

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Badanie jakości produktów poligraficznych
przy użyciu kamer hiperspektralnych
ze szczególnym uwzględnieniem barwy**

Mgr Paweł Dziki

Promotor

Prof. dr hab. Michał Daszykowski

Opiekun

Mgr Katarzyna Rybicka

Instytut Chemii

Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych

Uniwersytet Śląski w Katowicach

2025

Spis treści

1. Streszczenie pracy doktorskiej w języku polskim i angielskim	4
2. Wykaz ważniejszych oznaczeń, skrótów, akronimów i pojęć.....	7
3. Cele wdrożeniowe i cele naukowe doktoratu	10
3.1 Cele wdrożeniowe.....	10
3.2 Cele naukowe	11
4. Hipotezy badawcze zweryfikowane w doktoracie.....	12
5. Wstęp teoretyczny.....	13
5.1 Barwa	13
5.2 Kolor jako wyznacznik składu chemicznego substancji.....	13
5.3 Barwa jako istotny wskaźnik jakości i wartości	14
5.4 Zastosowanie koloru w funkcji indykatora stanu zdrowia.....	15
5.5 Metody wykrywania fałszerstw z wykorzystaniem kolorów	16
6. Miary podobieństwa	18
6.1 Ocena podobieństwa względem rozkładu punktów	20
6.2 Reguły logiczne twarde.....	21
6.3 Reguły logiczne miękkie.....	22
7. Część teoretyczna	24
7.1 Kolor jako skuteczny nośnik informacji	24
7.2 Od widm spektralnych do skali $L^*a^*b^*$	25
7.3 Zagadnienie barwy jako indykatora jakości w druku offsetowym	31
7.4 Analiza głównych składowych – PCA.....	36
7.5 SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy).....	38
7.6 Obrazowanie hiperspektralne.....	41
7.7 Sygnał instrumentalny.....	46
7.8 Systemy ekspertowe.....	47
8. Postrzeganie barwy jako szczególny rodzaj akwizycji i analizy obrazu	49
8.1 Kolory niewidmowe.....	52
8.2 Czy ocena instrumentalna barwy druku zastąpi wizualną?.....	53
9. Charakterystyka wybranych urządzeń do pomiarów spektralnych	55
9.1 Spektrofotometry poligraficzne do oceny barwy	55
10. Produkcja poligraficzna na przykładzie druku offsetowego, wstęgowego.....	59
10.1 Druk.....	62

10.2 Proces regulacji, kontroli i zarządzania barwą.....	65
11. Kontrola jakości w kontekście produkcji poligraficznej	69
11.1 Podejście procesowe	69
11.2 Zautomatyzowany monitoring i systemy wspierające decyzje	70
11.3 Bezpośrednia kontrola jakości półproduktów i produktów gotowych.....	72
11.4 Reprezentatywne miejsca grafiki	73
12. Eksperymenty i wyniki badań.....	74
12.1 Sprawdzenie dokładności i powtarzalności urządzenia Exact firmy X-Rite	74
12.2 Analiza widm próbek CMYK dla wzoru koloru.....	75
12.3 Korelacja wyników kamery Specim i spektrofotometru Exact.....	80
12.4 Charakterystyka zmienności druku offsetowego, wstęgowego	82
12.5 Efektywność przetwarzania obrazów hiperspektralnych	83
12.6 Nowe sposoby wizualizacji zmienności procesu druku.....	91
12.7 Badanie stabilności pomiarów kamerą typu FX10 firmy Specim	97
12.8 Wizualna kontrola procesu druku na podstawie wybranych pól kontrolnych	98
12.9 Systemy eksperckie SIMCA w kontroli druku wielobarwnego.....	100
13. Wdrożenie – stanowisko do kontroli jakości.....	108
13.1 Akwizycja obrazów hiperspektralnych	112
13.2 Program do analizy danych hiperspektralnych TESH	116
14. Wnioski.....	122
15. Plany badawcze.....	123
16. Podziękowania	124
17. Źródła finansowania	125
Bibliografia	126
Curriculum Vitae	134

1. Streszczenie pracy doktorskiej w języku polskim i angielskim

Streszczenie pracy doktorskiej w języku polskim

Dysertacja jest propozycją nowego rozwiązania w zakresie kontroli jakości produktów poligraficznych. Techniki obrazowania hiperspektralnego wsparte podejściem chemometrycznym, bez wątpienia pozwolą zapewnić rozwój metody nieinwazyjnej kontroli jakości powierzchni, opartej na wieloaspektowej analizie widm spektralnych. Obrazowanie hiperspektralne pozwala na rejestrowanie widm w zakresach UV-VIS-NIR w zależności od zastosowanych sensorów; w badaniach prowadzonych w ramach doktoratu skupiono się na zakresie VIS, niemniej potencjał zakresów UV i NIR również pozostaje interesujący dla wybranych materiałów badawczych. Próbkę badawczą pobierane z szeroko rozumianego spektrum produktów poligraficznych to ogromna różnorodność podłoży drukarskich, rodzajów farb graficznych, wykończeń i uszlachetnień, dlatego ze względu na wdrożeniowy i praktyczny charakter doktoratu, do badań wybrano próbki druków wielobarwnych wydrukowanych techniką druku offsetowego. Uniwersalny i nowatorski charakter proponowanego podejścia pozwoli na dostosowanie rozwiązań do innych technik druku, jak również możliwość skalowania na potrzeby innych produktów, niż tylko poligraficznych.

Próbki analizowano w celu porównania obrazu ze wzorcem, ale także w kontekście oceny i kontroli stabilności procesu druku. Dla obu tych aspektów przydatność podejść chemometrycznych, do innowacyjnego monitorowania indykatora jakości jakim jest barwa, została potwierdzona. Bezpośrednia analiza widm spektralnych może stanowić alternatywę do monitorowania jakości, obok znanych i powszechnie stosowanych modeli barwnych. Dodatkowo obrazowanie powierzchni graficznej, a nie tylko zaprojektowanych wcześniej pól testowych, pozwala na wybór reprezentatywnych fragmentów próbki już na podstawie wstępnej analizy zarejestrowanego obrazu.

Prace wdrożeniowe i badawcze realizowane w ramach doktoratu miały charakter komplementarny, a głównym elementem oceny nowej metody kontroli jakości była możliwość realizacji skutecznej analizy w akceptowalnym czasie, przy jednoczesnym zachowaniu dyscypliny kosztowej. Wdrożone w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o. stanowisko do kontroli jakości zostało przygotowane w konfiguracji dopasowanej do specyfiki analizowanych produktów, a wydajność systemu do wymagań skali przemysłowej. Zdefiniowane przeze mnie założenia do prototypu oprogramowania są testowane na realnych próbkach w środowisku przemysłowym firmy i będą nadal

doskonalone i rozwijane. Zaproponowane, innowacyjne podejście ma niewątpliwie szansę zmienić na lepsze skuteczność kontroli jakości w poligrafii.

Summary of PhD thesis

The dissertation proposes a new approach to the quality control of printing products. Hyperspectral imaging techniques supported by a chemometric approach will undoubtedly allow for the development of non-invasive surface quality control methods based on multi-aspect analysis of spectral data. Hyperspectral imaging allows for recording spectra in the UV-VIS-NIR ranges, depending on the sensors used. The research conducted as part of the doctoral thesis focused on the VIS range. However, the potential of the UV and NIR ranges remains interesting for selected research materials. Research samples taken from the broadly understood spectrum of printing products are a vast variety of printing substrates, types of graphic inks, finishes, and refinements; therefore, due to the implementation and practical nature of the doctoral thesis, samples of multi-color prints printed using the offset printing technique were selected for research. The universal and innovative nature of the proposed approach will allow for adapting solutions to other printing techniques and the possibility of scaling for the needs of different products, not only printing.

The samples were analyzed to compare the image with the reference and to assess and control the stability of the printing process. For both of these aspects, the usefulness of chemometric approaches for innovative monitoring of the quality indicator, which is color, was confirmed. Direct analysis of spectral spectra can be an alternative to quality monitoring in addition to known and commonly used color models. Additionally, imaging the graphic surface and not only the previously designed test fields allows for selecting representative fragments of the sample based on the initial analysis of the recorded image. The implementation and research work carried out as part of the doctorate were complementary, and the central element of assessing the new quality control method was the possibility of conducting a practical analysis in an acceptable time while maintaining cost discipline. The quality control station was implemented at Walstead Kraków Sp. z o.o. was prepared in a configuration adapted to the specificity of the analyzed products, and the system's performance to the requirements of an industrial scale. The assumptions for the software prototype I defined are being tested on real samples in the company's industrial environment, and will continue to be improved and developed. The proposed, innovative approach undoubtedly has the potential to change the effectiveness of quality control in printing.

2. Wykaz ważniejszych oznaczeń, skrótów, akronimów i pojęć

Apla – nadruk wykonany jedną farbą składową ze 100 % pokryciem powierzchni

Apertura – oczko pomiarowe spektrofotometru, (ang. aperture)

CIELAB – przestrzeń barw CIE 1976 L*a*b*

CMYK – model czterech kolorów używany w przemyśle poligraficznym, skrót rozwijany jako: cyan – niebiesko-zielony, magenta – purpurowy, yellow – żółty i black – czarny, w literaturze polskojęzycznej opisywany także jako: cyjan, magenta, żółty i czarny

CIE – Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa

CRI – współczynnik odwzorowania barw (ang. Color Rendering Index)

ΔE_{76} – różnica barwy delta E, obliczana jako odległość euklidesowa w przestrzeni barw CIELAB

Density – gęstość optyczna mierzona na polach ze 100 % pokryciem jednej składowej z CMYK, cyan, magenta, yellow lub black

Dot gain – przyrost punktu rastrowego

ECI – European Color Initiative

FOGRA – Fogra Forschungsinstitut für Medientechnologien e. V.

FOV – Pole widzenia obiektywu (ang. Field of View)

GCR – redukcja składowych CMY i zastępowanie ich odpowiednią ilością K (ang. Gray Component Replacement)

HSI – metoda obrazowania hiperspektralnego (ang. hyperspectral imaging)

ICC – International Color Consortium

ISO – International Organization for Standardization

LED – oświetlenie diodowe (ang. Light Emitting Diode)

Lpi – liniatura rastra definiowana ilością linii na cal

MIR – spektroskopia w zakresie średniej podczerwieni (ang. mid-infrared)

NIR – spektroskopia w zakresie bliskiej podczerwieni (ang. near-infrared)

PCA – analiza głównych składowych, ang. Principal Component Analysis

PLS – metoda częściowych najmniejszych kwadratów (ang. partial least-squares)

Rastrowanie – rozbiecie grafiki na punkty o zdefiniowanej liniaturze i/lub wielkości

Raster AM – raster konwencjonalny, (ang. Amplitude Modulation AM)

Raster FM – raster stochastyczny, częstotliwościowy, (ang. Frequency Modulation FM)

RAW – typ pliku zawierający surowe, nieprzetworzone dane obrazu, (ang. raw – surowy), zapisywany z rozszerzeniem w układzie nazwa.raw, format danych wyjściowych kamer hiperspektralnych

ROI – wybrany obszar obrazu (ang. Region of Interest)

Rozpiętość barwna – (ang. gamut), podzbiór modelu barw niezależnych od urządzenia CIELAB możliwy do uzyskania w ramach danej technologii, np. monitor lcd, druk offsetowy CMYK

SIMCA – niezależne modelowanie podobieństwa klas (ang. Soft Independent Modeling of Class Analogies)

TAC – maksymalne nafarbowanie druku (ang. Total Area Coverage)

UV-VIS – spektroskopia w zakresie ultrafioletu oraz światła widzialnego (ang. ultraviolet-visible spectroscopy)

VIS – spektroskopia w zakresie światła widzialnego (ang. visible spectroscopy)

3. Cele wdrożeniowe i cele naukowe doktoratu

3.1 Cele wdrożeniowe

Celem wdrożeniowym doktoratu jest uruchomienie nowoczesnego stanowiska pomiarowego do pomiaru jakości produktów poligraficznych przy pomocy kamery hiperspektralnej, ze szczególnym uwzględnieniem kontroli barwy. Stanowisko pomiarowe wraz z odpowiednio zaprojektowanym systemem eksperckim bazującym na chemometrycznej analizie danych, pozwoli dokonywać kontroli jakości druku wielobarwnego w sposób szybki, tani, kompletny i całościowy, będąc zarazem innowacyjnym uzupełnieniem powszechnie stosowanych metodologii w branży. Realizacja takiej koncepcji daje szansę na stworzenie stanowiska pomiarowego o unikatowych możliwościach pomiarowych nie tylko w skali kraju. Aktualnie, powszechnie stosowane na skalę przemysłową rozwiązania w poligrafii zakładają kontrolę statystyczną i cykliczną druku w zakresie analizy barwy. Pomiar odbywa się na odpowiednio przygotowanych polach testowych umieszczonych w obszarze zadruku. Zatem kolor uzyskany na okładce czy stronach katalogu badany jest niejako w sposób pośredni. Mierząc wybrane pola pomiarowe znajdujące się w bliskim sąsiedztwie właściwej treści produktu poligraficznego (np. katalogu, bądź czasopisma) przyjmujemy, zwykle słusznie, że całość obrazu została wydrukowana prawidłowo i zgodnie z oczekiwaniami, oraz w zgodzie z właściwą normą ISO opisującą proces kontroli druku; (ang. Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints), dla druku offsetowego jest to norma ISO 12647 [1]. Dodatkowo, użycie kamery hiperspektralnej daje nieosiągalną wcześniej możliwość weryfikacji stopnia homogeniczności badanej powierzchni zadruku, jak również ocenę w szerszym, niż tylko zdefiniowanym w normie ISO zakresie widma, a także z większą rozdzielczością spektralną [2].

