej masie takiego urządzenia, co potencjalnie skutkuje niższym kosztem wykonania i wykorzystania w stosunku do konkurencyjnych rozwiązań. Istotnym problemem stanowi jednak realizacja sterowania takich robotów - frezarek, wynikający z faktu że praktycznie nie można zastosować do tego celu sterowników klasycznych frezarek numerycznych ani sterowników robotów przemysłowych. Uważam, że są to wysoce aktualne problemy, a podjęcie tej tematyki przez doktoranta jest uzasadnione i na czasie.

Cel pracy został jasno sprecyzowany jako opracowanie architektury sprzętowo-programowej sterownika robota hybrydowego do frezowania, jej implementacja i walidacja eksperymentalna.



Postawiono przy tym następującą **tezę**: „Możliwa jest implementacja sprzętowo - programowa sterownika robota hybrydowego do frezowania o pięciu stopniach swobody tak, aby osiągnąć wysoką częstotliwość próbkowania oraz funkcjonalność 5-osiowej frezarki numerycznej.”

Recenzowana praca doktorska jest dość obszerna i obejmuje 178 stron tekstu, podzielona została na dziewięć rozdziałów w tym bibliografią liczącą 151 pozycji. Na zasadniczą część pracy składa się osiem rozdziałów. Praca podzielona została na osiem rozdziałów. Rozdział pierwszy przedstawia wprowadzenie w problematykę układów sterowania dla maszyn wytwórczych o strukturach równoległych. Przedstawiono także motywację do podjęcia pracy. W rozdziale drugim przedstawione zostały cel, teza i zakres pracy oraz krótki przegląd zawartości treści poszczególnych rozdziałów. Rozdział trzeci zawiera przegląd konwencjonalnych systemów CNC obrabiarek numerycznych oraz przegląd platform sprzętowych dla powszechnie stosowanych sterowników maszyn numerycznych. W rozdziale czwartym zostały zaprezentowane ogólne zasady projektowania sterowników, wykorzystane podczas realizacji pracy. Rozdział piąty zawiera ogólny opis konstrukcji prototypu hybrydowej frezarki 5-osiowej, opisy przyjętych modeli kinematyki i dynamiki dla poszczególnych elementów konstrukcji oraz przedstawienie algorytmu śledzenia trajektorii. Rozdział szósty zawiera opis architektury dedykowanego systemu CNC dla 5-osiowej frezarki, wraz z algorytmami zabezpieczeń oraz inicjalizacji i kalibracji czujników położenia. Przedstawiono tutaj także dekompozycję funkcjonalną i czasową algorytmów sterownika. Rozdział siódmy zawiera przedstawienie platformy sprzętowej wybranej do implementacji poszczególnych części algorytmów sterownika, opis narzędzi programistycznych wykorzystanych do modelowania i implementacji sterownika w układach reprogramowalnych oraz narzędzi pomiarowo - testowych wykonanych na potrzeby rejestracji danych w trakcie testów prototypów sterownika frezarki. Przedstawiono ogólny podział architektury części sprzętowo-programowej sterownika, na podstawie przyjętego kryterium, wymaganej dokładności numerycznej. Opisano poszczególne układy stałoprzecinkowej części architektury sterownika, przedstawiono poszczególne etapy projektowania sprzętowo - programowego prototypu I sterownika frezarki. Opisano bloki sprzętowe pełniące rolę akceleratorów obliczeń zmiennoprzecinkowych w postaci instrukcji koprocessorowych. Przedstawiono wyniki przeprowadzonych testów sterownika, w tym eksperymentów na obiekcie rzeczywistym to jest frezarce 5-osiowej. Opisano II prototyp sterownika frezarki z uwzględnieniem podstawowych informacji dotyczących architektury sprzętowej




zmiennoprzecinkowego procesora oraz narzędzi programistycznych do kompilacji kodu programu, programowania i emulowania. Opisano wyniki i wnioski z przeprowadzonych testów procesora oraz testów weryfikacyjnych poprzedzonych implementacją w układzie FPGA. Przedstawiono wreszcie wyniki testów porównawczych czasów i dokładności numerycznej, pomiędzy popularnymi mikroprocesorami: Cortex-M3, CortexM-4 a mikroprocesorem klasy DSP, procesorem typu soft-core NiosII i procesorem specjalizowanym X-ZJN. Do przeprowadzenia testów wykorzystano część on-line algorytmu sterownika frezarki. W rozdziale ósmym zaprezentowano podsumowanie i wnioski końcowe.

