

Łódź, dn. 29 sierpnia 2021 r.

dr hab. inż. **Anna Fabijańska**, prof. uczelni
Instytut Informatyki Stosowanej
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki,
Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka
Ul. Stefanowskiego 18/22
90-924 Łódź

D Z I E K A N
Wydziału Elektrycznego

dr hab. inż. Krzysztof Okarma, prof. ZUT

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej **mgra inż. Jarosława Fastowicza** na temat:

Wizyjna ocena jakości wydruków 3D

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Okarma, prof. ZUT

Promotor pomocniczy: dr inż. Piotr Lech

1. Podstawa sporządzenia recenzji

Niniejsza recenzja została sporządzona na prośbę Pana prof. dr hab. inż. Jacka Przepiórskiego – Prorektora ds. Nauki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, wyrażoną w piśmie znak WE/4120/1018/2021 z dnia 1 lipca 2021 r. Recenzja została sporządzona na podstawie przedłożonego tekstu rozprawy w formie zbioru powiązanych tematycznie artykułów naukowych oraz załączonych do rozprawy oświadczeń o udziale merytorycznym Doktoranta w osiągnięciach naukowych wchodzących w skład ww. zbioru artykułów.

2. Zakres tematyczny, problem naukowy i teza rozprawy

Rozprawa doktorska **mgra inż. Jarosława Fastowicza** dotyczy ciekawego problemu automatycznego określania jakości druku 3D. Doktorant **poszukuje uniwersalnej, bezreferencyjnej miary, która pozwoli na ocenę jakości wydruku 3D na podstawie obrazu z kamery przedstawiającego drukowaną powierzchnię** – w szczególności jej boczny widok reprezentujący kolejne wydrukowane warstwy. Taka miara, zastosowana do bieżącego monitorowania jakości druku 3D pozwoliłaby na automatyczne zatrzymanie procesu drukowania w momencie stwierdzenia jego istotnych wad, co z kolei zmniejszyłoby koszty (czasowe i finansowe) związane z koniecznością ponownego wydruku. **Biorąc pod uwagę obecną, stale rosnącą popularność druku 3D oraz jego szerokie zastosowania, problem podjęty w rozprawie uważam za aktualny i istotny.** Jego finalne rozwiązanie będzie miało duży potencjał aplikacyjny. Warto również zaznaczyć, że w literaturze istnieje ograniczona liczba doniesień dedykowanych rozważanemu przez Doktoranta problemowi wykorzystania wizji komputerowej do oceny jakości wydruków 3D, co dodatkowo podnosi znaczenie prac opisanych w rozprawie.

Poszukując uniwersalnej i bezreferencyjnej miary jakości druku 3D bazującej na właściwościach wydrukowanej powierzchni, mgr inż. Jarosław Fastowicz sięga po narzędzia z obszaru analizy obrazów cyfrowych, proponując **metryki bazujące na cechach teksturalnych, miarach strukturalnego podobieństwa obrazów oraz wybranych detektorach cech**. Doktorant podejmuje również problem uniezależnienia miary jakości druku 3D od koloru użytego filamentu. **Cel rozprawy jest jasno zdefiniowany, podobnie jak jej teza brzmiąca:**

- *Zastosowanie sprzężenia wizyjnego, z wykorzystaniem algorytmów przetwarzania obrazów i oceny podobieństwa tekstur, umożliwi detekcję błędów na powierzchni drukowanego przedmiotu oraz wiarygodną ocenę jakości wydruków według przyjętej skali.*

Należy zaznaczyć, że prace mgra inż. Jarosława Fastowicza mają charakter eksperymentalny, ograniczony do fragmentów wydruków 3D o jednakowych wymiarach i regularnym kształcie, w szczególności obrazów ich powierzchni uzyskanych w kontrolowanych warunkach oświetlenia za pomocą skanera lub/i aparatu fotograficznego. Stworzenie wykorzystanej w eksperymentach bazy wydruków 3D, zdjęć i skanów ich powierzchni oraz przypisanych do nich subiektywnych ocen jakości stanowiło dodatkowy cel rozprawy. W tym celu Doktorant opracował też metody zaburzania pracy drukarek 3D w taki sposób, aby uzyskać wady wydruku o określonym charakterze.

