

Streszczenie

Tytuł.: „Widzenie maszynowe i przetwarzanie obrazów jako narzędzia do inspekcji powierzchni obrobionych w procesie frezowania”

Autor: mgr inż. Michał Szydłowski

Promotor: dr hab. inż. Bartosz Powalka, Prof. ZUT

Obróbka skrawaniem, do której zalicza się frezowanie, jest najpowszechniejszą metodą wytwarzania. Stanowi ona podstawę wielu gałęzi gospodarki np. przemysłu lotniczego, maszyn ciężkich, motoryzacyjnego czy zbrojeniowego. Istnieje wiele precyzyjnych części krytycznych dla poprawnego i bezpiecznego działania maszyn i urządzeń. Obróbka tych elementów jest bardzo wymagająca i kosztowna. Rosnące wymagania dot. jakości powierzchni i precyzji wykonania są przyczyną wprowadzania kontroli stuprocentowej takich właśnie elementów. Występujące podczas obróbki drgania samowzbudne wpływają niekorzystnie na dokładność geometryczną obrabianego przedmiotu, redukują trwałość ostrzy skrawających. Powodują one zmianę topografii powierzchni często niemożliwą do wykrycia za pomocą popularnych w przemyśle paramentów chropowatości takich jak R_a . Rozprawa doktorska podejmuje problematykę inspekcji powierzchni po obróbce w procesie frezowania, metodami widzenia maszynowego i przetwarzania obrazów.

Celem pracy była budowa narzędzi do wizyjnej detekcji śladów powstałych w wyniku drgań samowzbudnych obecnych w procesie frezowania. W ramach badań przeprowadzono testy skrawania różnymi narzędziami oraz wykonano testy impulsowe narzędzi. Wyznaczono krzywe workowe narzędzi, dzięki czemu zaprojektowano eksperyment. Eksperymentalne skrawanie przeprowadzono w warunkach, gdzie na niestabilność obróbki wpływała podatność przedmiotu obrabianego oraz podatność narzędzi. Podczas testów rejestrowano sygnały sił skrawania jak i sygnały przyspieszeń – w celu weryfikacji przyczyn powstawania drgań. Dzięki tym badaniom uzyskano powierzchnie do testowania algorytmów przetwarzania obrazów. W ramach pracy zaprojektowano i wykonano nowatorskie stanowisko badawcze do akwizycji obrazów powierzchni obrobionych. Stanowisko wyposażono w autorskie oprogramowanie pozwalające na automatyzację procesu akwizycji. Dzięki stanowisku przeprowadzono badania sposobów akwizycji obrazów powierzchni obrobionych. W ramach rozprawy przygotowano nowe, autorskie algorytmy przetwarzania i analizy obrazów.

Prezentowane w pracy nowe metody to: metoda gradientów lokalnych – oparta o analizę zmienności kierunków wzniesień i dolin na powierzchni obrobionej, metoda światła odbitego – polegająca na analizie wzoru powstałego w wyniku odbicia światła od powierzchni obrobionej. Dodatkowo zaprezentowano metodę rozszerzonej głębi ostrości, opartą na transformacie falkowej. W pracy przeprowadzono również badania nad skutecznością opracowanych metod, uwzględniając metodę GLCM z literatury. Całość rozprawy doktorskiej podsumowano wynikami analizy statystycznej.

Summary of Ph.D. thesis

Title: “Milled surface inspection using machine vision and digital image processing”

Author: M.Sc. Eng. Michał Szydłowski

Thesis supervisor: dr hab. inż. Powalka, Prof. ZUT

Machining is one of the most popular and precise methods of shaping raw material to the desired shape and size. There are numerous industrial branches dependent on machining like aerospace, machines and tools, automotive, arms. Many parts used in final products need to fulfil strict design specifications – critical for safety reasons. It makes the manufacturing process of such parts expensive. There is a tendency for 100% inspection of critical parts of engines, medical machines etc. But the implementation is very expensive due to amounts of labour in a mass production scenario. On the other hand, chatter is a known phenomenon in machining. The valiant self-excited motion during milling can cause wear and tool destruction, as well as it can flaw the machined part making it fail the high specification demands. The most effective way to control for chatter marks is performing visual inspection.

The presented dissertation proves that using machine vision and digital image processing can be effective in chatter mark detection on milled surfaces. To simulate chatter presence in the machining process different kinds of mills were used. Impulse testing was executed to evaluate stability lobe curves. Using the data, a series of milling tests prepared to gather sample surfaces. During the machining force and acceleration signals were acquired to verify the vibration cause. The machined surfaces were later used for algorithm testing purposes. A special novel inspection machine was designed and built to acquire surface images. The Inspection machine was controlled by custom designed software, enabling automation of the acquisition process. Different scenarios of acquisition were tested. New algorithms for chatter mark detection are presented in the dissertation. The local gradient method – based on ridge and valleys orientation variance. The reflection pattern method – based on analysing reflective patterns of the surface. As well as an additional method for image z-stitching (extended depth of field) – based on wavelet filtering was presented. The algorithms were tested using sample surfaces, made in both chatter free and chatter rich processes. A statistical evaluation of the methods was performed and conclusions had been drawn from the experiment.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak
Politechnika Koszalińska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Michała Szydłowskiego
z Zachodniopomorskiego
Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

WIDZENIE MASZYNOWE I PRZETWARZANIE OBRAZÓW JAKO NARZĘDZIA DO INSPEKCJI POWIERZCHNI OBROBIONYCH W PROCESIE FREZOWANIA

Promotor: dr hab. inż. Bartosz Powałka prof. ndzw. ZUT

Koszalin, sierpień 2017

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak
Politechnika Koszalińska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Michała Szydłowskiego
z Zachodniopomorskiego
Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