Warto zaznaczyć potencjał aplikacyjny wynikający z uzyskanych efektów rozprawy, szczególnie jeżeli chodzi o zaproponowany system aktywnej redukcji drgań obrabiarek, który jest użyteczny zarówno na etapie projektowaniu nowych konstrukcji jak i udoskonalaniu i modernizacji już istniejących i obecnie eksploatowanych.

Nowatorstwa i oryginalności pracy można upatrywać w opracowaniu dwóch wersji dwuprocessorowej architektury sprzętowo-programowej kompletnego sterownika oraz zaprojektowaniu dla drugiej z nich specjalizowanego mikroprocesora. Zostało to uzyskanie dzięki przeprowadzonej analizie istniejących sterowników maszyn numerycznych, zasad projektowania sterowników oraz analizę algorytmów sterowania, które należało zaimplementować. Na tej podstawie dokonano dekompozycji funkcjonalnej i czasowej algorytmów. Opisano implementację sterowników w układzie FPGA oraz przeprowadzonych eksperymentalnych testów walidacyjnych, które potwierdziły poprawność działania sterownika. Osiągnięto szybkość obliczeń pozostawiającą wystarczający margines czasu dla dalszej rozbudowy algorytmów sterownika.

2. Poprawność metodyki badań i analiza wyników

Przedstawiono wyniki zarówno wynik badań analitycznych symulacyjnych jak i eksperymentalnych. Udowodniono słuszność zaproponowanego podejścia oraz co ważne jego praktyczną użyteczność. Zastosowana metodyka badań jest prawidłowa, analiza wyników badań przeprowadzona w sposób właściwy świadcząc o dużym zasobie wiedzy, inwencji, pracowitości i rzetelności naukowej autora.



Należy szczególnie podkreślić widoczny duży nakład pracy autora przy wykonywaniu rozprawy i dobre ujęcie problematyki zawierającej badania teoretyczne, symulacyjne oraz badania doświadczalne. Takie kompleksowe rozwiązanie jest niewątpliwie dużym osiągnięciem i zasługuje na uznanie.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi jakie nasuwają się po lekturze pracy są dwojakiemu rodzaju. Po pierwsze są to **uwagi ogólne i redakcyjne**. Szkoda, że Autor nie zamieścił spisu ważniejszych oznaczeń wykorzystanych w pracy. Pomimo, że rozprawa jest starannie przygotowana zawiera jednak nieco różnorodnych usterek redakcyjnych, edytorskich, których wymienienie w tym miejscu wszystkich nie wydaje się celowe, zwłaszcza że na ogół nie utrudniają one lektury i nie umniejszają merytorycznej wartości pracy. Szczegółowe uwagi w tym zakresie przekazałem Autorowi do wykorzystania przy ewentualnych publikacjach.

W sensie merytorycznym natomiast pojawiają się raczej **uwagi dyskusyjne** niż krytyczne:

1. W rozdziale czwartym przedstawiono opis projektowania zintegrowanego sprzętu i oprogramowania heterogenicznego. Może warto by było precyzyjnie uzasadnić gdzie i jak w istocie ono się rozpoczyna.
2. Jak można uzasadnić dobór przedstawionego w rozdziale 5 nieliniowego integratora dla manipulatora równoległego.
3. W rozdziale 7 opisano między innymi biblioteczne bloki sprzętowe. Warto by było dodatkowo wyjaśnić jakie, jakiego typu są instrukcje koprocessora.
4. Skąd pochodzą i jaką mają interpretację stałe s_{36R} i s_{26R} we wzorach (7.4.1) i (7.4.3)
5. Jak wygląda wywołanie makra instrukcji koprocessora o którym mowa w rozdziale 7 na stronie 102.

4. Podsumowanie

Omawiana rozprawa zawiera wartościowe wyniki badań i świadczy ona o tym, że autor umie postawić zagadnienie i rozwiązać je na drodze teoretycznej oraz zweryfikować doświadczalnie, a wyniki badań zanalizować i wyciągnąć poprawne wnioski. Jego wywody są jasne a wyniki rozprawy mogą być użyteczne z naukowego jak i technicznego punktu widzenia. Należy przy tym zauważyć, że rozprawa prezentuje wysoki poziom i zasługuje na wyróżnienie.

Biorąc pod uwagę całość pracy należy stwierdzić, że Autor rozwiązał istotny problem nowoczesnej tematyki naukowej związanej z dyscypliną automatyka i robotyka. Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Konrada Gaca spełnia warunki określone w aktualnie obowiązującej ustawie w sprawie warunków i trybu przeprowadzania przewodów doktorskich i może być przedmiotem publicznej obrony.