Zakres tematyczny rozprawy, pozwala w mojej ocenie zakwalifikować rozprawę do **dziedziny nauk technicznych oraz dyscypliny automatyka i robotyka**.

3. Charakterystyka cyklu publikacji wchodzących w skład rozprawy

Rozprawa doktorska mgra inż. Jarosława Fastowicza ma formę zbioru powiązanych tematycznie artykułów naukowych, uzupełnionego o krótkie podsumowanie uwzględniające m.in. omówienie koncepcji rozprawy doktorskiej oraz omówienie zawartości poszczególnych prac ją stanowiących. W szczególności, rozprawę stanowi 13 współautorskich artykułów naukowych opublikowanych w latach 2016-2020 i wskazanych poniżej (w nawiasach podano deklarowany wkład Doktoranta w powstanie poszczególnych publikacji, potwierdzony załączonymi do rozprawy oświadczeniami współautorów):

- [A1] **J. Fastowicz (50%)**, K. Okarma: „No-Reference Quality Assessment of 3D Prints Based on the GLCM Analysis”, *Proceedings of 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, pp. 788–793, 2016
- [A2] **J. Fastowicz (50%)**, K. Okarma: „Texture Based Quality Assessment of 3D Prints for Different Lighting Conditions”, *Computer Vision and Graphics, LNCS vol. 9972*, L.J. Chmielewski, A. Datta, R. Kozera, K. Wojciechowski (ed.), Springer International Publishing, pp. 17–28, 2016
- [A3] K. Okarma, **J. Fastowicz (33.3%)**, M. Teclaw: „Application of Structural Similarity Based Metrics for Quality Assessment of 3D Prints”, *Computer Vision and Graphics, LNCS vol. 9972*, L.J. Chmielewski, A. Datta, R. Kozera, K. Wojciechowski (ed.), Springer International Publishing, pp. 244–252, 2016
- [A4] K. Okarma, **J. Fastowicz (50%)**: „Quality Assessment of 3D Prints Based on Feature Similarity Metrics”, *Image Processing and Communications Challenges 8, AISC vol. 525*, R.S. Choraś (ed.), Springer International Publishing, pp. 104–111, 2017

- [A5] **J. Fastowicz (50%)**, K. Okarma: „Entropy Based Surface Quality Assessment of 3D Prints”, *Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems*, **AISC** vol. 573, R. Silhavy, R. Senkerik, Z. Kominkova Oplatkova, Z. Prokopova, P. Silhavy (ed.), Springer International Publishing, pp. 404–413, 2017
- [A6] **J. Fastowicz (25%)**, D. Bąk, P. Mazurek, K. Okarma: „Estimation of Geometrical Deformations of 3D Prints Using Local Cross-Correlation and Monte Carlo Sampling”, *Image Processing and Communications Challenges 9*, **AISC** vol. 681, M. Choraś and R.S. Choraś (ed.), Springer International Publishing, pp. 67–74, 2018
- [A7] K. Okarma, **J. Fastowicz (50%)**: „Color Independent Quality Assessment of 3D Printed Surfaces Based on Image Entropy”, *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Recognition Systems CORES 2017*, **AISC** vol. 578, M. Kurzyński, M. Woźniak, R. Burduk (ed.), Springer International Publishing, pp. 308–315, 2018
- [A8] **J. Fastowicz (25%)**, M. Grudziński, M. Teclaw, and K. Okarma: „Objective 3D Printed Surface Quality Assessment Based on Entropy of Depth Maps”, **Entropy**, vol. 21, no. 1, art. no. 97, 2019
- [A9] K. Okarma, **J. Fastowicz (50%)**: „Adaptation of Full-Reference Image Quality Assessment Methods for Automatic Visual Evaluation of the Surface Quality of 3D Prints”, **Elektronika ir Elektrotechnika**, vol. 25, no. 5, pp. 57–62, 2019
- [A10] **J. Fastowicz (50%)**, K. Okarma: „Quality Assessment of Photographed 3D Printed Flat Surfaces Using Hough Transform and Histogram Equalization”, **Journal of Universal Computer Science**, vol. 25 no. 6, pp. 701-717, 2019
- [A11] K. Okarma, **J. Fastowicz (50%)**: „Improved Quality Assessment of Colour Surfaces for Additive Manufacturing Based on Image Entropy”, **Pattern Analysis and Applications**, vol. 23, no. 3, pp. 1035–1047, 2020
- [A12] **J. Fastowicz (34%)**, P. Lech, K. Okarma: „Combined Metrics for Quality Assessment of 3D Printed Surfaces for Aesthetic Purposes: Towards Higher Accordance with Subjective Evaluations”, **Computational Science – ICCS 2020**, **LNCS** vol. 12143, V. Krzhizhanovskaya, G. Závodszy, M. Lees, J. Dongarra, P. Sloat, S. Brissos, J. Teixeira (ed.), Springer International Publishing, pp. 326–339, 2020
- [A13] K. Okarma, **J. Fastowicz (55%)**, P. Lech, V. Lukin: „Quality Assessment of 3D Printed Surfaces Using Combined Metrics Based on Mutual Structural Similarity Approach Correlated with Subjective Aesthetic Evaluation”, **Applied Sciences**, vol. 10, no. 18, art. no. 6248, 2020