WIDZENIE MASZYNOWE I PRZETWARZANIE OBRAZÓW JAKO NARZĘDZIA DO INSPEKCJI POWIERZCHNI OBROBIONYCH W PROCESIE FREZOWANIA

Promotor: dr hab. inż. Bartosz Powąłka prof. ndzw. ZUT

1. Ocena tematu i koncepcji pracy

Wyznaczanie parametrów i charakterystyk nierówności powierzchni, gdy jest ona kształtowana w określonym procesie obróbki, jest jednym z najtrudniejszych zadań w technologii maszyn. Określanie cech topografii powierzchni po zakończeniu jej kształtowania jest łatwiejszym zadaniem, choć i w tym zakresie pozostaje wiele problemów, których rozwiązanie jest jeszcze dalekie od coraz wyższych oczekiwań, dotyczących dokładności oceny, jej znaczenia dla decyzji technologicznych oraz właściwości użytkowych.

Rozwój metod i środków technicznych do realizacji przetwarzania danych, spowodował niezwykle wzrost zapotrzebowania na wydobywanie, analizowanie, gromadzenie, przesyłanie i udostępnianie szczegółowych informacji o badanych procesach i obiektach, w tym zwłaszcza o wynikach złożonych, precyzyjnych procesów wytwarzania.

Stosunek ilości przetwarzanej informacji do ilości ekspertów, którzy potrafią interpretować określone dane, powiększył się setki i tysiące razy. To powoduje, iż automatyzacja

rozpoznawania i klasyfikacji stanów procesu staje się warunkiem efektywnej kontroli jakości produkcji.

Procesy frezowania stosowane są powszechnie, a wraz z upowszechnianiem metod wieloosiowego sterowania numerycznego i większą swobodą konstruktorów w doborze kształtów projektowanych elementów, nabierają jeszcze większego znaczenia. Warto przy tym zauważyć, iż upowszechniają się takie operacje technologiczne frezowania, w których z konieczności stosowane są narzędzia o dużej smukłości, co oznacza, iż problemy detekcji, analizy i minimalizacji skutków drgań samowzbudnych wymagają coraz dokładniejszych procedur.

Oceniana praca doktorska mgr inż. Michała Szydłowskiego rozwija metodykę akwizycji i analizy danych w przetwarzaniu obrazów z wizyjnych metod nadzorowania procesów frezowania. Autor uzyskał wysoką efektywność oceny wpływu drgań samowzbudnych na cechy geometryczne powierzchni, w wyniku wykorzystania opracowanych algorytmów analizy gradientów lokalnych i zmienności kierunków linii wierzchołków wzniesień.

Autor rozprawy poprawnie uzasadnia przyczyny wyboru tematu, właściwie uzasadnia zakres pracy, a także obiektywnie ocenia możliwości wykorzystania wyników pracy.

Wybór tematu oceniam jako trafny, ważny ze względów poznawczych, jak również ze względu na różnorodne zastosowania w najnowszych i przyszłych systemach wytwarzania precyzyjnych elementów maszyn i urządzeń. Wykorzystywanie metod oceny stanu procesu frezowania, których podstawy opracowano w ocenianej rozprawie, sprzyja wprowadzaniu prostych i skutecznych systemów produkcji, zapewniających wysoką i powtarzalną jakość obróbki.

W rozprawie dokonano przeglądu różnorodnych sposobów oceny topografii powierzchni po obróbce skrawaniem, ze szczególnym uwzględnieniem metod optycznych. Autor, w podsumowaniu oceny stanu wiedzy, określił problemy wymagające lepszych rozwiązań w zakresie metod oceny topografii powierzchni po frezowaniu.

W spisie literatury brakuje kilku ważnych publikacji polskich autorów między innymi dr hab. inż. Jacka Reintera z Politechniki Wrocławskiej, a z Politechniki Rzeszowskiej: prof. dr hab. inż. Pawła Pawlusa, prof. dr inż. Kazimierza Oczosia oraz prof. Władimira Lubimowa.

2. Hipoteza i zakres pracy

Teza pracy jest poprawna i podkreśla, że cyfrowe przetwarzanie obrazów powierzchni pozwala na skuteczną ocenę stanu procesu wówczas, gdy uwzględnia się parametry procesu (do zapisu wkradła się usterka literowa).

Cele i zakres pracy są spójne i ukierunkowane na rozwój metod oceny skutków geometrycznych drgań samowzbudnych, jako czynnika niekorzystnie wpływającego na proces i wyniki obróbki. Autor pisząc o celu używa sformułowania „...budowa narzędzi do wizyjnej detekcji śladów...” ma jednak na myśli właśnie metody, co potwierdza p. 5 w podrozdziale 2.2.

Rozprawa jest kompletna, zawiera poprawne podsumowanie stanu wiedzy i jasne przedstawienie osiągnięć Autora.