3.2 Cele naukowe

Cele naukowe prowadzonych badań nie ograniczają się do potwierdzenia, że kamera hiperspektralna może uzupełnić, a nawet zastąpić powszechnie używane w branży poligraficznej spektrofotometri. Równie istotne jest:

- 1) Wypracowanie nowej metodyki analizy i klasyfikacji zmierzonych próbek drukowanych, na podstawie danych uzyskanych przy użyciu kamery hiperspektralnej.
- 2) Sprawdzenie możliwości analizy pomiaru obrazu właściwego (będącego treścią produktu) pod względem jakości wydruku, a nie wyłącznie kontrolnych pól testowych, i porównanie go z wzorcem.
- 3) Potwierdzenie, że wyniki pomiaru kamerą hiperspektralną są powtarzalnym i wiarygodnym wskaźnikiem jakości.
- 4) Zaprojektowanie i potwierdzenie skuteczności zautomatyzowanej metody próbkowania dla wybranych fragmentów powierzchni i fragmentów zakresu spektralnego obrazów hiperspektralnych.

4. Hipotezy badawcze zweryfikowane w doktoracie

Potwierdzenie poprzez odpowiednio zaplanowane badania poniższych hipotez, na podstawie uzyskanych danych eksperymentalnych, było konieczne do realizacji wdrożenia:

- 1) Wyniki uzyskane powszechnie uznanymi w branży poligraficznej urządzeniami do pomiarów punktowych barwy i wyniki pomiarów wykonanych kamerą hiperspektralną korelują ze sobą na tyle, że po prostych przekształceniach matematycznych można je stosować zamiennie dla próbek o homogenicznej powierzchni.

Hipoteza została zweryfikowana poprzez pomiar i porównanie wyników próbek przygotowanych na skalibrowanych wydrukach próbnych (tzw. proofach) zgodnie z metodologią ICC z wybranym profilem ICC.

- 2) Pomiary wykonywane kamerą hiperspektralną są nie tylko bardziej dokładne, ale również pozwalają na bardziej wydajną analizę jakości próbek produktów poligraficznych, niż powszechnie uznane w branży poligraficznej urządzenia do pomiarów punktowych barwy.

Hipoteza została zweryfikowana poprzez przeprowadzenie testów jakościowych i wydajnościowych dla próbek laboratoryjnych jak i produkcyjnych z wybranej produkcji poligraficznej.

- 3) Analiza wyników pomiaru wykonanego kamerą hiperspektralną dla próbki produktu poligraficznego jest możliwa do wykonania w czasie zbliżonym do rzeczywistego.

Hipoteza została zweryfikowana poprzez zaprogramowanie algorytmów analitycznych i dobranie platformy sprzętowej o optymalnej wydajności.

5. Wstęp teoretyczny

5.1 Barwa

W ostatnich latach możliwości techniczne jak i naukowe w zakresie badania barwy są coraz większe. Niemniej pojęcie barwy jest tak powszechne i szerokie, że właściwie wymyka się dość skutecznie próbom syntetycznego ujęcia [3]. Z jednej strony kolory otaczają nas niemal we wszystkich przedmiotach i zjawiskach wokół, z drugiej zaś poziom ich istotności dla nas jest zupełnie różny zależnie od obszaru. Barwa to wrażenie powstające w umyśle obserwatora [4]. Na potrzeby naszych rozważań przyjmijmy, że to wrażenie powstające w umyśle człowieka, ale to przecież też ważna, precyzyjnie kwantyfikowana cecha przedmiotów i zjawisk. By mówić o barwie potrzeba nam obserwowanego obiektu i światła, a także obserwatora, który tę barwę potrafi zobaczyć i opisać. Chociaż ocenę wizualną barwy w różnych dziedzinach potrafimy ująć w ramy zasad i norm, to zawsze pozostanie ona w pewnym stopniu subiektywna. Światło niezbędne do tego, aby barwę zobaczyć, to zaledwie niewielki wycinek z całego zakresu fal elektromagnetycznych. Tu przechodzimy do obiektywnych i powtarzalnych metod definiowania barwy. Barwę możemy definiować za pomocą widma z zakresu światła widzialnego. Obecnie stosowane, matematyczne modele barwy powstały w oparciu o charakterystykę spektralną i ciągle ewoluują.

5.2 Kolor jako wyznacznik składu chemicznego substancji

Kolor jako cecha przedmiotów i zjawisk pojawia się od tak dawna, że trudno określić genezę, niemniej niewątpliwie warte odnotowania są pierwsze realizacje fotografii barwnej. Eksperymenty Edmonda Becquerela, czy pierwsze pokazy Jamesa Clerka Maxwella były dalekie od doskonałości dzisiejszej fotografii, niemniej stały się ważnym fundamentem do dalszych badań [5,6].

Chromatografia (gr. *Chrōma* – barwa, *gráphō* – piszę) jako technika analityczna w pierwszych udanych eksperymentach pozwoliła rozdzielać barwniki związków chemicznych. Michaił Cwiet, od 1908 r. wykładowca Politechniki Warszawskiej, w pierwszych latach XX w. rozpoznał i prawidłowo zinterpretował proces rozdziału oraz opracował chromatografię kolumnową. Jest także autorem nazwy chromatografia.

Początki kolorymetrii to analiza chemiczna substancji na podstawie oceny barwy roztworu w zależności od jego stężenia. Na podstawie absorpcji fal elektromagnetycznych określonej długości z zakresu widzialnego można wyznaczyć

zależność pomiędzy stężeniem substancji a kolorem. Skuteczność tej techniki analitycznej zależy między innymi od przyjętego sposobu oceny koloru. W przypadku porównywania próbki metodą serii wzorców, czyli z zestawem wzorców w probówkach zawierających roztwory w znanych, oznaczonych już wcześniej stężeniach, nie bez znaczenia jest konkretna barwa charakterystyczna dla postrzegania danej substancji. Jak wiemy wrażliwość wzroku ludzkiego, a co za tym idzie dokładność oceny wizualnej, jest różna w zależności od ocenianego obszaru barwnego [7]. Ta zależność jest też istotna w przypadku oceny instrumentalnej wykonywanej dla wybranych długości fali elektromagnetycznej. Zgodnie z prawem Lamberta-Beera możemy potwierdzić liniową zależność pomiędzy absorbancją roztworu i stężeniem oznaczanej substancji, a także możliwość scharakteryzowania substancji ilością absorbowanego światła dla danej długości fali. Światło widzialne, będące zaledwie niewielkim wycinkiem fal elektromagnetycznych, określane również jako światło białe, zawiera wszystkie barwy widzialne. Analizując cechy substancji absorbującej określony kolor, czyli fragment widma, obserwujemy w rzeczywistości kolory charakterystyczne dla tych długości fali, które nie są pochłaniane [8].

5.3 Barwa jako istotny wskaźnik jakości i wartości

Dość łatwo przyjąć, że kolor jest elementem wartości produktu, jeśli do jego wytworzenia zużyto określoną ilość rozmaitych substancji. Różnego rodzaju farby, barwniki i pigmenty mają określony skład, cechy fizyko-chemiczne, w tym kolor oraz wartość rozumianą jako cena rynkowa. Warto pamiętać, że wśród produktów i usług barwa to także ważny element projektowania wartości rynkowej w kontekście marketingowym i estetycznym. Motoryzacja to przykład branży w której jedne kolory są uważane za bardziej modne, a także bardziej prestiżowe od innych. Kolor w sposób istotny podnosi wartość produktu o kwotę niewspółmierną do realnego kosztu innej farby [9]. Wybór koloru nadwozia samochodu ma też znaczenie, gdy znajdzie konieczność odtworzenia powłoki na jednym z elementów w wyniku awarii czy kolizji. Właściwy dobór koloru wymaga również określonych narzędzi i kompetencji.

Niemal każdego dnia oceniamy wzrokiem jakość produktów spożywczych, robiąc to często bezrefleksyjnie, na bazie powszechnej wiedzy i doświadczenia. Bardziej czerwonego pomidora jesteśmy gotowi ocenić jako lepszy, smaczniejszy, a nawet zdrowszy produkt [10,11]. Wiedzą też o tym producenci i sprzedawcy nie tylko pomidorów, ale także wielu innych produktów spożywczych, których jakość, świeżość

i wartość oceniamy patrząc na kolor. Obserwując lub mierząc kolor, oceniamy jakość oraz stopień wypalenia ziaren kawy, która zależnie od wybranego gatunku i ceny zalicza się niewątpliwie do produktów spożywczych, ale też luksusowych [12]. Tu warto zauważyć, że wśród produktów luksusowych ewentualne straty wynikające z fałszowania towarów mogą być wysokie, dlatego też możliwości dokładnej kontroli są bardziej poszukiwane. Nowoczesne systemy pakowania produktów spożywczych pozwalają na dodatkową kontrolę z wykorzystaniem zmiany koloru elementów opakowania w korelacji z określonymi cechami produktu, jako wskaźnika jego jakości [13]. Konkretny indykator, którym opakowanie jest nasączone lub został naniesiony w postaci specjalnego nadruku, zmienia kolor na przykład pod wpływem zmiany pH, utleniania lub temperatury. Dość powszechne jest aktualnie dobieranie oświetlenia eksponowanych produktów w taki sposób, by podkreślić ich zalety [14,15]. Aspekt jakości i powtarzalności kolorów jest mocno akcentowany w branży tekstylnej. Różnorodność produktów odzieżowych, ale także tych będących elementami wystroju wnętrz sprawia, że podejścia do jakości, powtarzalności i trwałości kolorów są różne. Dość wspomnieć o produktach barwionych w masie i alternatywnym podejściu w postaci nadruków cyfrowych na elementach odzieży. W każdym przypadku oczekiwana jest określona jakość, a także narzędzia, by w razie potrzeby odtworzyć kolejną partię produktu o tych samych cechach i w sposób obiektywny to wykazać [16,17]. Szczególnie wymagającym zadaniem jest projektowanie koloru tkanin wytwarzanych z różnego rodzaju przędzy w postaci rozmaitych kolorowych splotów. Aby uniknąć długiego i kosztownego gromadzenia próbek wzorcowych wykorzystuje się dopasowane symulacje komputerowe. Zasady mieszania kolorów w produkcji tkanin w sposób istotny różnią się od tych dotyczących druku, malarstwa czy grafiki na ekranie monitora, niemniej można tu dostrzec też pewne podobieństwa. Tak jak w druku wykonanym punktami rastra; z bliska lub w powiększeniu widzimy wymieszane kolorowe plamki, podobnie tkanina wykonana z kilku rodzajów przędzy o różnych kolorach, przy określonych splotach z pewnej odległości daje wrażenie jednej barwy [18].

5.4 Zastosowanie koloru w funkcji indykatora stanu zdrowia

Dostrzegalne zmiany koloru skóry, języka lub oczu były i nadal są dość oczywistymi i powszechnie wykorzystywanymi we wstępnej diagnostyce wskaźnikami stanu zdrowia. Żółtłona skóra może oznaczać nadmiar beta-karotenu w diecie, ale w połączeniu z zabarwieniem na żółto twardówki oka i błon śluzowych jest już wskazaniem do dalszej

diagnostyki. Żółtaczka to już oznaka poważnych zaburzeń w organizmie człowieka [19]. Oglądanie gardła to jeden z pierwszych elementów oceny zdrowia pacjenta, który zgłasza się do lekarza z podejrzeniem infekcji, a jego zaczerwienienie i inne typowe cechy jak charakterystyczny nalot, są jednym z istotnych wskaźników diagnostycznych. Nowoczesna, nieinwazyjna diagnostyka stanu zdrowia to przede wszystkim rozwijające się dynamicznie badania obrazowe. Wiele powszechnie znanych badań obrazowych pozwala diagnostom na analizę wyników jedynie w skali szarości, ale człowiek przecież postrzega i analizuje w trójwymiarowej przestrzeni kolorów. Ta wielowymiarowość pozwala na zakodowanie i odebranie znacząco więcej istotnych informacji, niż w jednowymiarowej skali [20]. Jest, jak się wydaje, tylko kwestią czasu, by wielowymiarowa analiza danych spektralnych mogła wspomóc w istotny sposób diagnostykę stanu zdrowia – zarówno wraz z rozwojem istniejących badań obrazowych, jak i jako osobne narzędzie [21].

5.5 Metody wykrywania fałszerstw z wykorzystaniem kolorów

Nadruki i elementy luminescencyjne stanowią jedną z cenionych metod zabezpieczania papierów wartościowych, banknotów i innych ważnych dokumentów przed fałszerstwami [22]. Skala oszustw z wykorzystaniem podrobionych dokumentów, a także ilość sfalszowanych banknotów, mimo ciągłej walki z tymi zjawiskami stanowi nadal istotny problem [23,24]. Metody zabezpieczeń przed fałszerstwami, podobnie jak pomysłowość fałszerzy nieustannie ewoluują. Skuteczność zabezpieczeń budowana jest najczęściej w oparciu o komplementarne zastosowanie wielu metod. Niektóre z zabezpieczeń mogą zostać zweryfikowane organoleptycznie poprzez ocenę wizualną lub dotyk. Inne wymagają użycia podręcznych narzędzi, jak choćby przenośna lampa UV, bądź szkło powiększające. Najbardziej zaawansowane i wyrafinowane rozwiązania wymagają fachowej wiedzy i odpowiedniej aparatury. W ramach zabezpieczenia jednego banknotu lub dokumentu stosuje się dwie lub więcej technik druku w różnych obszarach. O wielu zabezpieczeniach Narodowy Bank Polski informuje na swojej stronie internetowej, by dać użytkownikom pieniędzy możliwość samodzielnego sprawdzenia ich autentyczności [25]. Dość oczywiste jest stosowanie również takich zabezpieczeń, których specyfika ze względów bezpieczeństwa nie jest podawana do publicznej wiadomości [26].