W ujęciu ilościowym, ww. zbiór publikacji obejmuje:

- **pięć artykułów w czasopismach** uwzględnionych w bazie **Journal Citation Reports (JCR)** o łącznym wskaźniku wpływu IF_{2020} równym: 9.526;
- **osiem publikacji pokonferencyjnych** w tym:
 - jedna na konferencji indeksowanej w bazie CORE (ranking A),
 - siedem indeksowanych w bazie Web of Science (w tym 6 wydanych w postaci rozdziałów w seriach wydawniczych wydawnictwa Springer).

Od strony bibliometrycznej, ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Jarosława Fastowicza przedstawia się więc bardzo dobrze. Warto zauważyć, że zdecydowana większość prac stanowiących rozprawę to publikacje współautorskie wyłącznie z promotorem (lub promotorami), w których udział Doktoranta waha się w zakresie 25-55% i jest jasno określony.

4. Oryginalny wkład Autora

Publikacje wchodzące w skład zbioru powiązanych tematycznie artykułów naukowych stanowiących rozprawę doktorską mgr inż. Jarosława Fastowicza przedstawiają kolejne etapy poszukiwania uniwersalnej i niezawodnej miary jakości druku 3D, którą można by wyznaczać na podstawie obrazu wydrukowanej powierzchni. Proponowane przez Doktoranta rozwiązania w większości bazują na spostrzeżeniu, że dobrej jakości wydruk 3D składa się z kolejnych warstw nałożonych jedna na drugą formujących regularny 'liniowy' wzór (teksturę) - jednakowy dla wszystkich fragmentów wydruku 3D. Każde zaburzenie tej regularności świadczy o wadach wydruku, oraz degradacji jego jakości. Z tego też powodu, do oceny jakości wydruku Doktorant zaproponował metody w ogólnym ujęciu bazujące na analizie cech teksturalnych oraz analizie strukturalnego podobieństwa wybranych fragmentów badanej powierzchni.

W bardziej szczegółowym ujęciu, autorskie rozwiązania Doktoranta dedykowane ocenie jakości druku 3D i stanowiące Jego oryginalne osiągnięcia przedstawione w rozprawie, zasadniczo można podzielić na cztery grupy:

A. Miary jakości druku 3D bazujące na analizie cech teksturalnych obrazów wydrukowanej powierzchni

W pierwszym etapie badań Doktorant zaproponował, aby do oceny jakości wydruków 3D na podstawie informacji wizyjnej skorzystać z cech **teksturalnych Haralicka, możliwych do wyznaczenia z macierzy współwystępowania jasności pikseli** (ang. *Gray-Level Co-occurrence Matrix*) [A1,A2]. U podstaw tego wyboru leżało spostrzeżenie, że dla regularnego „liniowego” wzoru utworzonego przez kolejne warstwy filamentu, wartości wybranych cech, wyznaczone z GLCM dla rosnących odległości pomiędzy parami pikseli zlokalizowanymi w kierunku w poprzek warstw wydruku powinny mieć periodyczny charakter. Taka właściwość nie występuje natomiast dla pikseli zlokalizowanych wzdłuż warstw. **Doktorant potwierdził tą hipotezę eksperymentalnie w odniesieniu do korelacji, kontrastu, energii, oraz jednorodności**, wykazując jednocześnie, że periodyczny charakter zmian w funkcji odległości między pikselami uwzględnionej podczas wyznaczania GLCM wyraźnie maleje wraz z degradacją jakości wydruku. W kolejnym etapie prac [A2] skupił się na analizie jednorodności (ang. *homogeneity*) jako najbardziej obiecującej cechy. Analizując charakter jej zmian w odniesieniu do skanowanych próbek wydruków o czterech kolorach uzyskanych z dwóch różnych drukarek wykazał, że dla druku słabej jakości amplituda jednorodności jest nawet o rząd wielkości mniejsza, niż w przypadku druku wysokiej jakości. Potencjalnie, amplituda jednorodności może być więc wykorzystywana jako miara jakości druku 3D. Z uwagi na duże koszty obliczeniowe, w dalszych pracach Doktorant zrezygnował jednak z rozwijania miar jakości druku wyznaczonych z serii GLCM. Jednak zaobserwowane zależności i sam pomysł należy uznać za ciekawe i oryginalne podejście.

W kolejnym etapie prac Doktorant sprawdził możliwość zastosowania **entropii jako miary jakości wydruku 3D**, bazując na obserwacji, że dla druku gorszej jakości z uwagi na zaburzenie regularnej tekstury utworzonej przez kolejne warstwy filamentu, entropia będzie wyższa, aniżeli w przypadku druku dobrej jakości. Wstępne eksperymenty przeprowadzone na skanach wydrukowanych powierzchni potwierdziły tą hipotezę [A5], wskazując jednak na **wyraźną zależność entropii od koloru filamentu** oraz konieczność istnienia wzorcowego wydruku dobrej jakości do kalibracji miary. Aby uniezależnić ocenę od tych dwóch czynników,

w kolejnym etapie Doktorant zaproponował miarę jakości druku 3D będącą iloczynem globalnej entropii obrazu przedstawiającego wydrukowaną powierzchnię oraz jej wariancji wyznaczonej na podstawie 16 bloków obrazu o jednakowym rozmiarze [A7]. W eksperymentach na 18 próbkach w pięciu kolorach wykazał, że dla tak zdefiniowanej miary możliwe jest znalezienie wartości progowej, która pozwoli na oddzielenie większości próbek dobrej jakości, od próbek złej jakości, dla miary wyznaczonej dla komponentu *hue* w przestrzeni barw HSV oraz średniej kanałów RGB. Każda z ww. przestrzeni barw posiada jednak ograniczenia dla filamentów o określonym kolorze. Z tego też powodu Doktorant zaproponował **udoskonaloną miarę będącą zlogarytmowanym iloczynem ww. miar składowych wyznaczonych dla przestrzeni barw RGB oraz HSV**. Dla tak wyznaczonej miary możliwe było znalezienie progu poprawnie rozdzielającego wszystkie próbki dobrej jakości, od próbek złej jakości. Eksperymenty na szerszym zbiorze danych nie potwierdziły tej skuteczności, w związku z powyższym Doktorant **uzupełnił miarę o czynnik korygujący wyznaczony z uwzględnieniem składowych RGB koloru, który pozwolił zwiększyć niezależność miary od koloru filamentu** [A11]. Miara przetestowana została na zbiorze 78 wydruków o różnej barwie i jakości. Przy uwzględnieniu podziału obrazu na 256 bloków, możliwe było bezbłędne oddzielenie próbek dobrej jakości od próbek złej jakości względem empirycznie ustalonego progu. Doktorant wykazał również, że skuteczność miary spada wraz ze spadkiem liczby bloków obrazu uwzględnionych przy wyznaczeniu entropii.

Innym autorskim pomysłem na uniezależnienie miary jakości druku bazującej na entropii od koloru filamentu jest także wykorzystanie map głębi analizowanej powierzchni uzyskanych ze skanera 3D. W tym podejściu, mapa jest poddawana przetwarzaniu wstępnemu z wykorzystaniem metody CLAHE, dzielona na 64 bloki (8×8), z których następnie wyznaczana jest **miara będąca logarytmem z iloczynu globalnej entropii, średniej entropii z 64 bloków obrazu oraz potęgi wariancji entropii w tych blokach**. Jak wykazano w eksperymentach przeprowadzonych na bazie 108 wydruków ABS oraz 18 wydruków PLA o różnych kolorach i jakościach ocenionych przez ekspertów, dla tak zdefiniowanej miary możliwe jest znalezienie wartości progowej pozwalającej na rozdzielenie druków złej od druków dobrej jakości ze skutecznością odpowiadającą mierze F na poziomie 0.928.