3. Ocena poziomu naukowego i osiągnięć rozprawy

Pozytywnie oceniam koncepcję i układ pracy. Zakres pracy obejmuje modelowanie nierówności powierzchni dla wybranych cech narzędzi i procesu frezowania, badania eksperymentalne, opracowanie metod analizy obrazów oraz ocenę ich skuteczności w detekcji stanów z określonym poziomem drgań samowzbudnych.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Autora zaliczam:

- Analizy i wynikające z nich rozwiązania, dotyczące efektywności detekcji skutków geometrycznych, w postaci zmian topografii śladów obróbkowych na frezowanej powierzchni, w warunkach występujących drgań samowzbudnych.
- Wykazanie, że detekcja stanów procesu z wykorzystaniem wielu znormalizowanych parametrów chropowatości powierzchni nie jest wystarczająco dokładna i najczęściej niemożliwa. Autor wprawdzie nie analizował wystarczająco wielu parametrów, na przykład odnoszących się do motywów, lub cech wzniesień ponad pewien poziom, ale można stwierdzić, iż ogólny wniosek jest słuszny.
- Dobór algorytmów wyznaczania i analizy gradientów powierzchni w celu wyznaczenia kierunków stycznych do grani wzniesień jest bardzo wartościowym elementem rozprawy.

- Uwzględnienie, iż kierunek śladów obróbkowych na powierzchni frezowanej jest zmienny, co wynika z samej kinematyki procesu oraz dodatkowo z zakłóceń toru ostrzy. W modelowaniu na str. 27 uwzględniono dodatkowe przemieszczenia ostrza spowodowane drganiami w dwóch kierunkach stycznych do nominalnej powierzchni obrabianej. Warto zapewne uwzględniać również przemieszczenia w kierunku prostopadłym do powierzchni, co wynika z faktu, iż przemieszczenia styczne do powierzchni, z uwagi na cechy konstrukcyjne układu, możliwe są jedynie wraz z przemieszczeniami w kierunku normalnym (skutek przemieszczeń kątowych osi narzędzia).
- Analizy kierunkowości śladów obróbkowych z uwzględnieniem podziału badanego obszaru na mniejsze fragmenty, co jest uzasadnione powyższymi uwagami.
- Opracowanie podstaw optymalizacji algorytmów analizy obrazów oraz wnikliwej oceny poziomu reprezentacji cech, zależnej od metodyki i techniki akwizycji obrazów.

W pracy pewnym niedostatkiem jest dość skromny zasób uogólnień, które pełniej rozszerzałyby podstawy optymalizacji oraz metodykę projektowania efektywnych systemów kontroli wizyjnej.

Wyniki pomiarów powierzchni rzeczywistych często są tylko ilustracją uzupełniającą opis określonej metody, a zbyt rzadko stanowią zbiory danych do ocen przydatności, dokładności i powtarzalności wyników. Biorąc jednak pod uwagę zakres problemów rozwiązanych przez Doktoranta uznaje, że rozprawa jest początkiem wielu jeszcze prac naukowych i doświadczeń eksperymentalnych, które tę uwagę uwzględnią.

Dobry poziom rozprawy oraz umiejętność wykorzystywania metod analizy danych, w problemach o wysokiej złożoności, jest nieco obniżana poprzez pewną niespójność opisów rysunków, tablic i cech ocenianych elementów.

Tak np. na stronie 17 definicja posuwu na obrót frezu zawiera jednostkę mm/obrót, a powinno być mm, bo już sama cecha odnosi się do jednego obrotu.

Na rysunku 22 (str. 37) (również w innych) w podpisie występuje „... powierzchnia frezowana przy udziale drgań samowzbudnych...”, a powinno być np. „...w warunkach... występowania...”. W tabeli 3 na str. 37 parametry wysokości nierówności dla przypadku

frezowania, gdy występowały drgania samowzbudne, są znacznie niższe niż po frezowaniu w warunkach stabilnych. Komentarz do tych wyników na stronie 34 odnosi się jedynie do braku zdolności klasyfikacyjnej ocenianych parametrów. Wyjaśnienia wymaga natomiast mechanizm obniżenia wysokości nierówności. Można przypuszczać, że zmienność lokalna wartości parametrów na obrabianych powierzchniach mogła być znaczna, ale powinno to skłaniać Autora do dokładniejszej analizy.

Na stronie 38 w zdaniu „Wartość intensywności pikseli jest zwykle wyrażona liczbą bitów...”. Poprawne byłoby stwierdzenie, że zakres wartości jest ograniczony liczbą bitów. W innym miejscu Autor używa lepszego określenia posługując się luminancją (rys. 42), str. 58. Dalej na stronie 61 określenie macierz sąsiedztwa poziomego szarości (lub ogólnej luminancji) byłaby trafniejsza od podanej w tekście rozprawy.

Na stronie 67 występuje błędne sformułowanie „...zgodności kierunków wartości wariancji lokalnej...”. Należałoby określić kierunek największej wartości gradientu lub kierunku stycznej do linii o gradiencie bliskim zero (grań wzniesienia) i do tego odnosić wariancję.

Strona 99 powinno być „... dla zmiennych niezależnych...”. Na stronie 103 występuje sformułowanie „... odchylenie standardowe krawędzi wzoru...”. Zapewne dotyczy to odchylenia standardowego kąta, charakteryzującego kierunek stycznej do linii wzoru.

4. Wniosek końcowy

W wyniku analizy rozprawy mgr inż. Michała Szydłowskiego z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie nt.: WIDZENIE MASZYNOWE I PRZETWARZANIE OBRAZÓW JAKO NARZĘDZIA DO INSPEKCJI POWIERZCHNI OBROBIONYCH W PROCESIE FREZOWANIA, której promotorem jest dr hab. inż. Bartosz Powałka prof. ndzw. ZUT, mogę stwierdzić, iż Autor:

- wybrał temat rozprawy ważny dla opracowania, rozwoju i upowszechnienia nowych metod oceny stanu procesu frezowania na podstawie analizy obrazów powierzchni,
- opracował innowacyjną metodykę wyznaczania paramentów o wysokiej przydatności do identyfikacji stanów występowania drgań samowzbudnych w procesach frezowania,

- przyjął wystarczająco szeroki, spójny zakres zagadnień rozpatrywanych w rozprawie,
- uzyskał wyniki, które mogą być wykorzystane w innych pracach badawczych,
- dokonał poprawnych uogólnień, dotyczących algorytmów poszukiwania najlepszych metod identyfikacji stanów procesu, tworząc podstawy do dalszych badań i zastosowań.