Rys. 1 Banknot pięćset złotych, podgląd na podstawie danych z kamer hiperspektralnych FX10 i FX17 firmy Specim, Spectral Imaging LTD w trójkanałowej reprezentacji obrazu, a) strona przednia dla długości fali odpowiednio 458 nm, 547 nm i 668 nm, b) strona tylna dla długości fali odpowiednio 458 nm, 547 nm i 668 nm, c) strona przednia dla długości fali odpowiednio 1032 nm, 1116 nm i 1368 nm, d) strona tylna dla długości fali odpowiednio 1032 nm, 1116 nm i 1368 nm.

Używane są mikrodruki wykonane z dużą precyzją i trudne do odtworzenia bez dokładnej znajomości techniki wykonania, druki farbami zmiennymi optycznie, których barwa zmienia się w zależności od kąta obserwacji. Stosowana bywa też farba opalizująca, zmieniająca swą intensywność przy różnych kątach patrzenia. Ciekawym rozwiązaniem są komplementarne względem siebie, elementy graficzne na przedniej stronie i na tylnej stronie banknotu, które dopiero gdy patrzymy na banknot pod światło, łączą się razem w czytelny obraz [25,27].

6. Miary podobieństwa

Miary podobieństwa znajdujące zastosowanie w analizie złożonych i obszernych danych wielowymiarowych, to między innymi stosowana powszechnie w kontekście różnicy barwy, odległość euklidesowa, ale także kilka innych. Miary podobieństwa pozwalają na interpretację na podstawie wyników, jak bardzo analizowane próbki różnią się od siebie. Odległość euklidesowa, jedna z prostszych i popularniejszych miar podobieństwa, pozwala określić odległość punktów w przestrzeni. Obliczana jest jako pierwiastek z sumy kwadratów różnic dla porównywanych składowych. W przestrzeni wielowymiarowej wzór przyjmuje formę:

$$d_{E(a,b)} = \sqrt{(\mathbf{a} - \mathbf{b})^T \cdot \mathbf{I} \cdot (\mathbf{a} - \mathbf{b})} = \sqrt{(\mathbf{a} - \mathbf{b})^T (\mathbf{a} - \mathbf{b})} \quad (1)$$

gdzie $d_{E(a,b)}$ to odległość Euklidesa równa długości odcinka łączącego punkty $\mathbf{a}$ i $\mathbf{b}$ (wyrażone jako wektory kolumnowe o n elementach definiujących współrzędne w n -wymiarowej przestrzeni parametrów), natomiast $\mathbf{I}$ to macierz jednostkowa (macierz wag), tzn. macierz, której diagonalne elementy są równe jeden.

Jeśli poszczególne zmienne mają różne skale, możemy dokonać ich standaryzacji, wprowadzając do powyższego równania na odległość euklidesową odpowiednio skonstruowaną macierz wag, $\mathbf{W}$, której diagonalne elementy będą równe odwrotności kwadratowi wagi dla każdej z n zmiennych, czyli w tym wypadku kwadratowi odchylenia standardowego (wariancja):

$$\mathbf{W} = \text{diag} \left(\frac{1}{\sigma_1^2}, \frac{1}{\sigma_2^2}, \frac{1}{\sigma_3^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_n^2} \right) \quad (2)$$

Wówczas, wzór na ważoną odległość euklidesową, $d_{E(a,b)^*}$, przyjmie następującą postać:

$$d_{E(a,b)^*} = \sqrt{(\mathbf{a} - \mathbf{b})^T \cdot \mathbf{W} \cdot (\mathbf{a} - \mathbf{b})} \quad (3)$$

Bardziej złożonym rozwinięciem idei miary odległości jest odległość Mahalanobisa. Ta miara statystyczna została opracowana w 1936 r. przez Prasante Chandre Mahalanobisa [28]. Odległość Mahalanobisa różni się od odległości Euklidesa tym, że jednocześnie uwzględnia skalę każdej zmiennej, ich wariancję i kowariancję.

Odległość euklidesowa zakłada, że wszystkie zmienne są niezależne, tzn. są wzajemnie ortogonalne, a także mają jednakową skalę (zob. równanie 1 – macierz wag w tym przypadku ma na diagonalu wartości równe jeden, co oznacza w praktyce, że obliczając odległość euklidesową każda zmienna ma tą samą wagę). Takie założenie jest słuszne tylko w przestrzeniach określonych przez parametry o tej samej skali i braku korelacji pomiędzy nimi. Z kolei ważona odległość euklidesowa pozwala porównywać podobieństwo obiektów w przestrzeniach zmiennych o różnej skali. Natomiast odległość Mahalanobisa jest odpowiednią miarą podobieństwa w analizie wielowymiarowej, gdy parametry danych mają nie tylko różne skale, ale również są wzajemnie skorelowane. Stosuje się ją często w analizie skupień, w pewnym ograniczonym zakresie do wykrywania wartości odległych i budowy relatywnie prostych reguł logicznych. Odległość Mahalanobisa obliczona pomiędzy dwoma próbkami a i b , $d_{M(a,b)}$, które opisują co najmniej dwie wartości parametrów jest wyrażona następująco:

$$d_{M(a,b)} = \sqrt{(a - b)^T \cdot \Sigma^{-1} \cdot (a - b)} \quad (4)$$

gdzie Σ jest macierzą wariancji-kowariancji (macierz wag) wyznaczoną dla zbioru wszystkich rozważanych próbek.

Inną ważną miarą pozwalającą na ocenę podobieństwa próbek jest współczynnik korelacji, będący miarą liniowej zależności między dwiema zmiennymi. Wartości współczynnika korelacji przyjmują wartości od -1 do +1. Interpretacja wyników opiera się na założeniach, że: 0 oznacza brak zależności (ortogonalność zmiennych), +1 to idealna, dodatnia, liniowa korelacja, gdzie jedna zmienna przyjmuje coraz większe wartości wraz ze wzrostem wartości drugiej zmiennej, a -1 oznacza idealnie liniową, ujemną korelację, gdzie jedna zmienna zmniejsza swoje wartości liniowo wraz ze zwiększaniem wartości drugiej zmiennej. Wartości w przedziale od 0 do +1 wskazują odpowiednio: słabą dodatnią zależność liniową w zakresie 0-0,3, umiarkowaną dodatnią zależność liniową w zakresie 0,3-0,7 oraz silną dodatnią zależność liniową w zakresie 0,7-1,0. W sposób analogiczny można opisać siłę liniowej korelacji dla wyników przyjmujących wartości od -1 do 0. Współczynnik korelacji opiera się na założeniu, że zależność pomiędzy zmiennymi jest liniowa.

W odróżnieniu od odległości euklidesowej, która mierzy różnice pomiędzy wartościami parametrów, współczynnik korelacji skupia się na liczbowej ocenie profili określonych

przez poszczególne wartości zmiennych, a nie na ich różnicach. Możemy zatem powiedzieć, że współczynnik korelacji jest właściwym wyborem jeśli badamy zagadnienia jakościowe, a nie ilościowe. W takiej sytuacji cel, to wyłącznie potwierdzenie barwy, którą opisuje określone widmo Vis, a nie zmierzenie różnic w jej intensywności. Współczynnik korelacji dwóch parametrów x i y wyznaczamy w oparciu o poniższe równanie:

$$r_{(x,y)} = \frac{\mathbf{x}_c^T \cdot \mathbf{y}_c}{\sqrt{\mathbf{x}_c^T \cdot \mathbf{x}_c} \cdot \sqrt{\mathbf{y}_c^T \cdot \mathbf{y}_c}} \quad (5)$$

gdzie

$\mathbf{x}_c$ i $\mathbf{y}_c$ to centrowane wartością średnią zmiennej.

6.1 Ocena podobieństwa względem rozkładu punktów

W niektórych przypadkach może istnieć konieczność oceny podobieństwa danej próbki w stosunku do grupy próbek, które mogą być opisane przez jeden lub więcej parametrów. Wówczas, naturalną miarą podobieństwa staje się odległość próbki od środka rozważanej grupy punktów. Jeżeli pomiary opisują rozkład normalny, to zależnie od liczby parametrów możemy zastosować jedno lub wielowymiarowy rozkład normalny. W pierwszym przypadku, funkcję gęstości prawdopodobieństwa określa następujące równanie:

$$f_{\mu,\sigma}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right) \quad (6)$$

gdzie

μ i σ to odpowiednio wartość średnia i odchylenie standardowe zmiennej x .

Dowolna próbka jest tym bardziej podobna do innych z rozważanej grupy próbek, im bliżej znajduje się od środka ich rozkładu, o czym stanowi odległość euklidesowa obliczona pomiędzy wartością x , a wartością średnią μ . Przyjmując założenie rozkładu normalnego próbek, możemy również ustalić przedział ufności wokół wartości średniej, który wskazuje teoretycznie maksymalne zakresy (wartości graniczne) spełniające

warunek przyjętego prawdopodobieństwa występowania wyników na przyjętym poziomie istotności α . Ponadto, możemy również określić prawdopodobieństwo wystąpienia wyniku dla konkretnej wartości x .

W przypadku większej liczby parametrów, konieczne jest skorzystanie z ogólniejszej postaci funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Ujmuje ona nie tylko wielowymiarowy charakter rozkładu próbek, ale również skalę poszczególnych zmiennych oraz ich potencjalne zależności. W tym przypadku odległość próbki od środka rozkładu danych jest różna i zależy także od jej położenia względem osi układu współrzędnych. Położenie określa kwadrat odległości Mahalanobisa. Dla wielowymiarowego rozkładu normalnego, funkcja gęstości prawdopodobieństwa przyjmuje następującą postać:

$$f_{\mu, \Sigma}(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mu)^T \Sigma^{-1} (\mathbf{x} - \mu)\right) \quad (7)$$

gdzie

$\mathbf{x}$ to dane pomiarowe, Σ jest macierzą wariancji-kowariancji, a μ to wektor określający wartości średnie każdego z parametrów.

Obszar, w którym znajdują się wyniki eksperymentalne z zakładanym prawdopodobieństwem ich występowania, w przypadku dwuwymiarowym definiuje elipsa o konturze odległym od środka danych spełniającym następujący warunek:

$$P\{(\mathbf{x} - \mu)^T \Sigma^{-1} (\mathbf{x} - \mu) \leq \chi_{2,\alpha}^2\} = 1 - \alpha \quad (8)$$

gdzie

$\chi_{2,\alpha}^2$ to wartość krytyczna rozkładu chi-kwadrat o dwóch stopniach swobody, oraz ustalonym z góry poziomie istotności α .

6.2 Reguły logiczne twarde

Twarde reguły logiczne pozwalają na definiowanie zasad precyzyjnego wnioskowania. Ich celem jest jednoznaczna klasyfikacja próbek na podstawie wartości parametrów, które opisują te próbki [29]. Zbudowana reguła w oparciu o jedną lub kilka reguł logicznych w każdym przypadku jednoznacznie rozstrzyga zagadnienie przynależności

próbki do danej grupy. Należy pamiętać, że tak zdefiniowana funkcja celu definiuje zakres stosowania tego typu reguł logicznych, który uwzględnia sytuacje podejmowania decyzji wyłącznie w oparciu o jednoznacznie określony zbiór grup próbek. A zatem, reguły logiczne mają szansę działać poprawnie tylko w obrębie puli grup, tj. znanych źródeł zmienności, użytych do konstrukcji reguł, a w efekcie skonstruowanego modelu decyzyjnego.

Twarde reguły logiczne powstają, ucząc tzw. modele dyskryminacyjne na odpowiednio dobranych, tzn. reprezentatywnych zbiorach próbek należących do rozważanych grup i charakteryzujących oczekiwane źródła zmienności. Istnieje wiele modeli dyskryminacyjnych. Wśród nich, te najbardziej popularne to liniowa analiza dyskryminacyjna (ang. linear discriminant analysis, LDA) [30], dyskryminacyjny wariant metody częściowych najmniejszych kwadratów (ang. partial least-squares – discriminant analysis, PLS-DA) [30,31], oraz drzewa klasyfikacji i regresji (ang. classification and regression trees, CART) [32].

Brak możliwości stopniowania wyniku i dwuwartościowość rozumiana jako wybór pomiędzy zdaniem prawdziwym lub fałszywym wydaje się dość atrakcyjna i ma sporo zalet. Odpowiedzią na wyzwania i potrzeby środowisk inżynierskich oraz przemysłowych są odmiany logik wielowartościowych, jak np. logika rozmyta (ang. fuzzy logic), której podstawowym przykładem i jednocześnie wstępem do reguł miękkich są co najmniej trzy możliwe odpowiedzi na zadane pytanie [33].

6.3 Reguły logiczne miękkie

Tak zwane miękkie reguły logiczne pozwalają efektywnie definiować obszary niepewności w grupach danych z uwzględnieniem obszarów niepewności. System wnioskowania zbudowany w oparciu o reguły logiczne miękkie uwzględnia trzy możliwe scenariusze odpowiedzi. I tak, testowana próbka może należeć do danej grupy, nie należeć do rozpatrywanej grupy lub z perspektywy wszystkich reguł logicznych ostatecznie pozostać nieznana.