B. Miary jakości druku 3D bazujące na podobieństwie strukturalnym bloków (fragmentów) obrazów wydrukowanej powierzchni

Druga grupa zaproponowanych przez Doktoranta miar jakości druku 3D bazuje na miarach strukturalnego podobieństwa obrazów – w szczególności wybranych wariantach pochodnych indeksu SSIM (ang. *Structural Similarity Index*) [A3, A4, A9]. Doktorant zaproponował, aby metryki z tej grupy wykorzystać do określenia strukturalnego podobieństwa bloków obrazu przedstawiającego analizowaną powierzchnię wydruku 3D. W przypadku idealnego wydruku struktura (tj. układ kolejnych warstw filamentu) wszystkich bloków obrazu powinna być jednakowa, skutkując wysokimi wartościami indeksu strukturalnego podobieństwa. Wady wydruku z kolei powinny obniżać wartość indeksu. W celu wyznaczenia miary jakości druku 3D według pomysłu Doktoranta, obraz powierzchni jest więc dzielony na ustaloną liczbę bloków o jednakowym rozmiarze. Dla każdej unikalnej pary bloków obrazów wyznaczany jest indeks strukturalnego podobieństwa, a wynik ostateczny jest średnią wartości uzyskanych dla wszystkich par bloków. W celu uniknięcia obniżenia miary w związku z ew. przesunięciem względem siebie bloków, przed obliczeniem strukturalnego podobieństwa, są one

odpowiednio wyrównywane, względem ich korelacji [A9]. Doktorant sprawdził skuteczność wskaźnika SSIM w oryginalnej postaci [A3, A9], oraz jego wariantów, w szczególności, CW-SIMM (ang. *Complex-Wavelet*), STSIM (ang. *Structural Texture Similarity*) [A3], FSIM (feature similarity metric) oraz FSIM (ang. *Feature Similarity Metric*) [A4, A9]. Rozważył również przydatność stosunku sygnału do szumu PSNR (ang. *Peak Signal to Noise Ratio*) oraz korelacji wzajemnej [A6]. W drodze eksperymentów przeprowadzonych w odniesieniu do 41 obrazów powierzchni wydruków uzyskanych dla filamentów o różnych barwach, Doktorant wykazał potencjalną przydatność indeksów STSIM [A3] oraz FSIM [A4] w określaniu jakości druku 3D, zarówno w odniesieniu do obrazów będących skanami, jak i zdjęciami drukowanych powierzchni. Skuteczność miary wykorzystującej indeks FSIM, oraz jego wyraźną przewagę nad SSIM oraz PSNR w ocenie jakości druku 3D potwierdził w kolejnych eksperymentach na rozszerzonym zbiorze próbek, obejmującym zdjęcia powierzchni 124 wydruków uzyskanych z trzech różnych urządzeń, z wykorzystaniem filamentów typu PLA oraz ABS o różnych kolorach [A9]. Doktorant zbadał również wpływ liczby bloków (2×2, 3×3 oraz 4×4) obrazu na skuteczność miary, dla 16 bloków uzyskując skuteczność określenia jakości wydruku względem subiektywnej oceny na poziomie miary F równej 0.975 (4 błędy na 124 próbki), zakładając oddzielną analizę każdego koloru. Pewnym ograniczeniem zaproponowanej przez Doktoranta metryki jest więc jej wrażliwość na kolor filamentu. Eksperymenty wykazały, że wartość miary zależy od barwy filamentu, a różne barwy mogą wymagać różnych sposobów konwersji do skali szarości oraz wartości progowych, jeżeli miara FSIM ma być przydatna w proponowanej metryce [A4, A9].