Stwierdzenia powyższe są podstawą opinii, iż rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Tomasz GIESKO, prof. nadzw.
Instytut Technologii Eksploatacji –
– Państwowy Instytut Badawczy
w Radomiu

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Jerzego Szydłowskiego
pt. „Widzenie maszynowe i przetwarzanie obrazów jako narzędzia do inspekcji
powierzchni obrobionych w procesach frezowania”

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowiła uchwała Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie z dnia 30.05.2017 r. oraz pismo Dziekana Wydziału dra hab. inż. Mirosława Pajora, prof. nadzw., z dnia 01.06.2017 r.

Ocena problematyki badawczej

Przedmiot ocenianej rozprawy stanowi zastosowanie metody inspekcji wizyjnej do obserwacji struktury powierzchni przedmiotu obrobionego w procesie frezowania i detekcji charakterystycznych cech będącej wynikiem występujących drgań samowzbudnych. Prace badawcze Autor ukierunkował na zamodelowanie systemu wizyjnego do obrazowania powierzchni metalowych oraz opracowanie metod przetwarzania i analizy obrazów umożliwiających detekcję śladów drgań samowzbudnych.

Obróbka skrawaniem stanowi nadal wiodącą technologię wytwarzania różnorodnych elementów konstrukcyjnych. Prowadzone badania nad procesami skrawania i towarzyszącymi zjawiskami nabierają coraz większego znaczenia w kontekście rosnących wymagań w zakresie dokładności wymiarowej wykonanego elementu i jakości powierzchni obrobionej. Dodatkowym czynnikiem mającym znaczący wpływ na kierunki prac badawczych w tym obszarze jest nacisk na podwyższanie efektywności produkcji przez zwiększanie wydajności procesów obróbkowych i ich automatyzację. Praktycznym efektem tych działań są kolejne generacje wysoko wydajnych, wielozadaniowych i super dokładnych obrabiarek CNC. Obszarem badań blisko związanym z technologiami obróbki skrawaniem jest rozwój metod i narzędzi umożliwiających kontrolę jakości obrobionych powierzchni zgodnie ze standardem „zero braków”. W procesach skrawania, w efekcie oddziaływania niekorzystnych czynników, mogą wystąpić zjawiska drgań samowzbudnych mających niekorzystny wpływ na dokładność geometryczną obrobionej powierzchni, a w konsekwencji powstawanie braków, nadmierne zużycie materiałów oraz energii, a także przyspieszone zużycie narzędzi skrawających, ograniczenie wydajności procesu, obniżenie trwałości eksploatacyjnej podzespołów obrabiarki. Jako przyczyny generowania drgań samowzbudnych podaje się nieprawidłowe zamocowanie przedmiotu obrabianego, podatność narzędzia lub przedmiotu obrabianego, zużycie ostrzy skrawających, niewłaściwe parametry procesu skrawania, a także zmienny kontakt narzędzia z materiałem skrawanym. Charakterystycznym zjawiskiem związanym z mechanizmem samowzbudzenia jest „obróbka po śladzie”.

Przedmiotem prowadzonych na świecie prac badawczych w zakresie podwyższania jakości procesów skrawania, w tym frezowania jest kompleks związanych ściśle zagadnień obejmujących: detekcję i rozpoznawanie drgań samowzbudnych oraz eliminowanie lub znaczące ograniczenie czynników powodujących ich występowanie. Kluczowy kierunek badań stanowią metody umożliwiające wyznaczanie obszarów stabilności obróbki poprzez analizę dynamicznego układu obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie (OUPN) i wyznaczanie tzw. krzywych workowych przedstawiających granice stabilności, co pozwala na właściwe programowanie procesów obróbki. Natomiast główny obszar badań, na który Doktorant ukierunkował swoje zainteresowania naukowe, obejmuje wizyjne metody obserwacji procesów frezowania, w szczególności analizy topografii powierzchni obrobionej i detekcji śladów drgań samowzbudnych. W wyniku przeprowadzonej analizy stanu wiedzy Doktorant wskazał na istotne ograniczenia dostępnych obecnie stykowych lub bezstykowych metod analizy powierzchni po obróbce frezerskiej, wśród których najbardziej istotne to niedostateczny poziom czułości sensora przeznaczonego do detekcji śladów drgań, brak wyników badań identyfikujących korelacje pomiędzy cechami powierzchni obrobionej i parametrami procesu skrawania, a także brak możliwości automatyzacji procesu pomiarów. Jak wynika z przeglądu literatury przeprowadzonego przez Doktoranta, zagadnienie analizy topografii powierzchni po obróbce skrawaniem z wykorzystaniem metod optycznych nie jest nowe, czego przykładami są eksperymentalne rozwiązania układów pomiarowych umożliwiających analizę profilometryczną lub powierzchniową. Podejmowane dotychczas na świecie badania koncentrowały się jednak głównie na metodach optycznych do oceny powierzchni po toczeniu lub szlifowaniu. Obecne doniesienia w publikacjach naukowych wskazują na brak znaczących osiągnięć w zakresie metod optycznych dedykowanych do analizy powierzchni po obróbce frezerskiej.