Wielowymiarowy rozkład normalny (ang. multivariate normal distribution) stanowi uogólnienie rozkładu normalnego opisującego jedną zmienną do kilku zmiennych. Jest on często używany jako najprostszy model decyzyjny w przypadku dla danych wielowymiarowych [34]. Podjęcie decyzji o przynależności próbki do danej grupy sprowadza się do sprawdzenia czy po dokonaniu jej projekcji do przestrzeni grupy próbek, znajduje się w obrębie ich rozkładu. Zakładając wielowymiarowy rozkład

normalny, korzystając z tablic statystycznych można ustalić graniczne prawdopodobieństwo przynależności próbki do danej grupy, a także ustalić odległość (podobieństwo) rozważanych grup próbek. Prawdopodobieństwo P określające możliwość występowania określonych wyników zależy wprost od odległości od środka rozkładu i maleje wraz z kwadratem odległości Mahalanobisa.

7. Część teoretyczna

7.1 Kolor jako skuteczny nośnik informacji

Obok pełnienia funkcji typowo estetycznych kolor bywa także pomocniczym lub nawet głównym nośnikiem informacji. Tak jest w pewnym stopniu w przypadku materiałów drukowanych, jak plakaty, katalogi czy czasopisma, ale także jeśli chodzi o wszelkie odmiany wizualizacji w środowiskach miejskich bądź przemysłowych. Tablice informacyjne, drogi ewakuacyjne, pasy malowane na ulicach czy ścieżkach rowerowych spełniają swoje funkcje dzięki jasno skwantyfikowanym cechom, jak rozmiar, kształt i kolor.

Nie trzeba też nikogo przekonywać, że sygnalizacja świetlna, ale też szereg innych metod wizualizacji w ruchu drogowym, kolejowym, lotniczym i morskim pełni nie tylko funkcje informacyjne ale również, a może przede wszystkim zapewnia bezpieczeństwo i efektywność działania. Oddzielnego komentarza wymagają kolory fluorescencyjne oraz fosforescencyjne stosowane wszędzie tam gdzie widoczność i czytelność komunikatu ma szczególnie duże znaczenie. Fluorescencja, czyli emisja promieniowania podczas i krótko po naświetlaniu próbki, zanika bardzo szybko – są to wartości czasu liczone w nanosekundach ewentualnie w milisekundach. Rodzaj emisji promieniowania określany jako fosforescencja, w wyniku kumulowania energii utrzymuje się znacznie dłużej – nawet do kilku godzin [35]. Elementy grafiki na znakach drogowych, ale także znaki poziome malowane na powierzchni jezdni (fluorescencja), czy oznaczenia dróg ewakuacyjnych w budynkach przemysłowych i innych (fosforescencja) to typowe przykłady praktycznego wykorzystania tych zjawisk. Mechanizm powstawania wyjątkowo intensywnych kolorów fluorescencyjnych zachodzi na poziomie molekularnym. Zaabsorbowana energia w postaci na przykład światła ultrafioletowego jest oddawana jako ciepło, może też jednak zostać wyemitowana w postaci emisji światła, czyli wycinka określonego widma fali elektromagnetycznej z zakresu widzialnego. Energia emisji jest niższa od energii w postaci zaabsorbowanej wcześniej dawki UV, dlatego emitowane fale mają większą długość, charakterystyczną dla fragmentu widma o niższej energii. Zgodnie z wzorem Plancka na energię fotonu, zależność długości fali i energii przedstawia się następująco:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (9)$$

gdzie

E – energia fotonu

h – stała Plancka

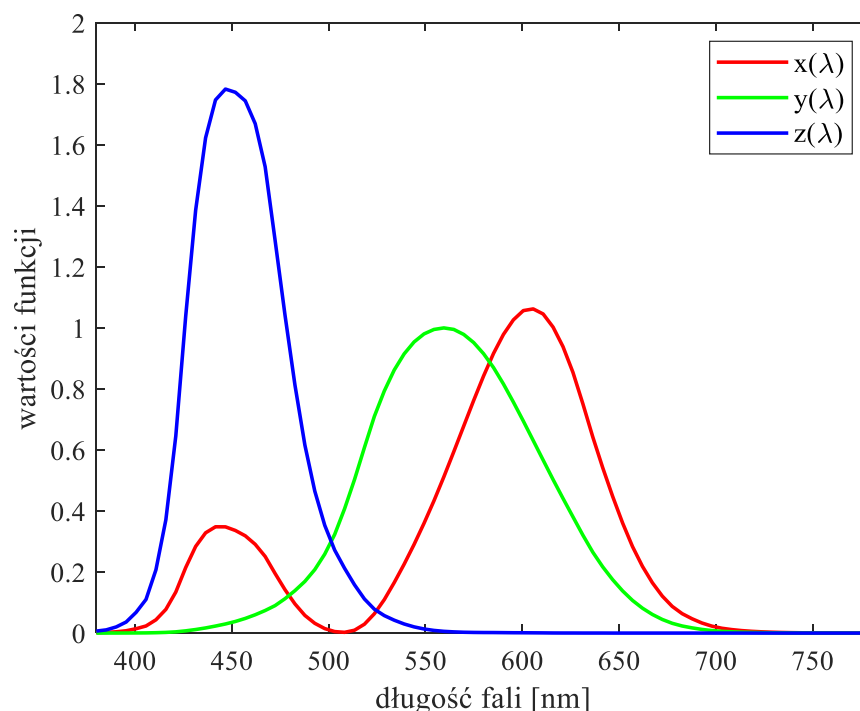
c – prędkość światła w próżni

λ – długość fali

To w praktyce oznacza, że zakres widma podczerwieni emituje niższą energię od zakresu widma ultrafioletu, analogicznie można scharakteryzować ilości energii dla określonych długości fali w poszczególnych fragmentach widma fal elektromagnetycznych z zakresu widzialnego.

7.2 Od widm spektralnych do skali $L^*a^*b^*$

W 1931 r. Międzynarodowa Komisja do spraw Oświetlenia (CIE, franc. Commission Internationale de l'éclairage) opracowała system, który pozwolił scharakteryzować precyzyjnie bodźce kolorystyczne wywołujące w zamyśle określone wrażenia barwne. Opracowany model zakłada, że wszystkie widzialne kolory można dopasować za pomocą addytywnej mieszaniny zaledwie trzech barw podstawowych. Proporcje barw podstawowych niezbędnych do uzyskania danej barwy są określane jako wartości trójkromatyczne. Eksperymenty prowadzone przez Wrighta i Guilda pozwoliły stworzyć matematyczny fundament (CIE XYZ 1931) kolejnych, niezależnych od urządzenia, modeli kolorów LAB 1948; $L^*a^*b^*$ 1976 i in. W doświadczeniu Wrighta i Guilda grupa obserwatorów o widzeniu normalnym, którzy prawidłowo rozróżniali barwy, miała za zadanie przy ograniczonym, wąskim polu widzenia (2°) porównywać w danym momencie dwie barwy. Odpowiedzi uczestników, po opracowaniu statystycznym, pozwoliły zaproponować model tak zwanego obserwatora standardowego. Tak właśnie powstał pierwszy model niezależny od urządzeń, to jest taki, który definiuje wszystkie barwy widoczne dla człowieka, a poprzez przekształcenia matematyczne tworzą kolejne modele.



Rys. 2 Trzy bazowe funkcje kolorymetryczne wedle CIE 1931 – składowe czerwona, niebieska i zielona.

Światło widzialne to stosunkowo wąski obszar promieniowania elektromagnetycznego. Zakres długości fal, na które wrażliwy jest ludzki wzrok często podawany jest w przybliżeniu, na przykład zakres 360-780 nm, co ma swoje uzasadnienie wynikające chociażby z różnic indywidualnych pośród obserwatorów normalnych [36]. Norma ISO definiująca pomiary widm i obliczenia kolorymetryczne dla obrazów graficznych zaleca pomiar danych spektralnych w zakresie 380-780 nm, niemniej dopuszcza także pomiar w zakresie 400-700 nm [37]. Analogiczne rekomendacje znajdują się w publikacji Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej (CIE), uzupełnione o zalecenie, by dla danych, które mogą obejmować wzbudzenie widzialnej fluorescencji ultrafioletem, korzystać z zakresu 300-780 nm [37,38]. Warto pamiętać, że CIE dość często posługuje się w swoich publikacjach określeniem „zalecenia”, ale de facto są to zalecenia powszechnie traktowane jako obowiązujące standardy. Chociaż fale elektromagnetyczne oddziałują z różnymi powierzchniami materiałów fizycznych w często złożony i skomplikowany sposób, na potrzeby oceny barwy wydruku przyjmujemy nieco uproszczone modele fizykochemiczne. Fale z zakresu promieniowania widzialnego (VIS) mogą zostać odbite, pochłonięte lub ulec częściowej transmisji przez mierzoną

powierzchnię. Część promieniowania, która przeniknęła przez próbkę, na przykład wydruk na cienkim papierze, może odbić się od podłoża na którym umieszczono próbkę, a następnie po odbiciu ponownie przeniknąć przez próbkę wracając do detektora i wpłynąć na wynik pomiaru.

Model CIELAB to trójwymiarowa przestrzeń, którą opisują leżące na jednej płaszczyźnie osie a^* i b^* oraz prostopadła do nich oś jasności – L^* . Tak rozumiane trzy liczby, L^* , a^* i b^* pozwalają zdefiniować numerycznie dowolny kolor widziany przez człowieka w przestrzeni niezależnej od urządzenia. Aby wyliczyć wartości L^* , a^* i b^* na podstawie wyników pomiaru spektralnego, dokonujemy nieliniowej transformacji wartości X , Y i Z do przestrzeni CIELAB w następujący sposób:

$$L^* = 116 \cdot \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] - 16 \quad (10)$$

$$a^* = 500 \cdot \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad (11)$$

$$b^* = 200 \cdot \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \quad (12)$$

gdzie

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{jeżeli} \quad \frac{X}{X_n} > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \quad (13)$$

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right) \cdot \left(\frac{X}{X_n}\right) + \frac{4}{29} \quad \text{jeżeli} \quad \frac{X}{X_n} \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \quad (14)$$

i

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{jeżeli} \quad \frac{Y}{Y_n} > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \quad (15)$$

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right) \cdot \left(\frac{Y}{Y_n}\right) + \frac{4}{29} \quad \text{jeżeli} \quad \frac{Y}{Y_n} \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \quad (16)$$

i

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{jeżeli} \quad \frac{Z}{Z_n} > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \quad (17)$$

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right) \cdot \left(\frac{Z}{Z_n}\right) + \frac{4}{29} \quad \text{jeżeli} \quad \frac{Z}{Z_n} \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \quad (18)$$

gdzie L^* , a^* oraz b^* to współrzędne CIE 1976 L^* , a^* i b^* , z kolei X , Y i Z to wartości trójbodźcowe (ang. tristimulus values), a X_n , Y_n i Z_n wartości punktu bieli. Znając wagi widmowe $W(\lambda)$ dla oświetlenia D50 i obserwatora 2° na podstawie ISO 13655 i CIE 15:2004 oraz dane dla punktu bieli:

$$X_n = 96,4 \quad (19)$$

$$Y_n = 100 \quad (20)$$

$$Z_n = 82,5 \quad (21)$$

mierząc widma w zakresie VIS co 10 nm, lub dokonując interpolacji, aby uzyskać dane dla takiej rozdzielczości spektralnej możemy wyliczyć wartości L^* , a^* oraz b^* . Odległości euklidesowe w przestrzeni CIELAB pozwalają definiować w przybliżeniu postrzegane różnice barw dla obiektów o tej samej wielkości w otoczeniu neutralnym barwowo w oświetleniu zbliżonym do światła dziennego. Różnica barwy ΔE_{76} jest obliczana jako odległość euklidesowa w przestrzeni CIELAB według wzoru:

$$\Delta E_{76} = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad (22)$$

Obliczona wartość różnicy barwy ΔE podlega następującej interpretacji:

$\Delta E < 1$ – obserwator nie dostrzega różnicy

$1 < \Delta E < 2$ – tylko doświadczony obserwator dostrzega różnicę

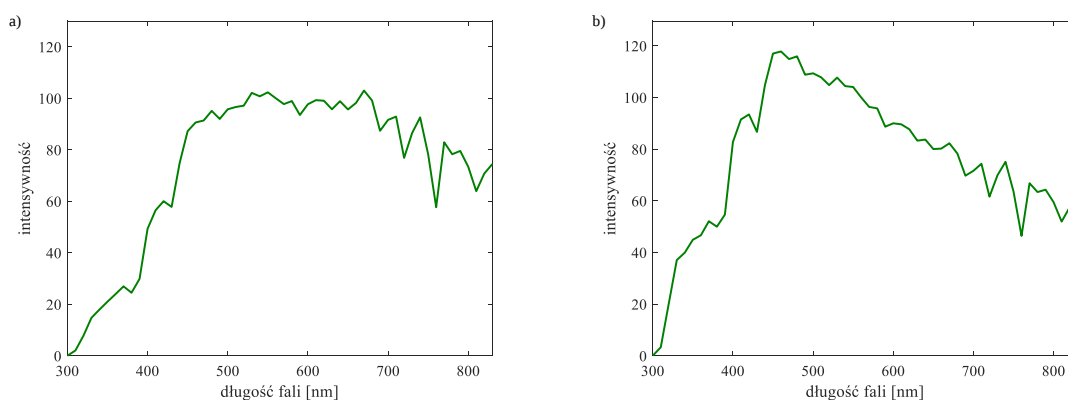
$2 < \Delta E < 3,5$ – niedoświadczony obserwator dostrzega różnicę