C. Miara jakości druku 3D bazująca na transformacie Hougha

Bazując na spostrzeżeniu, że tekstura powierzchni wydruku 3D w obrazie cyfrowym reprezentowana jest przez naprzemienne ciemniejsze i jaśniejsze liniowe warstwy, Doktorant zaproponował, aby jakość wydruku oceniać na podstawie średniej długości linii wykrytych w obrazie jego powierzchni [A10]. W tym celu wykorzystał transformatę Hougha do detekcji linii w obrazie przyłożoną (ze względów optymalizacyjnych) do jego losowo wybranych fragmentów. Etap ten poprzedza konwersja obrazu do skali szarości, wyrównywanie kontrastu metodą CLAHE oraz progowanie metodą Ostu. Dodatkowo, w celu uniezależnienia metody od koloru wydruku, dla jasnych filamentów Doktorant zaproponował współczynnik skali zależny od luminancji, mający na celu korektę wyznaczonej długości linii z uwagi na utrudnione zadanie jej wykrycia. W procesie wyznaczenia autorskiej miary losowo wybieranych jest 40 okien o rozmiarze 150x300 pikseli dla obrazów (skanów o rozdzielczości 1662 x 1662 pikseli). Średnia długość wykrytej linii jest następnie logarytmowana w celu uzyskania końcowej miary jakości druku. Doktorant wyznaczył eksperymentalnie, że dla tak zdefiniowanych parametrów metody wartość miary, która pozwala odseparować druki dobrej i złej jakości to 5.01, pozwalając na osiągnięcie miary F na poziomie 0.952 dla 88 obrazów przedstawiających skany wydrukowanych powierzchni. Doktorant zaproponował również rozszerzenie procedury wyznaczenia miary jakości druku dla zdjęć powierzchni, które są trudniejsze w analizie od skanów, z uwagi na możliwe nierównomierne oświetlenie i rozbłyki światła. Rozszerzona procedura wyznaczenia miary obejmuje filtrację kierunkową wzdłuż linii zastosowaną przed progowaniem na etapie przetwarzania obrazu oraz nową miarę uwzględniającą łączną długość wykrytych linii pomnożoną przez wyznaczony empirycznie współczynnik korekcji. Stosując zaproponowaną miarę Doktorant osiągnął wynik podziału wydruków na te dobrej i złej jakości, na poziomie miary F równej 0.824, gdzie

spadek dokładności spowodowany był problemem w działaniu metody dla jasnych wydruków.

D. Hybrydowe miary jakości druku 3D

Mając na uwadze zalety i ograniczenia opracowanych wcześniej miar jakości druku 3D, Doktorant zaproponował miarę hybrydową, zdefiniowaną jako iloczyn indywidualnych miar ważonych potęgą [A12, A13]. Ponadto, dokonał optymalnego wyboru miar składowych oraz ich wag, w celu maksymalizacji korelacji miary hybrydowej z subiektywną oceną przez ludzi. W tym celu przygotował bazę 107 wydruków uzyskanych z trzech drukarek z wykorzystaniem dziewięciu kolorów filamentu ABS. Dla każdej z próbek w bazie istniała fotografia wykonana przy kontrolowanym oświetleniu, mapa głębi oraz ocena jakości próbki druku przez 92 osoby w pięciostopniowej. Doktorant eksperymentalnie sprawdził korelację indywidualnych miar oraz miar hybrydowych (z uwzględnieniem różnych kombinacji miar składowych) z uśrednioną oceną subiektywną. Spośród miar indywidualnych najwyższą korelację z subiektywną oceną wykazała miara bazująca na FSIM (PCC na poziomie 0.68), z tego też powodu została włączona do każdej z rozważanych miar hybrydowych. Te ostatnie uwzględniały kombinacje od dwóch do pięciu miar składowych (z uwzględnieniem miary bazującej na entropii, miary bazującej na transformacji Hougha [A12], oraz miar wykorzystujących indeksy strukturalnego podobieństwa, takie, jak FSIM, CW-SIMM, MSCD, ESSIM, GSM, ASIM, i kilka innych, które zostały wybrane w drodze bardzo starannego przeglądu literatury, wyznaczone dla różnej liczby bloków obrazu [A13]). Każda ze sprawdzonych miar hybrydowych, w lepszym stopniu korelowała z subiektywną oceną przez ludzi, aniżeli pojedyncze miary składowe, przy czym najwyższa korelacja na poziomie 0.85 PCC uzyskana została dla zestawu miar FSIM, CW-SIMM, MSCD, ESSIM oraz GSM, z wagami wybranymi w drodze optymalizacji.

