

Dr hab. inż. Bogusław Cyganek
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Katedra Elektroniki
Al. Mickiewicza 30
30-59 Kraków

Kraków, 25.04.2014



Recenzja rozprawy doktorskiej magistra inżyniera Arkadiusza Gancarczyka

„Profilometryczny wizyjny system diagnostyczny tramwajowych zestawów kołowych”

Wstęp

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana magistra inżyniera **Arkadiusza Gancarczyka** zatytułowana *„Profilometryczny wizyjny system diagnostyczny tramwajowych zestawów kołowych”*, opracowana na Politechnice Śląskiej, Wydział Elektryczny, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki, w roku 2014. Promotorem pracy jest Pan prof. dr hab. inż. Tadeusz Skubis.

Recenzja zorganizowana jest w postaci odpowiedzi na osiem zasadniczych pytań dotyczących rozprawy doktorskiej.

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (tezie rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?*

Praca Pana magistra inżyniera Arkadiusza Gancarczyka dotyczy opracowania metody komputerowego pomiaru parametrów tramwajowych zestawów kołowych komputerowego systemu wizyjnego. Problem ten wpisuje się w dziedziny widzenia komputerowego, a w szczególności tzw. widzenia maszynowego, jak również fotogrametrii oraz ogólnie pojętej metrologii. Problem ten jest trudny zarówno teoretycznie, jak i obliczeniowo. Główna trudność w podjętym zagadnieniu polega na odpowiednim zaprojektowaniu, następnie opracowaniu matematycznych metod przetwarzania

sygnałów, a w końcu wykonaniu i uruchomieniu aktywnego stanowiska pomiarowego składającego się z modułów odpowiednio ułożonych i połączonych laserów oraz kamer.

Metody pomiarowe oparte na analizie fotografii są rozwijane od przeszło stu lat. Jednakże pomiary wielkości rzeczywistych na podstawie analizy jednego, czy też wielu obrazów, należą do zagadnień trudnych, zarówno obliczeniowo, jak i eksperymentalnie. Dzieje się tak, ponieważ przetworniki wizyjne, czyli zarówno ludzkie oko, jak i kamera, dokonują transformacji obrazu z otaczającej nas przestrzeni trójwymiarowej do dwuwymiarowej płaszczyzny kamery. Transformacja ta prowadzi do utraty części informacji, a co więcej jest ona nieliniowa w odniesieniu do odległości obserwowanego obiektu. W życiu codziennym mamy zaskakująco dobrą zdolność oceny wielkości oraz odległości przedmiotów i często nie zdajemy sobie sprawy ze złożoności zarówno przetworników pozwalających nam odbierać promieniowanie elektromagnetyczne, czyli w przypadku człowieka - pary oczu, jak i samego procesu "obliczeniowego", dzięki któremu możemy swobodnie poruszać się w otaczającej nas rzeczywistości i prawidłowo reagować na bodźce zewnętrzne, np. prowadząc samochód. Jednakże, zarówno w przypadku układu wzrokowego człowieka, jak i kamer elektronicznych, położenie obrazu w stosunku do rzeczywistego położenia przedmiotu, związane jest ze wspomnianym nieliniowym przekształceniem rzutowym, które ma wiele ciekawych właściwości. Wystarczy wspomnieć dla przykładu dwie równoległe proste, które nie mają punktów wspólnych, np. tory tramwajowe, które już w przestrzeni rzutowej taki punkt wspólny już mają.

Stąd też, zagadnienie rozpatrywane w pracy Pana magistra inżyniera Arkadiusza Gancarczyka nie należy do trywialnych, a przedstawione rozwiązanie jest ciekawe i zasługuje na głębszą analizę.

Teza rozprawy sformułowana została następująco:

- 1. Metody analizy niepewności toru przetwarzania obrazu, pozwalają na diagnostykę zestawów kołowych w czasie rzeczywistym, z dokładnością wymaganą do podjęcia decyzji o regeneracji.*
- 2. Budżet niepewności pomiaru pozwala na optymalizację projektowania stanowiska pomiarowego w celu osiągnięcia wymaganych dokładności pomiaru.*

Tezy pracy nie wyrażają wprost podjętego zadania sprawdzenia możliwości opracowania oraz wykonania skutecznego stanowiska pomiarowego dla tramwajowych zestawów kołowych, co moim zdaniem jest jednym z głównych tematów rozprawy. Tym niemniej z treści postawionych tez zadanie to wynika w sposób niejawnny.