$3,5 < \Delta E < 5$ – można dostrzec wyraźną różnicę

$\Delta E > 5$ – obserwator widzi dwa różne kolory

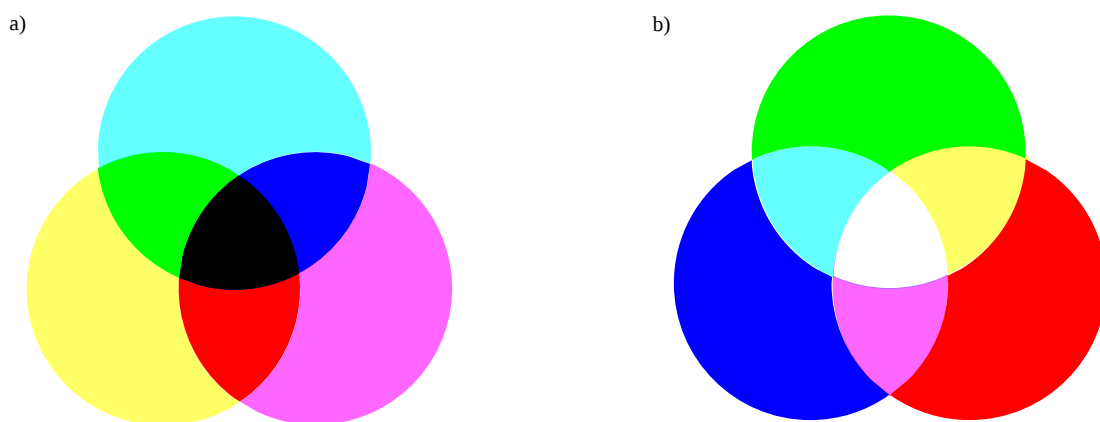
W rzeczywistości w ocenie wizualnej, nawet w kontrolowanych warunkach, tak obliczana różnica barwy nie odzwierciedla w sposób precyzyjny postrzegania różnic przez obserwatora dla próbek z różnych obszarów barwnych [39]. Dla jednych barw różnice wydają się mniejsze dla danego wyniku numerycznego ΔE_{76} a dla innych większe dla takiego samego wyniku ΔE_{76} . Niemniej w środowisku poligraficznym jest to ciągle dość powszechnie używana metoda obiektywnej oceny różnicy barwy w tym znaczeniu, że nawet pomimo niedoskonałości daje takie same, powtarzalne wyniki przy użyciu zgodnych z zaleceniami ISO 13655 urządzeń [37].

Kolejnym krokiem zmierzającym do bardziej precyzyjnej oceny różnicy barwy z uwzględnieniem odmiennej percepcji barwy przez ludzkie oko dla różnych zakresów spektralnych w VIS jest ΔE_{2000} . Wzór ten jest bliższy realnemu postrzeganiu, przez co też zdecydowanie bardziej złożony od wzoru na ΔE_{76} . Zarówno popularne urządzenia, jak i biblioteki takich systemów jak MATLAB czy Python zawierają stosowne funkcje do wyliczania różnicy barwy zarówno dla modelu ΔE_{76} , jak i dla ΔE_{2000} . Z niezależnej od urządzeń przestrzeni barwnej CIELAB, korzystamy również w oprogramowaniu powszechnie stosowanych w branży poligraficznej spektrofotometrów, do tej przestrzeni odnoszą się także biblioteki cyfrowe Pantone – jednej z popularniejszych bibliotek kolorów [40]. Wiele prac w ramach CIE dotyczy oceny innych, niż poligraficzne materiałów zgodnie z D65, niemniej poprzez analogię znajdują one zastosowanie dla wydruków ocenianych w warunkach D50. Standardowe źródło światła CIE D50 o temperaturze barwowej 5000K reprezentuje światło dzienne i znajduje zastosowanie w technologiach poligraficznych [41,42].



Rys. 3 Widma źródeł światła: a) D50 i b) D65 zgodnie z danymi Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej.

Korzystając z różnych urządzeń analizujących barwę na potrzeby zastosowań przemysłowych użytkownik ma zwykle do wyboru nie tylko szereg przydatnych funkcji, ale również co najmniej kilka opcji dotyczących obserwatora, oświetlenia czy też warunków pomiarowych. Obserwator 10° lub 2°, oświetlenie według CIE: A, D50, D65 i inne. Warunki pomiarowe M0, M1, M2 i M3 [43]. Dokonując pomiaru, a w szczególności porównując pomiary dla różnych próbek, należy pamiętać o zachowaniu spójności i zgodności z właściwą normą w tym zakresie. Cały szereg aplikacji i systemów częściowo lub w całości bazuje na standardzie CIELAB. Urządzenia jednego z popularniejszych producentów urządzeń i oprogramowania do pomiarów oraz analizy kolorów – firmy X-Rite, opierają swoje rozwiązania na założeniach tej właśnie przestrzeni barwnej, jako punktu odniesienia. Pracując z kolorami w szerszym kontekście, konieczne jest zrozumienie istotnych różnic w postrzeganiu barw będących wynikiem syntezy addytywnej, a tych wynikających ze zjawiska subtrakcji. Mieszanie addytywne barw stanowi podstawę działania urządzeń pracujących w systemie RGB, jak monitory, aparaty cyfrowe czy smartfony, gdzie uzyskujemy określoną liczbę kolorów mieszając w różnych proporcjach składowe czerwone (Red), zielone (Green) i niebieskie (Blue), suma składowych o maksymalnym nasyceniu, na przykład na ekranie monitora daje nam wrażenie bieli. W komputerowym systemie 8 bitowym nasycenie dowolnej ze składowych R, G i B możemy zdefiniować w zakresie od 0 do 255 co daje nam 256 możliwości dla każdej składowej. Przy trzech składowych otrzymujemy zatem 256^3 , czyli 16 777 216 możliwości.



Rys. 4 a) Subtraktywne mieszanie kolorów, b) addytywne mieszanie światła.

W przypadku zjawiska subtrakcji dochodzi do mieszania pigmentów; suma cyanu, magenty i yellow teoretycznie pozwala otrzymać kolor czarny. W praktyce niedoskonałości pigmentów pozwalają uzyskać kolor ciemnobrązowy. Do uzyskania czerni używa się osobnego pigmentu – black, jako czwartą składową w jednym z najpopularniejszych systemów jakim jest CMYK. Dla odróżnienia użycia czarnego i żółtego rozumianych jako składowe CMYK, od użycia tych określeń w innym kontekście, używam nazewnictwa: cyan, magenta, yellow i black zgodnie z ISO 12647.

7.3 Zagadnienie barwy jako indykatora jakości w druku offsetowym

Techniki oceny druku wielobarwnego ewoluują wraz z rozwojem samego druku. Począwszy od oceny wizualnej, poprzez kontrolę nasycenia farb procesowych, czyli pomiar gęstości optycznej, aż po jakościową ocenę barwy przy użyciu spektrofotometrów. Gęstość optyczną wylicza się jako ujemny logarytm dziesiętny współczynnika odbicia warstwy, wynik pozwala określić w jakim stopniu farba nadrukowana na podłożu odbija promieniowanie elektromagnetyczne fragmentu zakresu spektralnego.

$$D = -\log_{10} R \quad (23)$$

gdzie

$$R = \frac{I}{I_0} \quad (24)$$

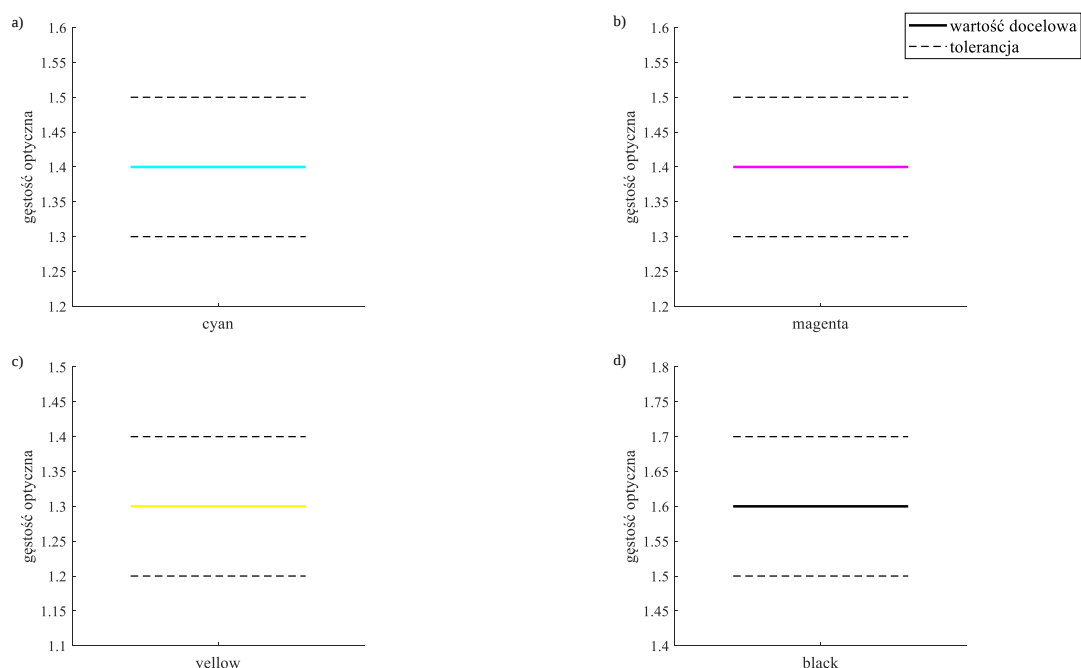
i

$$0 \leq R \leq 1 \quad (25)$$

Gdzie D to gęstość optyczna (ang. density), R to współczynnik odbicia, I_0 padający wycinek zakresu promieniowania elektromagnetycznego, a I to odbity wycinek zakresu promieniowania elektromagnetycznego [7].

Pomiar gęstości optycznej wykonuje się dla pól w 100 % zadrukowanych farbami procesowymi CMYK. Jest to nadal ważny element standaryzacji druku, który pozwala

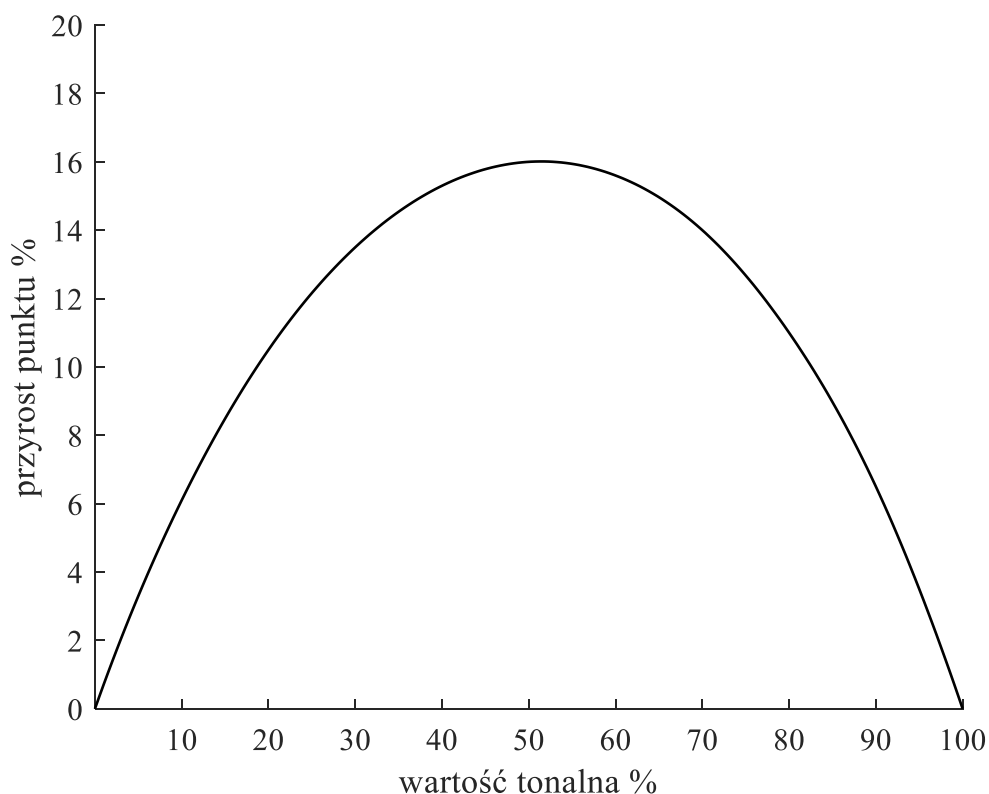
sprawdzać równomierność nałożenia farby na podłoże, ale nie zawiera precyzyjnej informacji o barwie.



Rys. 5 Standardy gęstości optycznej farb procesowych CMYK mierzonych na polu kontrolnym o 100 % pokryciu, dla wybranej specyfikacji druku offsetowego na papierze powlekany: a) cyan, b) magenta, c) yellow, d) black.

Innymi słowy, zanieczyszczona i niezgodna ze specyfikacją właściwą dla farb graficznych farba może nadal mieć prawidłowy, czyli zgodny ze standardem wynik pomiaru gęstości optycznej.

Jakość przejść tonalnych wynika z charakterystyki i właściwej kontroli przyrostu punktu rastrowego. Każdy punkt rastra, naświetlony laserem na formie drukowej, pod wpływem nacisku, a także wchłaniania farby w podłoże zajmuje po wydrukowaniu na papierze większą powierzchnię, niż na formie drukowej. Dodatkowo mamy do czynienia z optycznym przyrostem punktu rastra w wyniku rozpraszania światła wokół punktu rastra nadrukowanego na papierze [44]. Istotne jest, by akceptując te naturalne zjawiska odpowiednio je kontrolować i korygować wówczas, gdy jest to konieczne.



Rys. 6 Charakterystyka przyrostu punktu, krzywa A, na podstawie ISO 12647-2.