Pomimo przyjętych uproszczeń, wynikających z analizy obrazów wyłącznie płaskich fragmentów wydruków 3D, uzyskanych w kontrolowanych warunkach oświetlenia, przeprowadzone przez Doktoranta eksperymenty **potwierdziły** w mojej ocenie **tezę rozprawy**, wykazując, że możliwa jest automatyczna ocena jakości druku 3D na podstawie informacji wizyjnej. **Cel rozprawy został zatem osiągnięty.**

5. Uwagi o charakterze krytycznym i polemicznym

Zagadnienia, które w recenzowanej rozprawie budzą moje zastrzeżenia lub wątpliwości przedstawiam poniżej. Większość z tych uwag ma jednak charakter polemiczny i stanowi podstawę do dyskusji podczas publicznej obrony rozprawy.

- A. Jakkolwiek miary jakości druku 3D bazujące na informacji wizyjnej zaproponowane w rozprawie stanowią ciekawe propozycje potwierdzające tezę rozprawy, mam wątpliwość co do ich uniwersalności oraz braku wymogu istnienia wzorca (lub zestawu wzorców). We wszystkich eksperymentach przeprowadzonych przez Doktoranta wartości progowe miar jakości druku pozwalające na oddzielenie wydruków dobrej jakości od wydruków złej jakości wyznaczone zostały w sposób empiryczny lub eksperymentalny - czasami w wyniku silnej optymalizacji parametrów miar pod kątem maksymalizacji dokładności podziału dostępnych

- próbek druku na dwie rozważane grupy. Optymalizacja prowadzona była w odniesieniu do ograniczonego zbioru próbek. Znalezienie wartości progowej dla wydruków dobrej i złej jakości wymagało obecności próbek z obu tych grup. Jak zatem Doktorant ocenia uniwersalność opracowanych metod oceny jakości druku 3D, w szczególności wyznaczonych w eksperymentach wartości progowych oddzielających druk dobrej jakości od druku złej jakości, oraz uniwersalność wartości parametrów ustalonych w drodze optymalizacji? Czy testowano skuteczność autorskich miar na próbkach innych niż te wykorzystane do wyznaczenia wartości progowych? Czy można stwierdzić, że któraś z wyznaczonych wartości progowych autorskich miar jakości jest uniwersalna dla wszystkich wydruków? W mojej ocenie zastosowanie miar w obecnej postaci w dalszym ciągu wymaga swego rodzaju kalibracji – eksperymentu podobnego do opisanych przez Doktoranta, który pozwoli wyznaczyć stosowne wartości progowe oraz wartości parametrów miar.
- B. W poszczególnych artykułach wchodzących w skład rozprawy Doktorant wielokrotnie podkreśla znaczenie efektywności wyznaczania miar jakości druku 3D, z uwagi na potrzebę ich zastosowaniach do bieżącego monitorowania procesu druku. Nie wskazuje jednak zasobów komputera (czasu oraz pamięci) potrzebnych do wyznaczenia proponowanych miar jakości druku 3D. Jak zatem te zasoby kształtują się dla poszczególnych, zaproponowanych przez Doktoranta miar?
- C. Opisane w rozprawie eksperymenty dotyczą obrazów przedstawiających małe powierzchnie (35 mm × 35 mm) w dużej rozdzielczości (nie mniej, niż 1600×1600 pikseli). Jak Doktorant ocenia możliwość rozszerzenia opracowanych metod oceny jakości druku 3D do rzeczywistych wydruków – zarówno w kontekście uzyskania obrazów o wymaganej rozdzielczości, jak również czasu ich przetwarzania?
- D. W kontekście poprzedniego pytania – jak rozdzielczość obrazu oraz grubość kolejnych warstw wydruku wpływają na skuteczność zaproponowanych przez Doktoranta miar jakości druku 3D oraz, w odniesieniu do miar bazujących na indeksach strukturalnego podobieństwa, na optymalną liczbę bloków, na którą należy podzielić obraz?
- E. Autorskie metody Doktoranta zweryfikowano na małych, regularnych, płaskich fragmentach wydruku 3D (prostokątności o ustalonych wymiarach), których obrazy uzyskano w kontrolowanych warunkach oświetlenia. Jest to znaczne uproszczenie problemu. Jak zatem Doktorant ocenia możliwość i sposób adaptacji autorskich rozwiązań do rzeczywistych wydruków będących zazwyczaj obiektami o wklęsłych lub/i wypukłych kształtach? Które z zaproponowanych w rozprawie metod oceny jakości druku 3D mają w ocenie Doktoranta największy potencjał adaptacji do rzeczywistych warunków?
- F. W artykule [A8] Doktorant nie wyjaśnił, jakie jest uzasadnienie dla wzoru (2) – w szczególności, w jaki sposób i dlaczego została ustalona jego postać oraz parametry, w tym wartość potęgi w trzecim składniku.
- G. Analogicznie, w artykule [A11] Doktorant nie wyjaśnił, jakie jest uzasadnienie dla wzoru (3) w szczególności, w jaki sposób i dlaczego została ustalona jego postać oraz parametry. Czy wartości parametrów wskazane przez Doktoranta można uznać za uniwersalne? W tym samym artykule, w komentarzu do wzoru (4), Doktorant zastrzega, że wzór został wyznaczony z założeniem podziału obrazu na 256 bloków. Czy testowano jak liczba rozważonych bloków obrazu oraz rozdzielczość obrazu wpływają na proponowaną postać wzoru?
- H. W odniesieniu do wszystkich miar jakości druku 3D opisanych w rozprawie, Doktorant zmagął się z problemem uniezależniania miary jakości druku 3D od jego koloru. Pomimo kilku ciekawych propozycji przedstawionych w rozprawie, problem ten nie został w pełni