Praca doktorska Pana magistra inżyniera Arkadiusza Gancarczyka ma charakter teoretyczno-doświadczalny.

2. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Zbadanie celów postawionych w dwóch tezach rozprawy wymagało zaprojektowania oraz zbudowania odpowiedniego stanowiska pomiarowego, jak również opracowania matematycznych metod analizy otrzymanych obrazów. W rozdziale pierwszym autor przedstawia swój cel pracy w następujący sposób:

Celem pracy jest opracowanie rozwiązania pomiarowego i osiągnięcie niepewności pomiaru parametrów geometrycznych kół tramwajowych, akceptowalnej przy podejmowaniu decyzji o regeneracji zestawu kołowego.

Stwierdzenie powyższe znacznie lepiej przekazuje rzeczywisty cel pracy niż tezy postawione na początku pracy. W tym celu, autor pracy p. mgr inż. Arkadiusz Gancarczyk, opracował system widzenia maszynowego składający się z zespołu współpracujących laserów oraz kamer odbierających promieniowanie laserowe, odbite od powierzchni analizowanych obiektów. W tym wypadku chodzi jednak o specyficzne obiekty, którymi są podwozia tramwajowe, wymagające oceny parametrów geometrycznych sekcji jezdnych kół. Lasery stanowią aktywne źródło promieniowania, które odbite od powierzchni kół tramwajowych, zostają zarejestrowane przez kamery. Analiza zarejestrowanych obrazów pozwala - jak wykazał autor - na pomiar niezbędnych parametrów geometrycznych zestawów kołowych, a w rezultacie na podjęcie decyzji o ich przydatności do ruchu, bądź też konieczności wymiany, czy też regeneracji.

Autor przeprowadził szereg eksperymentów, które wykazały poprawność opracowania teoretycznego. Wyniki eksperymentów zostały szczegółowo przeanalizowane, ze szczególnym uwzględnieniem błędów pomiarowych.

Należy jednoznacznie stwierdzić, że autor cel swój zrealizował, tzn. opracował, wykonał, a następnie zbałał wizyjny system pomiarowy. Tezy pracy zostały również potwierdzone.

Jednakże należy pamiętać też, że rozwiązanie to nie jest jedyne i, zarówno w tym projekcie, jak i w projektach podobnych, możliwe są różne podejścia, jak i możliwe jest zastosowanie różnych podzespołów, metod oraz pakietów oprogramowania.

3. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Osiągnięcia naukowe p. mgr inż. Arkadiusza Gancarczyka opisane w recenzowanej pracy z powodzeniem wpisują się w nurt nowoczesnych badań naukowych obejmujących w różnym zakresie

takie dziedziny jak elektrotechnika, metrologia oraz informatyka. Do najważniejszych osiągnięć teoretycznych autora, opisanych w recenzowanej pracy, zaliczam:

1. *Opracowanie teoretyczne toru wizyjnego systemu do pomiaru parametrów tramwajowych zestawów kołowych, jak również analiza dokładności pomiarowej takiego systemu.*
2. *Opracowanie modelu matematycznego do odtwarzania rzeczywistych profili kół tramwajowych, na podstawie oświetlających je laserów.*

Osiągnięcie natury praktycznej i eksperymentatorskiej to:

3. *Opracowanie projektu oraz wykonanie systemu wizyjnego, składającego się z zestawu laserów oraz odpowiednio skalibrowanych kamer przemysłowych.*
4. *Implementacja oraz testy systemu w rzeczywistych warunkach zajezdni tramwajowej, jak również przeprowadzenie badań z wykorzystaniem zarówno osi wzorcowej, jak również pojazdów tramwajowych.*