Warunki oceny wizualnej z kolei dość precyzyjnie opisuje norma ISO 3664-2000 i jej kolejna edycja [45]. Jednym z istotnych aspektów rozwoju kontroli barwy było przejście od oceny ilościowej do jakościowej, a także wprowadzenie standaryzacji w druku na skalę przemysłową. Niemniej, dopiero po wprowadzeniu do powszechnego użycia pomiarów spektralnych możemy mówić o dokładnej zarówno ilościowej, jak i jakościowej kontroli barwy. Takie podejście nie opiera się już wyłącznie na badaniu nadruku apli barw procesowych rozumianych jako pola testowe w 100 % zadrukowane jedną składową z CMYK, ale pozwala na pomiar i kontrolę dowolnej kombinacji CMYK zarówno, jeśli chodzi o udział poszczególnych składowych CMYK (na przykład pierwsze pole testowe C, drugie CM, trzecie CMY, czwarte pole CMYK, piąte CK itd.), jak i udział procentowy każdej składowej, na przykład pierwsze pole 50 % C, drugie 25 % C i 40 % M, trzecie 10 % C, 25 % M i 50 % Y, itd., dla wszystkich możliwych kombinacji, czyli dla wszystkich potencjalnie mogących wystąpić dla takiego rodzaju druku wielobarwnego. Zarówno barwę apli, jak i charakterystykę przyrostu punktu definiuje norma ISO 12647 [1]. Znajac strukturę druku czterokolorowego można proste, jak

również bardziej złożone paski testowe i siatki testowe definiować numerycznie w postaci macierzy danych, które schematycznie przedstawiono na rysunku 7.

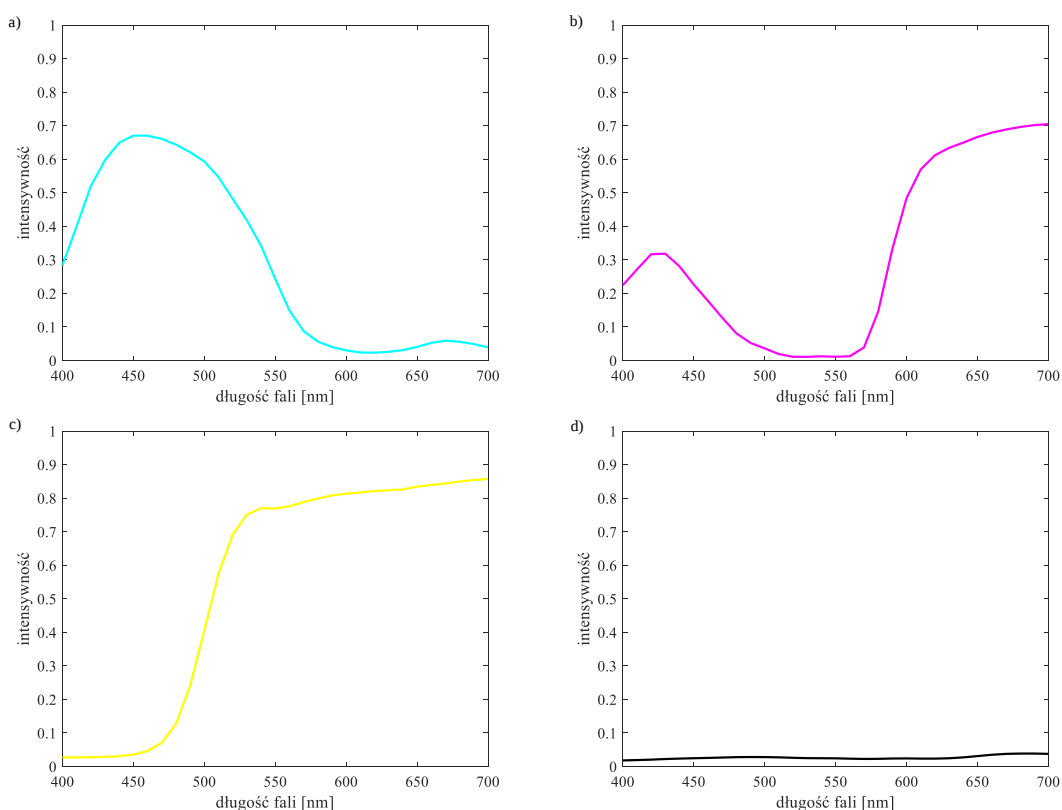
	C	M	Y	K	Suma pokrycia w %
	20 %	0 %	0 %	0 %	20 %
	40 %	0 %	0 %	0 %	40 %
	100 %	0 %	0 %	0 %	100 %
	70 %	0 %	0 %	0 %	70 %
	100 %	40 %	0 %	0 %	140 %
	70 %	70 %	0 %	0 %	140 %
	100 %	100 %	0 %	0 %	200 %
	40 %	40 %	0 %	0 %	80 %
	40 %	100 %	0 %	0 %	140 %
	0 %	20 %	0 %	0 %	20 %
	0 %	40 %	0 %	0 %	40 %
	0 %	100 %	0 %	0 %	100 %
	0 %	70 %	0 %	0 %	70 %
	0 %	100 %	40 %	0 %	140 %
	0 %	70 %	70 %	0 %	140 %
	0 %	100 %	100 %	0 %	200 %
	0 %	40 %	40 %	0 %	80 %
	0 %	40 %	100 %	0 %	140 %
	0 %	0 %	20 %	0 %	20 %
	0 %	0 %	40 %	0 %	40 %
	0 %	0 %	100 %	0 %	100 %

Rys. 7 Składowe CMYK dla przykładowych pól kontrolnych.

Teoretycznie w pliku podzielonym na separację CMYK możemy zdefiniować maksymalnie sumę 400 % wówczas, gdy mamy po 100 % z każdej składowej CMYK. Takie rozważanie prowadzi do wniosku, że zmieniając daną składową co 1 % mamy na przykład dla cyjanu 101 możliwości – od 0 % pokrycia farbą do 100 % pokrycia farbą. Jeśli uwzględnimy wszystkie składowe CMYK daje nam to już 101^4 , czyli 104 060 401 możliwości. W praktyce takie pełne 400 % pokrycie farbą nigdy nie jest stosowane, ponieważ maksymalną możliwą do uzyskania na danym podłożu intensywność druku osiąga się już przy znacznie niższej sumie składowych. Dla papierów powlekanych w druku offsetowym, zwojowym suma pokrycia nie powinna nigdy przekraczać 300 %, a dla papierów niepowlekanych pełne możliwości rozpiętości barwnej osiąga się przy

jeszcze niższych wartościach i dalsze zwiększanie pokrycia procentowego w pliku nie podnosi już jakości odwzorowania w druku.

Ważnym aspektem są również ograniczenia i trudności technologiczne związane z naniesieniem, a później utrwaleniem tak dużej ilości farby, a także kwestia racjonalnego ze względów ekonomicznych i środowiskowych zużycia surowców. Oczywiście jest zatem dążenie do uzyskania zgodnej ze specyfikacją jakościową odbitki drukarskiej przy minimalnej ilości farby, która na to pozwoli [46]. W tym miejscu warto również wspomnieć, że nafarbowanie wynikające z sumy składowych CMYK w pliku, dla bardzo niskich wartości procentowych również może nie zostać poprawnie odwzorowane, ponieważ punkty rastra z obszarów kilkuprocentowych, w zależności od rodzaju podłoża drukarskiego, a także techniki rastrowania mogą okazać się zbyt małe, by je poprawnie odwzorować – mogą zostać wchłonięte w strukturę papieru nie wpływając w sposób istotny na odwzorowanie barwy w danym obszarze.



Rys. 8 Wykresy widm spektralnych dla pól zadrukowanych w 100 % z wydruku kalibrowanego wydrukowanego zgodnie z profilem ISO_Coated_v2_eci.icc, zmierzonych spektrofotometrem Exact firmy X-Rite: a) cyan, b) magenta, c) yellow, d) black.

W praktyce, do pomiaru i kontroli jakości druku offsetowego w zakresie przejść tonalnych rzadko korzysta się z pól testowych o zdefiniowanym w pliku pokryciu procentowym niższym niż 10 %. Niemniej na potrzeby różnego rodzaju testów druku, nowych rozwiązań w zakresie rastrowania czy innych metod optymalizacji, korzysta się z różnego rodzaju grafik testowych, by uzyskać możliwie kompletne informacje o procesie i surowcach. Przykładem podejść służących lepszej kontroli i bardziej precyzyjnej standaryzacji procesów w druku offsetowym są między innymi rozwiązania oferowane przez firmę Heidelberger Druckmaschinen AG znane jako Pan4C. Idea ta opracowana przez Dietera Kirchnera, niemieckiego eksperta i praktyka z dziedziny druku offsetowego, opiera się na druku specjalnie przygotowanych, opatentowanych form drukowych, których grafika to szereg narzędzi analitycznych drukowanych w ramach testów. Analiza takich wydruków pozwala na diagnozowanie problemów technologicznych i wprowadzanie stosownych korekt [47].

7.4 Analiza głównych składowych – PCA

Początki analizy Głównych Składowych (ang. PCA – principal component analysis) to prace Pearson’a (Pearson, 1901). Niewątpliwie wart zaznaczenia jest wkład Fisher’a i MacKenzie’ego, którzy zaproponowali podstawowy algorytm PCA, znany pod nazwą NIPALS (ang. nonlinear iterative partial least squares) [48]. Do rozwoju metody PCA przyczyniła się w znacznym stopniu także praca Hottelinga (Hotteling 1933) [49].

Istotą PCA jest przedstawienie wielowymiarowych danych, $\mathbf{X}$, o m próbkach i n parametrach w postaci iloczynu dwóch nowych macierzy $\mathbf{T}$ ($m \times f$) i $\mathbf{P}$ ($n \times f$), gdzie $f < n$, tak, że zawierają współrzędne próbek i parametrów na kierunkach, które maksymalizują opis wariancji. Użycie wariancji w funkcji indeksu projekcji pozwala uzyskać precyzyjną informację o tym, jak duże jest zróżnicowanie w danym zbiorze próbek [50]. Pierwsza składowa wyjaśnia największy zakres zmienności danych. Każdy następny czynnik główny wyjaśnia tę część zmienności danych, której poprzednie czynniki główne nie opisały [51].

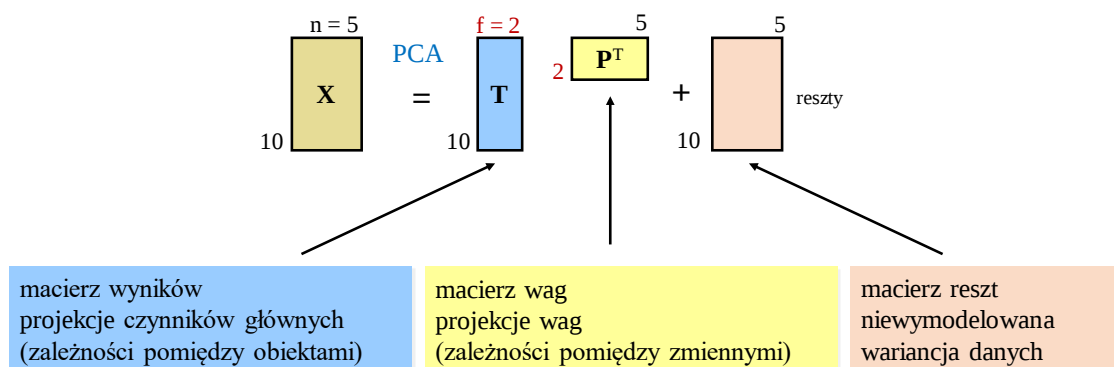
PCA jest ważnym narzędziem stosowanym w chemometrii do efektywnej analizy danych wielowymiarowych, przydatnym szczególnie, gdy kluczowa jest czytelna wizualizacja danych o więcej niż trzech wymiarach. Przedstawienie danych o czterech i więcej wymiarach wymusza korzystanie ze skomplikowanych i mało czytelnych technik prezentacji danych. Posłużenie się ograniczoną ilością głównych czynników w sposób zdecydowany poprawia skuteczność eksploracji danych. Ograniczenie wizualizacji do

trzech wymiarów pozwala na efektywną analizę i wyciągnięcie pierwszych wniosków już na podstawie samych wykresów. PCA przedstawia oryginalne dane ułożone w macierzy z m wierszami, na przykład w postaci próbek widm i n kolumnami, gdzie kolumny definiują na przykład kanały spektralne. $\mathbf{X}$ to iloczyn współczynników wynikowych $\mathbf{T}$ i macierzy wag $\mathbf{P}$ posiadającej f kolumn:

$$\mathbf{X} = \mathbf{TP}^T + \mathbf{E} \quad (26)$$

Liczba czynników głównych, f , definiuje poziom złożoności modelu. Pierwsze f czynników głównych pozwala w określonym stopniu odtworzyć oryginalną macierz. Niewyjaśniona zmienność danych, tzw. reszty, opisuje tzw. macierz reszt, $\mathbf{E}$.

Metoda PCA, ujawnia trendy w widmach hiperspektralnych, w sposób wykazujący niejednorodność powierzchni próbki. Techniki obrazowania hiperspektralnego wraz z PCA mogą być użyte do estymowania stopnia niehomogeniczności próbki fizycznej, w tym także rozumianej, jako zobrazowany zapis fragmentu zadrukowanej grafiki wielobarwnej. W przypadku oceny i kontroli wydruków mamy do czynienia z dość szczególnym przypadkiem próbki, kiedy z jednej strony badany jest fizyczny fragment papieru, pokryty farbami graficznymi w różnych proporcjach, ale w istocie głównym przedmiotem zainteresowań badawczych jest jakość odwzorowanego obrazu i dokładność odwzorowania barwy.



$$f < n \quad \text{rząd chemiczny} < \text{rząd matematyczny}$$

Rys. 9 Analiza czynników głównych, schemat procesów i zależności.