Wynikające z analizy wnioski były podstawą do zdefiniowania przez Doktoranta obszaru merytorycznego rozprawy, sformułowania tezy (a zasadniczo hipotezy) i głównego celu pracy. Dokonany wybór kierunku badań na opracowanie metody wizyjnej do akwizycji obrazu powierzchni i komputerowej analizy informacji zawartych w obrazie do oceny powierzchni obrobionej jest zatem zasadny. Należy uznać, że problematyka badawcza pracy ukierunkowana na optyczne metody detekcji śladów drgań na powierzchni po obróbce frezerskiej jest nowatorska, a rozwiązania przedstawione w rozprawie prezentują ważne walory poznawcze i praktyczne. Doktorant swoją aktywność badawczą i posiadane kompetencje potwierdził, m.in. przez publikacje w punktowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Recenzowana praca powstała w środowisku naukowym uznanych specjalistów w zakresie multidyscyplinarnych badań procesów obróbki skrawaniem, co niewątpliwie miało wpływ na jej właściwe ukierunkowanie poznawcze i aplikacyjne.

- W obszarze zaplanowanych badań sformułowano cele szczegółowe dysertacji obejmujące:
- przeprowadzenie modelowych procesów skrawania mających na celu dostarczenie powierzchni testowych dla algorytmów przetwarzania i sposobów akwizycji;
 - zaprojektowanie stanowiska do prowadzenia badań nad sposobami akwizycji i metodami przetwarzania i analizy obrazów;
 - przeprowadzenie pomiarów topografii powierzchni obrobionej w procesie frezowania;
 - opracowanie metod przetwarzania i analizy obrazów pod kątem detekcji śladów drgań samowzbudnych w procesie frezowania;
 - przeprowadzenie badań nad skutecznością opracowanych metod i porównanie ich z dotychczas zaproponowanymi w literaturze oraz w praktyce przemysłowej.

Ograniczenie głównego celu pracy do „budowy narzędzi do wizyjnej detekcji śladów powstałych w wyniku drgań samowzbudnych w procesie frezowania” pozostawia pewien niedosyt. Logicznym końcowym rezultatem prac zrealizowanych przez Doktoranta powinna być propozycja metodyki inspekcji optycznej powierzchni obrobionych w procesie frezowania obejmującej w zintegrowanym układzie: metodę obrazowania powierzchni, modelowy system wizyjny, metody przetwarzania i analizy obrazów pod kątem detekcji śladów drgań, modelową bazę danych wspierającą proces identyfikacji śladów drgań w odniesieniu do parametrów procesu skrawania. Marginalnie potraktowanym w pracy, ale ważnym celem szczegółowym jest „porównanie zaproponowanych autorskich metod przetwarzania i analizy obrazów pod kątem detekcji śladów drgań z dotychczas przedstawianymi w literaturze oraz praktyce przemysłowej”. Wskazane kwestie powinny być przedmiotem dyskusji i odniesienia się do nich Doktoranta podczas publicznej obrony.

Podjęcie przez Doktoranta tematu rozprawy jest uzasadnione merytorycznie i celowe ze względów poznawczych, jak również potrzeb praktycznych. Problematyka badawcza poruszona w pracy dotyczy aktualnych i istotnych zagadnień w obszarze budowy i eksploatacji maszyn.

Charakterystyka rozprawy

Rozwiązanie postawionych w pracy problemów badawczych oraz osiągnięcie założonych celów dysertacji wymagało od Doktoranta rozwiązania wielu zaawansowanych zagadnień badawczych i metodologicznych z zakresu mechaniki procesu skrawania metodą frezowania, metod optycznej inspekcji powierzchni oraz modelowania algorytmów przetwarzania obrazów. Przedmiot rozprawy w pełni mieści się w dyscyplinie naukowej – budowa i eksploatacja maszyn.

Przedstawiona do oceny rozprawa została zawarta na 121 stronach i obejmuje wprowadzenie, osiem rozdziałów, wykaz literatury, spisy tabel i ilustracji oraz streszczenia w języku polskim i języku angielskim. Wykaz literatury zawiera 73 pozycje, z czego 33 zostały opublikowane po roku 2006, a 15 pozycji zostało opublikowanych po roku 2011. W wykazie literatury zostały zamieszczone 4 publikacje, które powstały z udziałem Doktoranta.

We wprowadzeniu Doktorant zaprezentował, w bardzo ogólnym ujęciu, przesłanki podjęcia badań oraz przedstawił układ pracy. Sformułowany wniosek, że „nie spotykane są systemy które pozwalają na ocenę stanu powierzchni pod kątem wystąpienia drgań samowzbudnych w procesie obróbkowym” wzbudza wątpliwości ze względu na brak doprecyzowania, o jakiego rodzaju systemy chodzi (np. optyczne) oraz czy dotyczy on wszystkich rodzajów obróbki skrawaniem czy wyłącznie frezowania. Jest to istotne w kontekście publikacji naukowych, w tym także zamieszczonych w wykazie literatury, w których przedstawiono opracowane eksperymentalne optoelektroniczne systemy detekcji śladów drgań (m.in. prace: J.A. Böhm, A. Vernes, M.J. Vellekoop: Investigation of chatter marks on ground surfaces by means of optical methods. Optics and Lasers in Engineering, 49, pp.1309–1313, 2011; N. Lei, M. Soshi: Vision-based system for chatter identification and process optimization in high-speed milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 89, 9–12, pp.2757–2769; A. Zawada-Tomkiewicz: Teoretyczne i doświadczalne podstawy monitorowania procesu toczenia z wykorzystaniem informacji o cechach stereometrycznych obrobionej powierzchni. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2012).