Należy przy tym odróżnić niejako dwie części recenzowanej pracy. Pierwsza z nich to wkład natury inżynierskiej p. mgra inż. Arkadiusza Gancarczyka. Polega on na doskonałej znajomości układów elektrotechnicznych i elektronicznych, wielu rodzajów kamer oraz układów optycznych kamer, jak również różnorodnych pakietów oprogramowania, między innymi do akwizycji obrazów, ich przetwarzania, jak również kalibracji kamer. W dziedzinach tych, autor przedstawia imponującą sprawność. Jednakże druga ze wspomnianych części recenzowanej pracy, to wkład naukowy p. mgra inż. A. Gancarczyka. Chodzi tu głównie nie tylko o znajomość dziedziny widzenia komputerowego, ale również umiejętności zaproponowania, a następnie analizy, matematycznego modelu systemu wizyjnego. Model ten jest co prawda silnie zorientowany na aplikację pomiarową, jednakże ma też walory ogólniejsze, gdyż metoda ta z powodzeniem może być stosowana do pomiaru innych wielkości fizycznych i w podobnych warunkach pomiarowych. Niewątpliwy walor naukowy, to również umiejętność przeprowadzenia analizy wrażliwości pomiarowej, która pozwala odpowiedzieć na pytania o spodziewane błędy pomiarowe proponowanego rozwiązania. Jest to zagadnienie niebagatelne, gdyż zależności te są często trudne do analizy, gdyż zależą od wielu parametrów, o często nieznanym rozkładach statystycznych. Następnym z ważnych aspektów naukowych przedstawionych w pracy p. A. Gancarczyka, to umiejętność zaprojektowania oraz prawidłowego wykonania eksperymentu naukowego, a następnie analizy otrzymanych wyników wraz z podaniem przekonujących wniosków.

Wszystkie wyżej wymienione osiągnięcia świadczą o dużej dojrzałości naukowej, jak również o bogatym warsztacie inżynierskim, p. mgr inż. Arkadiusza Gancarczyka

Należy jednakże pamiętać, że w światowych badaniach naukowych, dziedzina pomiarów i analizy linii przemysłowych za pomocą widzenia maszynowego przeżywa prawdziwy rozkwit. Dzieje się tak ze względu na rozwój przemysłowy w wielu krajach i związane z tym zapotrzebowania, głównie do

inspekcji linii produkcyjnych, ale również ze względu na niezwykle dynamiczny wzrost mocy obliczeniowych komputerów - wystarczy wspomnieć systemy wielordzeniowe, czy też karty graficzne i układy programowalne FPGA - jak również rozwój matematycznych metod wnioskowania o obserwowanych scenach oraz oprogramowania komputerowego umożliwiającego realizację tych zadań. Praca p. Arkadiusza Gancarczyka wpisuje się dobrze w ten kontekst badań oraz opracowań systemów pomiarowych dla celów przemysłu. Szczególnie należy zwrócić tu uwagę na tak ważne połączenie nauki z przemysłem - w tym zakresie praca p. A. Gancarczyka może być uważana za wzorową. Tym niemniej, należy jednakże pamiętać że jest to rozwiązanie prototypowe, które - z tego co doczytałem w pracy - nie znalazło jeszcze szerszego zastosowania w codziennym serwisie w zajezdni. Oczywiście, nie umniejsza to dorobku doktoranta, tym niemniej dopiero wielomiesięczna lub nawet wieloletnia eksploatacja systemów tego typu pozwala na pokazanie faktycznych zalet, jak również i wad, danego rozwiązania.

4. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczącej o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Autor recenzowanej rozprawy doktorskiej, Pan mgr inż. Arkadiusz Gancarczyk wykorzystał wielorakie rozwiązania, dotyczące wizyjnych systemów pomiarowych, przedstawione zarówno w literaturze polskiej jak i światowej. Przedstawiony przegląd źródeł świadczy o dobrej znajomości tematu przez doktoranta. Przegląd literatury został zamieszczony w ostatnim rozdziale recenzowanej pracy (strony 116-119 pracy - wykazane 87 pozycji, jednakże brak referencji 76 oraz 77). Zakres zaprezentowanych prac z dziedziny rozpoznawania jest obszerny i w znacznej większości dotyczy prac nowych oraz ważnych dla dziedziny. Po przeglądzie zamieszczonych pozycji literaturowych, najliczniej reprezentowane są dziedziny kalibracji kamer oraz statystycznej analizy pomiarów. Świadczą one w bardzo pozytywny sposób o głównym nurcie badań przeprowadzonych w recenzowanej pracy. Autor zamieścił również obszerny przegląd metod pokrewnych dotyczących widzenia komputerowego, budowy oraz eksploatacji pojazdów szynowych oraz analizy i przetwarzania danych.