rozwiązany. Czy Doktorant rozważał zastosowanie miar wykorzystywanych przy nakładaniu/wyrównywaniu obrazów (ang. *image registration*), takich jak np. informacja wzajemna (ang. *mutual information*) i jej odmiany? W procesie nakładania obrazów medycznych pozwalają one na pomiar wyrównania względem siebie obrazów o różnych modalnościach (np. TK oraz MRI). Jak Doktorant ocenia możliwość zastosowania ww. metryk do oceny jakości wydruku 3D, w szczególności ich przydatność w uniezależnieniu oceny od koloru wydruku oraz nierównomiernego oświetlenia?

6. Podsumowanie

Pomimo uwag krytycznych uważam, że **rozprawa doktorska Pana mgra inż. Jarosława Fastowicza stanowi ciekawy i oryginalny wkład** w rozwój metod automatycznej i bezwzorcowej oceny jakości druku 3D z wykorzystaniem informacji wizyjnej. Zaproponowany w rozprawie zestaw miar jakości dedykowanych ocenie jakości druku 3D stanowi **oryginalne rozwiązanie zdefiniowanego w rozprawie problemu naukowego**. Wyniki eksperymentów przeprowadzonych przez Doktoranta są obiecujące i wskazują na potencjalną skuteczność opracowanych rozwiązań, przy uwzględnieniu pewnych uproszczeń, dot. chociażby warunków oświetlenia i kształtu powierzchni.

W celu rozwiązania problemu będącego przedmiotem rozprawy, jej Autor zastosował właściwe metody badawcze oraz wykazał umiejętność prawidłowego planowania i realizacji badań, analizy uzyskanych wyników eksperymentalnych, oraz formułowania wniosków. Zakres tematyczny rozprawy pozwala zakwalifikować ją do **dyscypliny automatyka i robotyka**.

W dorobku publikacyjnym mgra inż. Jarosława Fastowicza znajduje się 20 współautorskich prac zaindeksowanych w bazie Scopus, w tym 7 referatów konferencyjnych, nieuwzględnionych w zbiorze publikacji stanowiących rozprawę doktorską. Indeks Hirscha Doktoranta (bez autocytowań) wynosi 7, a Jego prace były łącznie cytowane ponad 170 razy. Wynik ten uważam za bardzo dobry.

W związku z powyższym oceniam, że **rozprawa doktorska mgra inż. Jarosława Fastowicza spełnia wymagania** określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 2017 r., poz. 1789). **Wnoszę zatem o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.**

A. Falejowski