Przegląd literaturowy został zaprezentowany w rozdziale pierwszym i dotyczy stykowych oraz bezstykowych metod badania topografii powierzchni po obróbce skrawaniem. Zasadnicza konkluzja sformułowana przez Doktoranta wskazuje na brak metod wizyjnych

umożliwiających detekcję śladów drgań na powierzchniach obrobionych w procesie frezowania. Bardzo ważna jest przeprowadzona identyfikacja istotnych ograniczeń metod inspekcji powierzchni frezowanych, zaprezentowanych dotychczas w literaturze, a wynikających z nieuwzględnienia parametrów procesu skrawania, jak posuw czy prędkość obrotowa narzędzia. Dokonując analizy stanu wiedzy Doktorant w jednym zdaniu (s. 13) poruszył problem automatyzacji inspekcji powierzchni frezowanych, który zgodnie z deklaracją zamieszczoną we Wprowadzeniu (s. 5) stanowił ważną przesłankę podjęcia badań. Należy więc oczekiwać odniesienia się Doktoranta tej kwestii podczas obrony, zwłaszcza przedstawienia propozycji skutecznych metod eliminacji oddziaływania czynników zakłócających inspekcję w trakcie procesu obróbki, m.in. powstających wiórów i obecności cieczy chłodząco-smarującej w strefie obserwacji powierzchni.

W rozdziale drugim podano hipotezę pracy (niesłusznie określaną mianem tezy), cel główny oraz zaplanowane zadania operacyjne obejmujące zarówno cele badawcze, jak również projektowe. Sformułowany cel pracy, ukierunkowany wyłącznie na opracowanie narzędzi do wizyjnej detekcji cech topografii powierzchni odzwierciedlających oddziaływanie drgań samowzbudnych, wywołuje niedosyt, gdyż zakres i wyniki badań stanowią solidną podstawę do zaproponowania autorskiej metodyki inspekcji powierzchni po obróbce frezowaniem.

Rozdział trzeci rozprawy został poświęcony kinematyce procesu obróbki powierzchni metodą frezowania, w szczególności zjawisku powstawania drgań samowzbudnych. Przedstawiono liniowy model mechanistyczny opisujący składowe siły skrawania w procesie frezowania powierzchni. Odporność systemu: obrabiarka – proces skrawania, na drgania samowzbudne, związana z granicą stabilności, została opisana przez zależność wiążącą graniczną szerokość warstwy skrawanej, prędkość obrotową oraz częstotliwość drgań samowzbudnych. Przedstawiono przykładowe wykresy granicy stabilności w postaci krzywych workowych, uzyskane w ramach przeprowadzonych eksperymentów oraz wnioski ograniczone jedynie do stwierdzenia oczywistych faktów uwidoczniionych na wykresach. Zaprezentowano wpływ drgań na kształtowanie powierzchni obrobionej w wyniku frezowania i wskazano na istotne cechy charakteryzujące powierzchnie obrobione w warunkach niestabilnych. Przedstawiono także przykładowe obrazy powierzchni po obróbce skrawaniem uzyskane z wykorzystaniem programu komputerowego do symulacji procesu obróbki skrawaniem, opracowanego w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym. Zabrakło jednak przeprowadzenia analizy porównawczej obrazów powierzchni wygenerowanej komputerowo i powierzchni obrobionej w procesie rzeczywistym przy parametrach obróbki identycznych z zadanymi w programie komputerowym. W końcowej części rozdziału Doktorant przedstawił wyniki pomiarów powierzchni obrobionej tym samym narzędziem w warunkach stabilnych i przy udziale drgań samowzbudnych, wykonane z wykorzystaniem metody skanowania za pomocą punktowej głowicy konfokalnej. Zaobserwowany brak zróżnicowania zmierzonych profili w obu przypadkach został opisany enigmatycznie, mimo że stanowi podstawę do ważnego wniosku o nieskuteczności techniki konfokalnej w identyfikacji śladów drgań samowzbudnych.

W rozdziale czwartym zaprezentowane zostały wybrane, najbardziej istotne zagadnienia obrazowania optycznego z ukierunkowaniem na powierzchnie metalowe. Niezrozumiale jest operowanie terminem „kamera przemysłowa” w odniesieniu do systemów inspekcji optycznej. Kamery, nazywane popularnie „przemysłowymi”, stosowane są w systemach monitorowania obiektów przemysłowych i użyteczności publicznej. Wartościowym rezultatem obserwacji i rozważań analitycznych są sformułowane przez Doktoranta wytyczne dla procesu projektowania systemu inspekcji powierzchni metalowych po obróbce frezowaniem, dotyczące m.in. struktury sprzętowej, wyboru metod oświetlania strefy obserwacji. Słabszym elementem jest brak szczegółowej analizy zagadnienia rozdzielczości obrazowania, kluczowego

w metodzie inspekcji mikrostruktury powierzchni. Ogólne rozważania (s. 44-45) nie prowadzą do oczekiwanych wniosków, które powinny opisywać wpływ następujących czynników: rozdzielczości sensora kamery, rozdzielczości optycznej obiektywu, długości fali światła, położenia kąтового osi optycznej względem obserwowanej powierzchni na rozdzielczość pomiarową projektowanego systemu wizyjnego. Należałoby też oczekiwać, że praktycznym rezultatem będzie modelowa macierz doboru parametrów systemu wizyjnego dedykowanego do zadań obrazowania wybranych powierzchni metalowych po obróbce frezowaniem, na której występują ślady drgań samowzbudnych.