Jednakże zabrakło kilku ważnych moim zdaniem pozycji, które w bezpośredni sposób odnoszą się do przedmiotu badań. Chodzi tutaj głównie o dwie książki. Pierwsza książka, będąca w zasadzie ogólnoswiatowym podręcznikiem w dziedzinie widzenia komputerowego, to *Multiple View Geometry in Computer Vision* (Cambridge, 2003), napisana przez R. Hartleya i A. Zissermana. Tym bardziej szkoda, że autor nie zajrzał do tej książki, gdyż wiele z opisywanych tam metod przedstawionych jest w klarowny sposób, który niewątpliwie pozwoliłby na lepsze przedstawienie zagadnień opisanych

w pracy p. A. Gancarczyka. Druga z ważnych pozycji literaturowych, zatytułowana *Statistical Optimization for Geometric Computation. Theory and Practice* (Dover, 2005) autorstwa K. Kataniego dotyczy statystycznego podejścia do analizy scen za pomocą wielu obrazów. Doskonale przedstawione zostały tam zagadnienia analizy błędów związanych z tego typu pomiarami. W obecnych czasach rozwoju komunikacji i Internetu, obie są pozycje są łatwo dostępne.

Wnioski z przeglądu prac źródłowych sformułowane są jasno, a ewentualne uwagi natury polemicznej przedstawione zostały w następnym punkcie niniejszej recenzji.

Zamieszczony wykaz publikacji w recenzowanej pracy zawiera również dwie publikacje (jedna konferencyjna, a druga w czasopiśmie *Pomiary Automatyka Kontrola*), których współautorem jest p. mgr inż. A. Gancarczyk.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Rozprawa doktorska p. mgra inż. Arkadiusza Gancarczyka składa się z siedmiu rozdziałów oraz bibliografii, jak również wykazu niektórych symboli i oznaczeń (cenny byłby tu również spis haseł, tzw. indeks). Praca ta liczy 119 stron. Układ pracy jest uzasadniony, a przekaz klarowny oraz w większości miejsc zrozumiały. Należy stwierdzić, że od strony edycyjnej praca jest wykonana starannie, a liczne rysunki poprawiają jej czytelność. Pewną niedogodnością przy czytaniu jest skłonność p. A. Gancarczyka do długich rozdziałów, często z licznymi powtórzeniami, w których przeplatają się opisy stosunkowo różnych zagadnień. Znacznie lepsze byłoby wyodrębnienie w takim rozdziale podrozdziałów (chodzi tu np. o rozdziały 2.3 oraz 3.2, a już szczególnie 3.6). Jednakże są to tylko pewne uchybienia natury edycyjnej, nie wpływające na merytoryczną ocenę pracy. Pewne drobne wątpliwości natury edycyjnej umieściłem w dodatku tej recenzji.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Generalnie praca jest napisana klarownie, a przyjętą metodologię uznaję za prawidłową i w wielu miejscach pomysłową, szczególnie w kontekście stosunkowo specyficznego problemu pomiaru diagnostyki tramwajowych zestawów kołowych. Tym niemniej, po lekturze pracy nasuwają się pewne istotne pytania odnośnie przyjętej metodologii. Istnieje też wiele miejsc w tekście pracy, jak również w wyprowadzeniach matematycznych, które wymagają wyjaśnienia. Stąd też w dalszej części przedstawiam dwie sekcje - pierwsza dotyczy moich uwag odnośnie przyjętej metodologii, natomiast druga dotyczy zamieszczonego w pracy opisu metod, badań oraz wyników.