Przydatność tego podejścia uwiadamia się w sposób szczególny przy pracy na wielowymiarowych danych chemicznych i w tym właśnie obszarze należy szukać genezy, niemniej obecnie zastosowania PCA wykraczają znacząco poza tę dziedzinę nauk i wiele wskazuje, że trend ten się utrzyma. Dość wskazać przykład widm VIS, UV czy NIR, które to sygnały instrumentalne opisują badane próbki i tworzą macierze danych. Spektrometria aktualnie wykracza poza nauki chemiczne, znajdując zastosowanie w ocenie barwy wszędzie tam, gdzie ten parametr jest istotnym indykátorem jakościowym. Obrazowanie spektralne dla różnych zakresów długości fali elektromagnetycznej jest coraz chętniej wykorzystywane jako narzędzie nieinwazyjnej oceny i kontroli jakości [52].

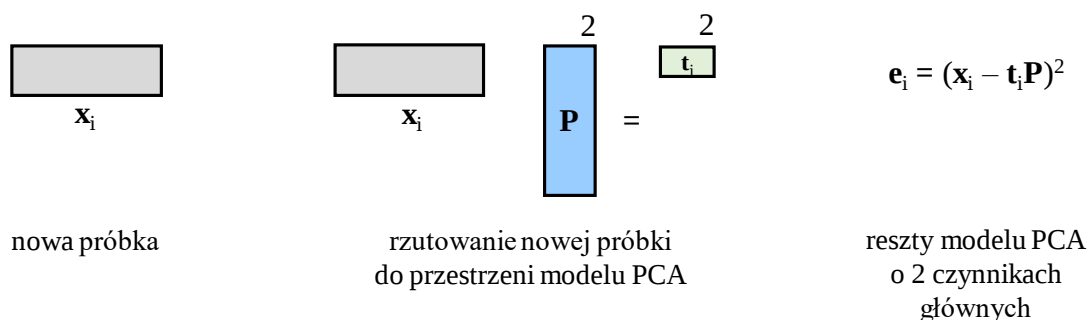
Mając do dyspozycji jako technikę analityczną obrazowanie hiperspektralne (HSI), w toku pobierania próbek otrzymamy dla każdego piksela obrazowanej powierzchni odczyt intensywności sygnału dla każdego, z nawet kilkuset, kanału spektralnego w mierzonym zakresie. Z praktycznego punktu widzenia te niezwykle obszerne, złożone i wielowymiarowe dane nie będą w obszarze naszych zainteresowań badawczych jako całość. Niemniej z tą specyficzną klęską urodzaju będziemy musieli się zmierzyć – nie będziemy z całą pewnością mogli interpretować tych danych w sposób bezpośredni, bez wcześniejszego uporządkowania i przygotowania. Z jednej strony wielokanałowe obrazowanie, osobno dla każdego niewielkiego piksela obrazu, pozwala na dostęp do nieosiągalnych wcześniej informacji. Używane powszechnie w branży poligraficznej urządzenia dostarczają informację o intensywności sygnału spektralnego dla uśrednionego obszaru wielkości tzw. oczka pomiarowego (ang. aperture). Z drugiej strony bez skutecznych technik modelowania wielowymiarowych danych analitycznych nie potrafimy do nich sięgnąć, gdyż najbardziej istotne informacje są zwykle ukryte. Bez wykorzystania technik i strategii chemometrycznych na wszystkich etapach, począwszy od planowania eksperymentów, aż po końcowe analizy i wnioski, uzyskanie informacji z ekstremalnie złożonych danych wielowymiarowych byłoby mocno skomplikowane, a czasami wręcz niemożliwe.

7.5 SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy)

Istotnym uzupełnieniem zalet modelu PCA o możliwość klasyfikacji próbek jest podejście Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) [53,54].

Przyporządkowanie próbek do określonej grupy odbywa się na podstawie zdefiniowanych wcześniej miar podobieństwa wyrażających odległość próbki od środka danych i przestrzeni modelu biorąc pod uwagę wyznaczone parametry modelu takie jak wyniki, wagi oraz reszty od modelu [43]. W praktyce oznacza to konstrukcję dla każdej grupy próbek niezależnego modelu PCA, a następnie ustalenie krytycznych wartości odpowiednio odległości Mahalanobisa, oraz reszt od modelu wyznaczonych na podstawie reprezentatywnego zbioru próbek i ich dystrybucji w przestrzeni istotnych czynników głównych.

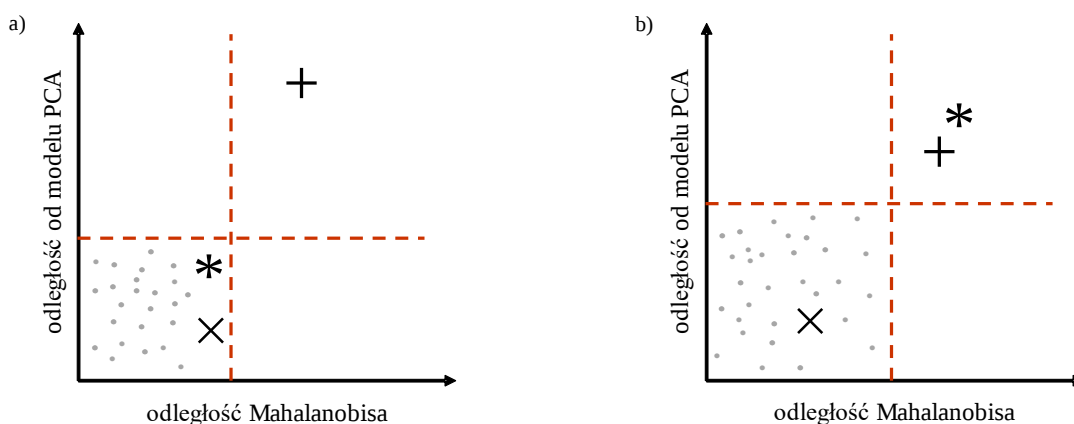
Na rysunku 10 przedstawiono ogólną ideę operacji rzutowania dowolnej i -tej próbki do przestrzeni określonego modelu PCA o dwóch czynnikach głównych używając macierzy wag $\mathbf{P}$, a także sposób obliczania reszt od modelu dla tej próbki. Na podstawie wartości wyników oraz reszt od modelu obliczane są odległość Mahalanobisa oraz odległość od przestrzeni modelu, a uzyskane wartości są następnie porównywane z odpowiednimi wartościami krytycznymi.



Rys. 10 Procedura rzutowania i -tej próbki do przestrzeni modelu PCA o dwóch czynnikach głównych, oraz sposób obliczania reszt od modelu.

Testowana próbka należy do rozważanej grupy próbek, jeśli obliczona dla niej odległość Mahalanobisa i wartość reszt od modelu PCA są mniejsze niż przyjęte wartości krytyczne. W literaturze opisano kilka różnych sposobów ustalania wartości krytycznych, które umożliwiają budowę reguł decyzyjnych. Najczęściej jednak zakłada się określony typ rozkładu wartości odległości i na tej podstawie oblicza się wartości krytyczne. I tak, w przypadku odległości Mahalanobisa można przyjąć, że górny limit jest równy pierwiastkowi wartości krytycznej rozkładu chi-kwadrat dla f stopni swobody i poziomu istotności alfa, a w przypadku z-transformowanych odległości od modelu, dla poziomu

istotności równemu 0,999, wynosi trzy. Oba limity mogą być również modyfikowane w zależności od realnych potrzeb i specyfiki określonego problemu klasyfikacyjnego. Metoda SIMCA to podejście klasyfikacyjne, ponieważ pozwala budować miękkie reguły logiczne. W przypadku zagadnień wymagających jednoczesnego podejmowania decyzji dla wielu grup próbek, które odpowiadają np. licznym barwnym polom z wzornika kolorów, w oparciu o utworzone indywidualne reguły logiczne model SIMCA sprawdza kolejno możliwość przynależności testowanej próbki do każdej z grup. W efekcie, próbka może należeć tylko do jednej grupy, do kilku albo do żadnej. Szczególnie ten ostatni scenariusz decyzyjny jest niezwykle pożądanym, gdyż często prawdziwa liczba rozważanych grup na etapie budowy modelu SIMCA nie jest znana, a próbki które je reprezentują są niedostępne. Wspomniane możliwe scenariusze klasyfikacji trzech próbek oznaczonych jako '*', 'x' i '+' przedstawiono na diagramie odległości, zobacz rysunek 11, na którym czerwoną przerywaną linią oznaczono odpowiednie wartości krytyczne.



Rys. 11 Reguły klasyfikacji skonstruowane za pomocą modelu SIMCA dla dwóch grup próbek wraz z trzema możliwymi scenariuszami decyzji: próbka '*' należy do pierwszej grupy, ale nie należy do drugiej, próbka 'x' należy do obu grup, a próbka '+' nie należy do żadnej z grup. Czerwoną przerywaną linią oznaczono wartości krytyczne odpowiednio dla odległości Mahalanobisa i odległości od modelu PCA.

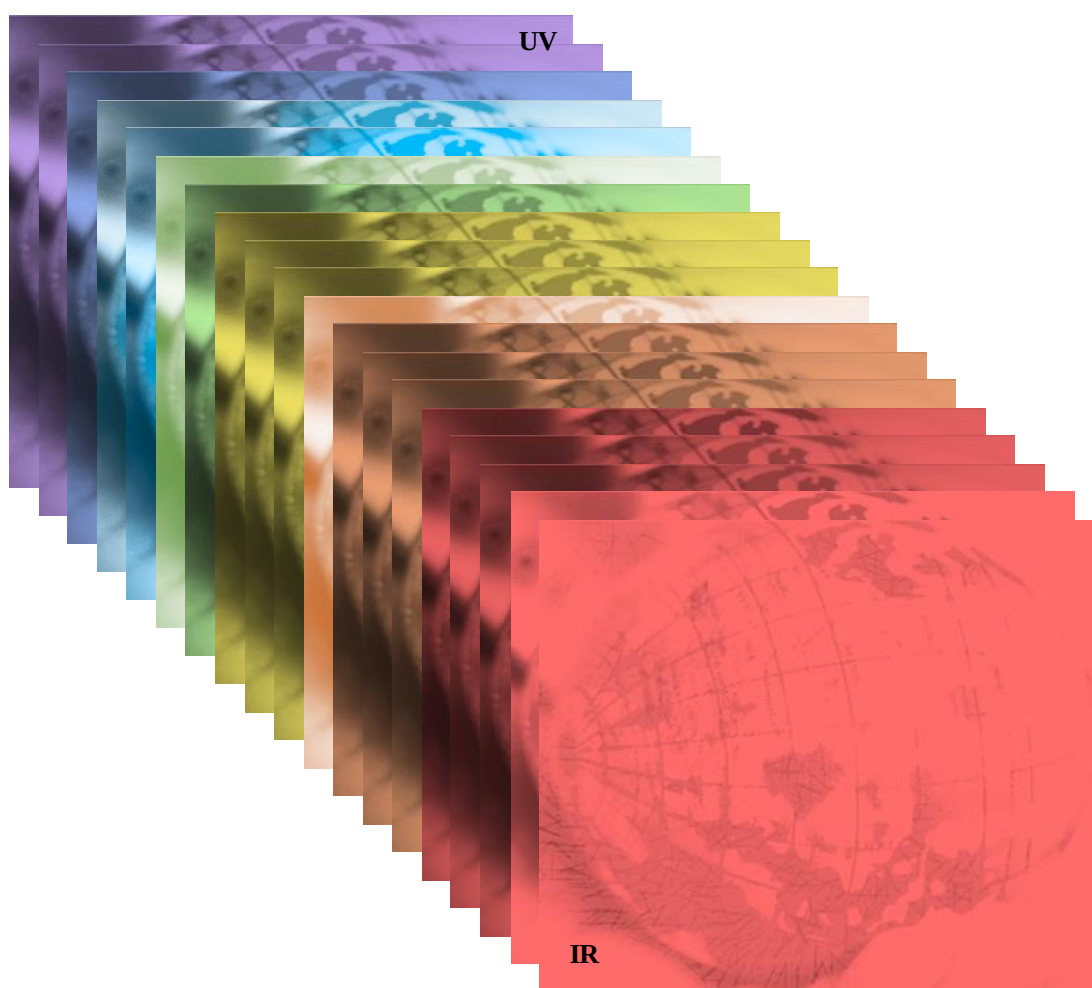
Do opisu działania reguł logicznych modelu SIMCA można stosować różne miary, wśród których czułość i specyficzność są najbardziej popularne. Czułość wyraża prawdopodobieństwo, że próbka należąca do danej grupy zostanie prawidłowo

rozpoznana przez regułę logiczną modelu SIMCA jako faktycznie należąca do tej grupy. Z kolei specyficzność to prawdopodobieństwo, że próbka nienależąca faktycznie do danej grupy zostanie prawidłowo odrzucona przez model SIMCA. Skuteczne reguły klasyfikacyjne charakteryzuje bardzo wysoka czułość i specyficzność. W najlepszym wypadku są one równe jeden lub 100%. Należy tworzyć je ucząc model na zestawie reprezentatywnych próbek, które charakteryzują wszystkie oczekiwane w czasie korzystania z modelu źródła zmienności.