W rozdziale piątym Doktorant przedstawił autorskie metody cyfrowego przetwarzania obrazów umożliwiające detekcję i identyfikację cech powierzchni po obróbce frezowaniem, w szczególności śladów drgań samowzbudnych. Metoda lokalnych gradientów wykorzystuje analizę zmienności kierunków wzniesień i dolin występujących w strukturze powierzchni, w której zastosowano filtr dolnoprzepustowy umożliwiający wyodrębnienie niskich częstotliwości charakterystycznych dla wzniesień i dolin w strukturze geometrycznej powierzchni. Z kolei w metodzie światła odbitego zastosowano kierunkowe oświetlenie powierzchni obrobionej przy bardzo małym kącie padania w stosunku do powierzchni. W procesie przetwarzania obrazu zastosowano m.in. ciągłą transformatę falkową w celu wydzielenia niskich częstotliwości związanych ze śladem drgań. Przedstawiony przykład zastosowania metody potwierdza jej skuteczność w detekcji śladu drgań samowzbudnych. Rozdział został uzupełniony o przedstawienie metody obserwacji powierzchni z wykorzystaniem systemu wizyjnego o rozszerzonej głębi ostrości oraz transformaty falkowej do przetwarzania obrazów. Pominięcie tej metody w badaniach eksperymentalnych (zaprezentowanych w rozdziale siódmym) uniemożliwia ocenę jej rzeczywistych walorów i świadczy o marginalnym potraktowaniu tego zagadnienia przez Doktoranta. Niezrozumiałą jest cel rejestracji serii obrazów powierzchni obrobionej dla różnych odległości obserwacji z wykorzystaniem obiektywu telecentrycznego charakteryzującego się dużą głębią ostrości, znacznie przekraczającą zakres zmian wysokości w strukturze powierzchni. W modelowym stanowisku badawczym zastosowano obiektywy telecentryczne o głębi ostrości 5 mm. Zastosowanie systemu wizyjnego z obiektywem telecentrycznym miałoby uzasadnienie do obserwacji powierzchni krzywoliniowych. Do uporządkowania zamieszczonych w rozdziale treści przyczyniłoby się przedstawienie analizy porównawczej opracowanych, autorskich metod.

W rozdziale szóstym przedstawiono unikatowe stanowisko badawcze opracowane przez Doktoranta, umożliwiające zarówno modelowanie dedykowanych struktur systemów wizyjnych do obserwacji powierzchni po obróbce frezowaniem, jak również badania eksperymentalne metod obrazowania i algorytmów przetwarzania obrazów. Ważnym walorem stanowiska jest jego częściowa automatyzacja oraz autorskie oprogramowanie sterujące. W szczegółowej specyfikacji technicznej stanowiska zabrakło informacji o możliwych polach obserwacji oraz wyznaczenia rozdzielczości pomiarowej systemu wizyjnego w opracowanej konfiguracji.

W rozdziale siódmym Doktorant przedstawił wyniki badań eksperymentalnych opracowanych metod inspekcji powierzchni po obróbce frezowaniem, wykonanych na próbkach aluminiowych i stalowych. Przeprowadzono analizę statystyczną (testy Shapiro-Wilka, t-Studenta, Manna-Whitney'a) wyznaczonych parametrów charakteryzujących występowanie śladów drgań samowzbudnych. Na podstawie uzyskanych wyników wskazano parametry, które są istotne statystycznie i mogą być wykorzystane do detekcji śladów drgań samowzbudnych. Uzyskane wyniki badań stanowią podstawę do uznania skuteczności zaproponowanych przez Doktoranta metod przetwarzania obrazów. Mankamentem tego ważnego rozdziału jest brak uzasadnienia wyboru zastosowanych testów do analizy

statystycznej i przyjętego kryterium wyboru parametrów istotnych statystycznie. Zauważalny jest brak szerszej analizy wykresów przedstawiających zmiany wartości wybranych parametrów (Rys. 79 i Rys. 80 – s.104, Rys. 81 – s.105). Oznaczenia parametrów w Tabeli 13 nie odpowiadają występującym na wykresach: „odchylenie standardowe kierunku wzniesień” – rys. 79 oraz „odchylenie standardowe krawędzi wzoru” – rys. 81. Wniosek o widocznym trendzie wzrostu wartości tych parametrów w odniesieniu do rys. 81 jest co najmniej dyskusyjny, porównując poszczególne wyniki podane na wykresie. Szerszy komentarz do sporządzonych wykresów z interpretacją występujących „odstępstw” części uzyskanych wyników od trendu wzrostu powinien być przedmiotem dyskusji podczas publicznej obrony.

Rozdział ósmy stanowi krótkie podsumowanie osiągnięć naukowych, zakończone stwierdzeniem Doktoranta, że cel pracy został zrealizowany a teza pracy została udowodniona (w przypadku badań eksperymentalnych można mówić co najwyżej o zweryfikowaniu hipotezy badawczej). Z korzyścią dla rozprawy byłoby syntetyczne przedstawienie nie tylko walorów opracowanych rozwiązań, a także ich ograniczeń oraz propozycja wskazania kierunków dalszych badań stanowiących kontynuację podjętej problematyki.

Wybrane uwagi szczegółowe

W ogólnej ocenie poziom redakcyjny rozprawy jest w miarę poprawny, jednak Doktorant nie ustrzegł się różnego rodzaju błędów, których należy unikać, mając na względzie jakość edytorską przysyłanych prac.