Uwagi dotyczące metodologii badań:

1. W przypadku metodologii odczytu położenia pikseli wiązki laserowej, znaczną poprawę położenia można otrzymać poprzez zastosowanie metody znajdowania wartości pod-pikselowych (ang. *subpixel*). Możliwe jest to po zastosowaniu interpolacji za pomocą np. wielomianu dopasowanego do punktów na dyskretnej siatce obrazowej. Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie ekstremum w położeniu pomiędzy dyskretnymi współrzędnymi pikselowym. Metoda ta opisana jest w wielu pozycjach literaturowych związanych z przetwarzaniem obrazów. Dla przykładu, w kontekście stereowizji, opisana jest np. w książce [48]. Zastosowano ją również do znajdowania deskryptorów SIFT (Lowe, D.: *Distinctive image features from scale-invariant keypoints*. International Journal of Computer Vision, 60 (2), 91–110, 2004). Niestety, autor nie zastosował tej dobrze znanej metody.
2. Do określenia parametrów modelu przy niepewnych pomiarach, bardzo użyteczna jest metoda RANSAC (ang. *RANdom SAmple Consensus*), również opisana w wymienionych pozycjach literaturowych. Szkoda, że autor do niej nie dotarł, gdyż metoda ta jest powszechnie stosowana do prawidłowego wyznaczania właśnie homografii.
3. Niewątpliwym walorem byłoby choćby zarysowanie możliwości zastosowanie prezentowanego systemu w innych zadaniach pomiarowych. Przecież wykorzystanie systemu laserowego oraz skalibrowanych kamer, umożliwia analizę wielu różnorodnych powierzchni odbijających wiązkę laserową. Dzięki temu możliwa jest analiza obserwowanego kształtu powierzchni. Być może możliwe jest zastosowanie klasyfikatorów, które po wytrenowaniu wzorcami prawidłowych kształtów, mogłyby klasyfikować obserwowaną powierzchnię jako spełniającą, bądź też nie, określone kryteria kształtu, czy też różnice od kształtu wzorcowego. Uwaga ta jednak jest raczej wskazówką oraz zachętą do dalszych badań.

Uwagi dotyczące zamieszczonego w pracy opisu metod, badań oraz wyników:

W rozdziale 2.3 autor przedstawia charakterystykę systemu wizyjnego do pomiaru wielkości geometrycznych kół. Rozdział ten dotyczy wielu zagadnień, które jednak opisane są w sposób ciągły, przeplatając się nawzajem. Prowadzi to do lekkiego zakłopotania, którego można by łatwo uniknąć dzieląc ten rozdział na podrozdziały. W przypadku wzorów (2.2)-(2.4) należy jasno określić układ współrzędnych, szczególnie że autor wyróżnił kilka układów. Jest to jedno z podstawowych zagadnień przy analizie systemów wizyjnych, gdyż z każdym modułem przeważnie można związać jego lokalny układ współrzędnych, np. z płaszczyzną każdej z kamer z osobna. Jednakże, analiza całego systemu wymaga znajomości transformacji pomiędzy poszczególnymi układami. Brak należytej staranności prowadzi tu często do niezrozumienia lub też błędów w analizie czy obliczeniach. Na str. 19 autor

stwierdza "Większość projektowanych systemów wizyjnych pracuje w bardzo dobrych warunkach pomiarowych". Być może ma to w celu podkreślenie trudnych warunków na zajezdni tramwajowej. Jednakże nie umniejszając trudności w tym przypadku, pozwolę sobie stwierdzić, że raczej regułą są właśnie trudne warunki pracy systemów wizyjnych. To zresztą często do dzisiaj stanowi barierę rozwoju tych systemów, albo znacznie wpływa na ich cenę, a co za tym idzie powszechność zastosowania. Wystarczy tu wspomnieć choćby systemy monitoringu ulicznego, systemy nadzoru linii produkcyjnych, nie wspominając już np. o systemach wizyjnych robotów podwodnych.

W matematycznym opisie kamer, str. 26, bardzo brakuje mi formalnego wprowadzenia definicji przekształcenia do i z współrzędnych homogenicznych (zwanymi również jednorodnymi). Przekształcenie to jest bardzo ważne, gdyż dzięki wprowadzeniu dodatkowego wymiaru, pozwala na uniknięcie nieliniowości w przekształceniach rzutowych. Autor wprowadza to przekształcenie w sposób niejawni, a należy pamiętać że każde przekształcenie musi być jasno określone dla jakich współrzędnych i jakim układzie współrzędnych obowiązuje.

W przypadku opisu parametru λ , o tzw. słabej perspektywie mówimy w przypadku gdy wartość ta jest mała. Oznacza to, że rozmiary obserwowanego obiektu są znacznie mniejsze od odległości tego obiektu od płaszczyzny rzutowania (kamery).

Str. 26-27 "Ponadto każdy obiekt trójwymiarowy zawiera informacje o swojej geometrii zapisane w układzie odniesienia tego obiektu". Jest to stwierdzenie co najmniej zastanawiające i raczej nietrafne, bo skoro tak by było, to informacje te można by łatwo odczytać, bez konieczności ich pomiaru.

Pomyłone są oznaczenia odcinka, długości odcinka oraz wektora z wykorzystaniem zapisu np. $|KC|$ we wzorze (2.2) służy do oznaczenia długości odcinka pomiędzy punktami K oraz C , w porównaniu z $A=|O P_w|$, jak we wzorze (3.5). Jest to nieprawidłowe i prowadzi to do niejednoznaczności. Korzystając z nowoczesnych możliwości edycyjnych, można np. wektory reprezentować jako \vec{A} .

Wzór (3.7) jest nieprawidłowy, gdyż wektory A oraz B są wyrażone w różnych układach współrzędnych, tj. A w układzie "w" (3.5), natomiast B w układzie "I", wzór (3.6).

Wzory (3.53) oraz (3.55) - niejasne użycie $x_{i,p}$ oraz $X_{N,p}$, w drugim wzorze. Z kolei, we wzorze (3.66) znowu mamy $x_{N,p}$.

Nieprecyzyjna definicja homografii, podana na str. 44 "Homografia jest prostą liniową rzutową transformacją znanych punktów w jednym systemie współrzędnych na inny planarny system odniesienia". Wymagane jest podanie precyzyjnej definicji.

We wzorze (4.8), niejasne oznaczenia μ_x oraz μ_y . Co to za średnie? Jak są liczone? Z danych, czy też z ich różnic, jak we wzorze (4.7)?

W rozdziale 4.2 aż dziwi, że autor nie policzył parametrów statystycznych pomiarów przedstawionych na rys. 4.4 - 4.6, a dokonuje wyłącznie analizy wizualnej. Podobnie wykres 4.18, str. 64.

Str. 66, stwierdzenie "zwracany jest wynik w postaci zestawu parametrów modelu kamery, dla którego funkcja z równania (3.86) osiąga minimum". Dlaczego równanie (3.86)? Jak sformułowane jest poszukiwanie wspomnianego minimum. Dlaczego to wyrażenie?

W przypadku użytych narzędzi programowych, skoro autor używa gotowych pakietów kalibracyjnych, to należałoby przytoczyć, czy też podać odwołanie do opisu producenta tego pakietu, gdyż nie ma gwarancji jaki dokładnie algorytm jest zaimplementowany w użytych pakietach i czy zgadza się z opisem przedstawionym w pracy. Korzystanie z gotowych pakietów obliczeniowych jest jak najbardziej wskazane, ale pod warunkiem, że jesteśmy w stanie kontrolować wykonywane przez nie obliczenia. Szczególnie jest to ważny problem w przypadku mieszania różnych pakietów - autor raz używa oprogramowanie National Instruments (str. 50), a innym razem Matlab (str. 54).

Na str. 56, niejasne jest stwierdzenie "różnice pomiędzy punktami wzorca rzutowanymi na płaszczyznę obrazu" - skąd w tym przypadku znamy położenia punktów na płaszczyźnie obrazu?

Str. 73 - skąd otrzymana jest wartość $\delta_R=0,05$ mm?

Jak zostały otrzymane wartości w tabeli 5.3?

Str. 91 - "wartość trzeciej współrzędnej $z_{i,w}=0$ ", tyle że we wzorze (3.17) nie ma tak oznaczonej współrzędnej. Podobnie nieprawidłowe stwierdzenie "Taki model w odróżnieniu od modelu kamery otworkowej [...]", ale przecież to ciągle jest model kamery otworkowej, tak jak we wzorze (6.1). Żaden inny nie został wprowadzony.