Należy zwracać uwagę na błędy natury językowej i stylistycznej, jak również kolokwializmy i nieprecyzyjne sformułowania stosowane w języku potocznym, m.in.:

- „W oparciu o stykowe i bezstykowe podejście (...)” (s. 7-8);
- „(...) niechcianych drgań (...)” (s. 9);
- „(...) palący problem automatyzacji (...)” (s. 13);
- „(...) interakcja sceny z warunkami oświetleniowymi (...)” (s. 38);
- „Aby akwizycja była możliwa, w torze optycznym musi pojawić się światło.” (s. 50).

W pracy występują przypadki niepoprawnej pisowni wyrazów, np.:

- „(...) człowiek nie jest jednak nie omylny” (s. 4);
- „Metoda ta może być nie czuła na zmianę (...)” (s. 11);
- „(...) we pogłębianiu (...)” (s. 13);
- „(...) po przez przeprowadzenie testu impulsowego” (s. 23);
- „(...) obiektywy stało ogniskowe (...)” (s. 48);
- „(...) nie silne odbicia (...)” (s. 60);
- „(...) dla zmiennych nie zależnych (...)” (s. 99).

Uwagę zwracają także przypadki braku starannego opracowania rysunków i zachowania logicznego układu treści, m.in.:

- Tabela 2 (s. 32) - częściowo nieczytelne tytuły kolumn;
- Rys. 40 – niedokończony podpis pod rysunkiem;
- „Rysunek 48 przedstawia (...)” (s. 67) - błędny numer rysunku;
- „Przesunięcia te powinny być wykonywane z określonym interwałem Δz tak jak na Rysunku 58” (s. 78) - błędny numer rysunku;
- „Wyższe wartości parametru pokazują szczegóły znajdujące się na obrazie.” (s. 78) - trudno jest odczytać jakiegokolwiek szczegóły na zamieszczonych obrazach dla wartości parametru „a” większych od 6;

- „Rysunek 57 przedstawia graficznie kolejny krok działania algorytmu.” (s. 79) - rys. 57 (s. 77) nie przedstawia algorytmu a jedynie rysunek poglądowy dotyczący zagadnień głębi ostrości;
- „W kolumnie drgania literami T – oznaczono (...)” (s. 91) - jedynie pośrednio można ustalić, o którą kolumnę w Tabeli 7 chodzi;
- Rysunek 73 (s. 92) - brak wyjaśnienia, o jakie narzędzie B chodzi (czy przedstawione w Tabeli 2 na s. 32)?;
- Rysunek 77 - brak wyjaśnienia skrótu BFD a komentarz do tego rysunku został zamieszczony dopiero na kolejnej stronie;
- Tabela 13 (s.103) – brak oznaczenia pierwszej kolumny.

Podsumowanie i konkluzja

Na podstawie przeprowadzonej oceny pracy doktorskiej mgra inż. Michała Szydłowskiego stwierdzam, że podjęta problematyka badawcza jest ważna w aspekcie poznawczym i praktycznym. Praca została zrealizowana na właściwym poziomie merytorycznym a zaplanowane cele zostały osiągnięte. Metody i narzędzia badawcze wykorzystane w pracy są odpowiednie do zakresu i celu pracy. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia prac naukowych oraz budowania instrumentarium badawczego niezbędnego w multidyscyplinarnym obszarze badań.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w rozprawie należy zaliczyć:

- opracowanie metody gradientów lokalnych wykorzystującej analizę zmienności kierunków wzniesień i dolin występujących w strukturze powierzchni;
- opracowanie metody analizy światła odbitego od obserwowanej powierzchni;
- unikatowe stanowisko badawcze umożliwiające modelowanie struktur systemów wizyjnych do obserwacji powierzchni po obróbce frezowaniem oraz badania eksperymentalne metod obrazowania i algorytmów przetwarzania obrazów.

Wśród mankamentów pracy uwagę zwraca powierzchowne potraktowanie analizy porównawczej zaproponowanych autorskich metod przetwarzania i analizy obrazów z dotychczas przedstawianymi w literaturze oraz praktyce przemysłowej.

Przedstawione uwagi krytyczne, zapewne w znacznym stopniu dyskusyjne, nie wpływają istotnie na ogólną ocenę rozprawy. Praca mgra inż. Michała Szydłowskiego stanowi interesujący wkład w rozwój metod inspekcji powierzchni po obróbce frezowaniem, a uzyskane wyniki mają spore znaczenie poznawcze.

Uważam, że rozprawa doktorska mgra inż. Michała Szydłowskiego spełnia wymogi określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym i może być dopuszczona do publicznej obrony przed Radą Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

Radom, 06 lipca 2017



Uchwała nr 56 /2017
Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu
Technologicznego w Szczecinie
z dnia 7 listopada 2017 r.

W sprawie nadania mgr inż. Michałowi Szydłowskiemu stopnia doktora w obszarze nauk technicznych, dziedzinie nauk technicznych, dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

§ 1

Rada Wydziału/Rada Jednostki, działając na podstawie art. 14 ust.2 pkt 5 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) oraz rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego *w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora* – Rozdział 1 – Szczegółowy tryb przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich (Dz. U. z 22.09.2011 poz. 1200), nadaje **mgr. inż. Michałowi Szydłowskiemu** stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

§ 2

Uchwała wchodzi w życie z chwilą jej podjęcia.

Dziekan

dr hab. inż. Mirosław Pajor, prof. nadzw.