Str. 93 - co jest argumentem funkcji F , wartość p , czy też r_d ? Jest to różnie oznaczone w (6.4) oraz we wzorze (6.6).

W algorytmie w rozdziale 6.3, niejasne jest kryterium stopu, tzn. autor stwierdza że: "Ostatecznym zestawem parametrów modelu jest ten, dla którego osiągnięto najlepsze dopasowanie". Ale jak jest obliczana wartość tego dopasowania? Brak opisu tego ważnego etapu. W algorytmie na Rys. 6.2, kiedy podejmowana jest decyzja skoku oznaczona jako "źle" na diagramie?

W analizie wyników, str. 101, autor pisze: "Program szuka metodą iteracyjną zestawu parametrów, dla których występuje najlepsze dopasowanie [...]" - ale jak dokładnie jest to przeprowadzane? Jaka metoda optymalizacyjną przyjęto? Przecież nie można zdawać się tylko na bliżej nieznaną algorytm z pakietu oprogramowania. Poniżej czytamy "Miarą dopasowania jest wykres błędów pokazany na Rys. 6.8" - to bardzo mało użyteczna miara, gdyż wykres nie może być rzetelną miarą.

Str. 106 - czytamy: "proces skanowania tych linii, w celu znalezienia współrzędnych ich środka". Jest to stwierdzenie niejasne, bo jakiego "środka" tak naprawdę szukamy?

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Przydatność rozprawy Pana mgra inżyniera Arkadiusza Gancarczyka, dla nauk technicznych uważam za znaczącą, zarówno w aspekcie osiągnięć teoretycznych, jak i aplikacji przemysłowych. Praca stanowi dobry przykład połączenia badań naukowych w celu zastosowań przemysłowych. Przydatność ta jest pochodną głównych i samodzielnych osiągnięć autora, o których była mowa w punkcie 3 recenzji.

W szczególności, podkreślić należy główne osiągnięcie, czyli opracowanie teoretyczne toru wizyjnego systemu do pomiaru parametrów tramwajowych zestawów kołowych oraz analizę dokładności pomiarowej takiego systemu, jak również opracowanie modelu matematycznego do odtwarzania rzeczywistych profili kół tramwajowych, na podstawie oświetlających je obrazów wiązek laserowych.

Osiągnięcia natury inżyniersko eksperymentalnej, to opracowanie projektu oraz wykonanie systemu wizyjnego, jak również implementacja oraz przeprowadzenie badań z wykorzystaniem rzeczywistych pojazdów tramwajowych.

Jestem przekonany, że wyżej wymienione opracowania, jak i projekt całego systemu, mogą stanowić przykład podczas powstawania innych systemów tego typu. Opisane eksperymenty oraz analiza błędów pomiarowych mogą stanowić ważne wskazówki dla innych badaczy. Właściwe przekazywanie opracowanych metod oraz otrzymanych wyników to równie ważne aspekty każdej działalności naukowej, w co dobrze wpisuje się praca p. mgra inż. A. Gancarczyka.

8. Wnioski końcowe:

Podsumowując stwierdzam, że postawione w rozprawie zadanie badawcze zostało rozwiązane w sposób właściwy, a tezy wykazane. Uzyskane rezultaty stanowią oryginalny własny wkład autora rozprawy Pana mgra inżyniera **Arkadiusza Gancarczyka** w rozwój dziedziny elektrotechniki, a w szczególności dziedziny nowoczesnych technik pomiarowych i przetwarzania sygnałów wizyjnych. Wykazał się on przy tym znajomością najnowszych metod budowy systemów tzw. widzenia maszynowego, algorytmów przetwarzania obrazów, kalibracji kamer, bardzo dobrym opanowaniem warsztatu badawczego, a w rezultacie również znaczną dojrzałością naukową.

Recenzowaną pracę oceniam jako **spełniającą wymagania stawiane rozprawom doktorskim**. Wnioskuje o jej przyjęcie oraz o dopuszczenie mgra inż. **Arkadiusza Gancarczyka** do publicznej obrony.



Bożenka Cypanik