Główne zalety metody SIMCA w kontekście projektowania i budowania systemów eksperckich na potrzeby kontroli jakości druku wielobarwnego, wynikają wprost z własności metody PCA i możliwości szybkiego obliczania czynników głównych poprzez dekompozycję macierzy wariancji-kowariancji danych, tak skonstruowanej by zapewnić efektywne obliczenia. Z kolei zważywszy fakt podejmowania decyzji w oparciu o reguły logiczne wyznaczone dla wielu grup próbek budując uprzednio niezależne modele PCA, daje unikalną możliwość znacznego zrównoleglania obliczeń, co może istotnie wspomóc i przyspieszyć kontrolę jakości druku w oparciu o obrazowanie hiperspektralne. Warto również nadmienić, że model SIMCA dość łatwo można adaptować do sytuacji problematycznych. Jest dostępny stabilny wariant modelu SIMCA, czyli taki, który pozwala na konstrukcję reguł logicznych pomimo obecności w danych uczących próbek odległych [55,56], oraz wariant zapewniający utworzenie modelu SIMCA, gdy dane zawierają jednocześnie brakujące elementy i próbki odległe [57,58]. Tego typu modele SIMCA są niezwykle przydatne w sytuacjach, gdy zbiory uczące charakteryzują się bardzo dużą zmiennością oraz rejestrowane zmienne są w różnym stopniu niekompletne [59].

7.6 Obrazowanie hiperspektralne

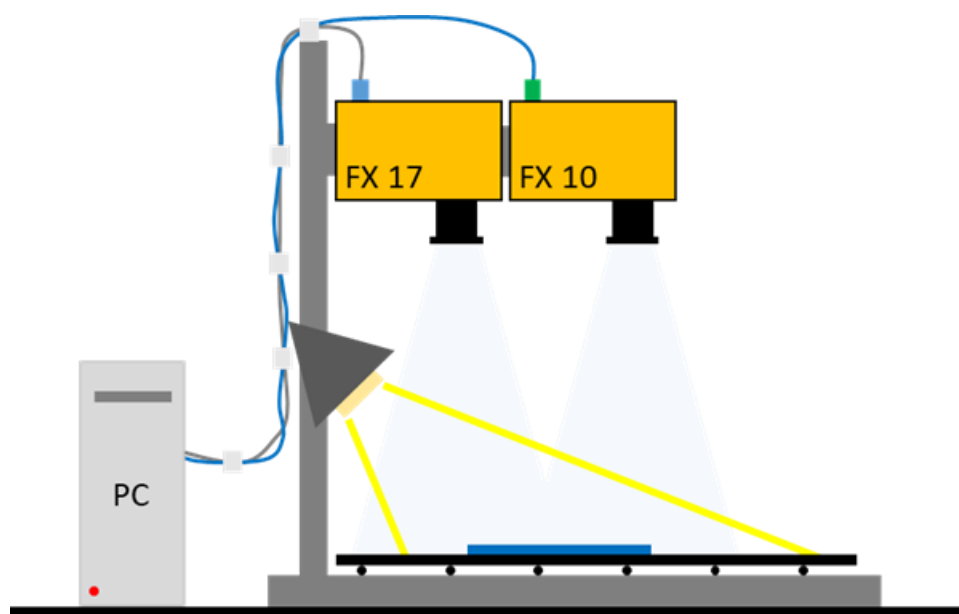
Początki obrazowania hiperspektralnego wywodzą się ze spektroskopii, do której należy badanie i wnioskowanie na podstawie rozkładu promieniowania elektromagnetycznego, zarówno w funkcji odbicia, jak i pochłaniania oraz rozpraszania. Zależnie od użytych detektorów, źródeł światła i badanego zakresu długości fali promieniowania elektromagnetycznego, rozpatrujemy różne obszary zastosowań szeregu metod, które łączy analiza tzw. widm (ang. spectrum).



Rys. 12 Wizualizacja obrazu hiperspektralnego wraz z uwzględnieniem struktury kanałów spektralnych.

Obrazowanie wielospektralne i hiperspektralne znalazło zastosowania w teledetekcji i ciągle jest w tej dziedzinie rozwijane. Nieco później, a obecnie już równolegle z teledetekcją, metoda była już używana w przemyśle, szczególnie do kontroli jakości różnych produktów, poprzez obrazowanie próbek przy odległości sensora od próbki w zakresie od zera do maksymalnie kilkudziesięciu centymetrów. Obraz hiperspektralny zapisywany jest w postaci kostki danych (ang. data cube), gdzie poszczególne warstwy obrazu, odpowiednio dla danej długości fali, są zapisywane w postaci macierzy danych. Jedna warstwa odpowiada jednemu kanałowi spektralnemu. Innymi słowy, obraz mono przy takim podejściu to jedna warstwa – dwuwymiarowa macierz liczb x - y - z , gdzie każda para liczb „ x - y ” definiuje pozycję jednego piksela, zaś „ z ” intensywność sygnału dla jednej długości fali widma elektromagnetycznego. Do zapisu obrazu w systemie RGB

niezbędne są trzy takie macierze, nasze warstwy – odpowiednio po jednej do zapisu reprezentacji umownego red, green i blue. W przypadku obrazów wielospektralnych i hiperspektralnych takich macierzy danych powstaje tyle, ile mamy kanałów spektralnych. Aktualnie, zależnie od wyboru i konfiguracji urządzenia, istnieje możliwość obrazowania nawet kilkuset kanałów spektralnych równocześnie.



Rys. 13 Tandemowy układ do obrazowania hiperspektralnego próbek w zakresie bliskiej podczerwieni i światła widzialnego w laboratorium Instytutu Chemii Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach.

Istotnym elementem niezbędnym do efektywnego obrazowania hiperspektralnego jest właściwie dobrane oświetlenie. Widmo źródła światła powinno zapewniać oświetlenie dla obrazowanych długości fali w taki sposób, by pozwalało uzyskać optymalny stosunek sygnału do szumu w całym analizowanym zakresie spektralnym [60]. W warunkach laboratoryjnych dość powszechnie stosowane są światła halogenowe, natomiast w warunkach przemysłowych, coraz częściej stosuje się skalibrowane oświetlacze z diodami elektroluminescencyjnymi wysokiej mocy (ang. Light Emitting Diode w skrócie LED). Ważna jest nie tylko optymalna intensywność oświetlenia obszaru roboczego, ale również jego równomierność na całej obrazowanej powierzchni, a także odpowiedź widmowa źródła światła. Naturalnym ograniczeniem szybkości obrazowania hiperspektralnego przy użyciu kamer liniowych jest konieczność uzyskania możliwie wysokiego poziomu sygnału i konieczność ograniczenia szumu. Oczekowaną relację

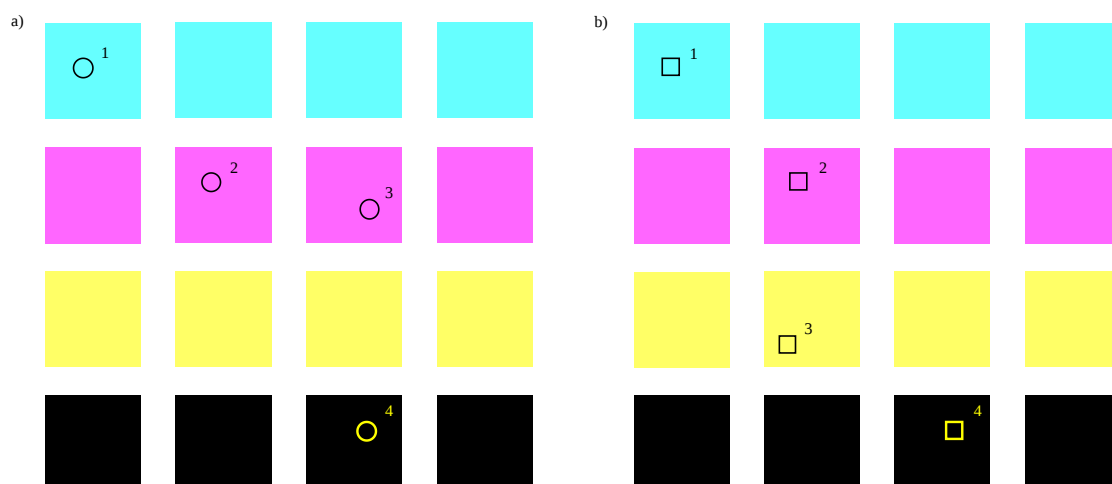
sygnału do szumu uzyskuje się poprzez wyznaczenie optymalnej proporcji pomiędzy czasem ekspozycji, intensywnością oświetlenia próbki i szybkością skanowania.



Rys. 14 Lampa LED o regulowanej temperaturze barwowej w zakresie 2700K-6500K, współczynnik odwzorowania kolorów CRI 95+.

Intensywne doświetlenie próbki pozwala zmniejszać czas ekspozycji, jednocześnie zwiększając szybkość skanowania przy ciągle wysokim poziomie sygnału i akceptowalnie niskim poziomie szumu.

W odróżnieniu od punktowych spektrofotometrów, w przypadku kamery hiperspektralnej z całego, zeskanowanego obrazu możemy wybierać obszary do analizy w sposób arbitralny już po wykonanym, kompletnym pomiarze powierzchni próbki. Dobór umownej apertury realizowany jest w tym przypadku poprzez pobieranie wycinków obrazu zdefiniowanych liczbą pikseli. Może odbywać się to w ten sposób, że wskazujemy środkowy piksel kursorem, a program oznacza wybrany fragment zdefiniowany liczbą pikseli.



Rys. 15 Wizualizacja pobierania próbek obrazu do analizy: a) apertura okrągła charakterystyczna dla spektrofotometrów używanych w przemyśle poligraficznym, b) wirtualna apertura kwadratowa pozwalająca pobrać w programie komputerowym zdefiniowany liczbą pikseli fragment obrazu hiperspektralnego.

Po uwzględnieniu odległości kamery od próbki i wybranych parametrów obrazowania można wystarczająco dokładnie oszacować powierzchnię wybieranych fragmentów na podstawie zobrazowanych obiektów o znanych wymiarach.

Tabela 1 Wielkości oczka pomiarowego na podstawie normy ISO 13655.

Zalecane średnice i powierzchnie próbkowania półtonów w zależności od liniatury rastra				
Liniatura rastra	Średnica apertury próbkującej		Pole powierzchni próbki obrazu	
Lpi	Minimalna w mm	Zalecana w mm	Minimalne w mm ²	Zalecane w mm ²
133	1,9	2,9	2,9	6,4
150	1,7	2,5	2,3	5,1
175	1,5	2,2	1,7	3,7
200	1,3	1,9	1,3	2,9
250	1,0	1,5	0,8	1,8

Aby dobrać powierzchnię apertury o kształcie innym niż okrąg, która odpowiada okrągłej aperturze o określonej średnicy, spełniając tym samym zalecenia do analizy barwy w druku offsetowym, musimy pamiętać, że żaden wymiar nie powinien być mniejszy od średnicy okrągłego oczka pomiarowego [37].

7.7 Sygnał instrumentalny

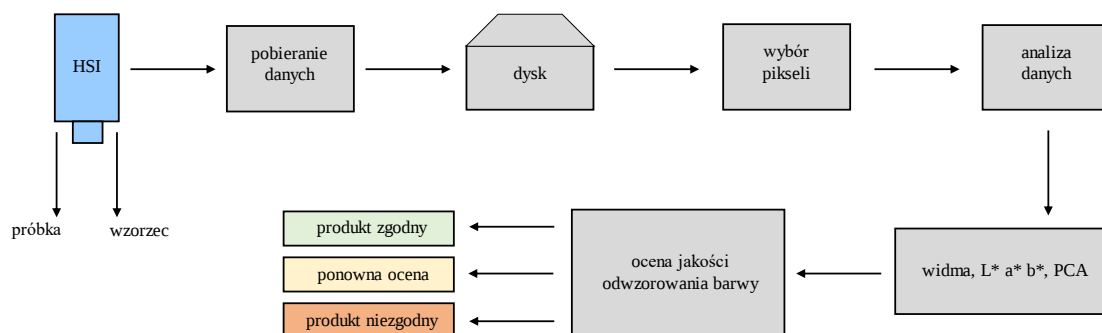
Sygnały instrumentalne charakteryzują w sposób analityczny bądź komplementarny właściwości fizyczne i chemiczne złożonych próbek. Pozyskiwane są przy pomocy różnych instrumentów, a także bardziej złożonych układów pomiarowych. W efekcie uzyskujemy, chromatogramy, densytogramy, widma fluoroscencyjne, czy szczególnie ważne do zastosowań związanych z analizą barwy i homogeniczności powierzchni – obrazy (widma) hiperspektralne. Sygnały złożone przestrzennie i widmowo wymagają szczególnej uwagi zarówno podczas projektowania eksperymentu, jak i pod względem analizy danych. Współczynnik korelacji dla poszczególnych obszarów niehomogenicznych obrazów hiperspektralnych zależy w sposób istotny od rozdzielczości przestrzennej. Innymi słowy, na przykładzie grafiki wielobarwnej, od rozdzielczości przestrzennej zależy, ile pojedynczych pikseli ma powierzchnię homogeniczną, a ile z nich jest na przykład w połowie czarnych, a w połowie białych. Zatem, zanim zaczniemy szukać współczynnika korelacji na poziomie widm dla zadanego zakresu i przy wybranej rozdzielczości spektralnej, konieczne jest rozstrzygnięcie doboru obszarów pod względem rozdzielczości przestrzennej. Będący przedmiotem naszych badań druk offsetowy z założenia dostarcza próbek quasi-homogenicznych. Obszary graficzne jednolite pod względem barwy dla obserwatora, są w istocie zbudowane z punktów rastra – czyli podczas analizy kamerą hiperspektralną mamy do czynienia z powierzchnią niehomogeniczną. Próbką w pełni homogeniczną to taka, w której najmniejsze możliwe do rozdzielenia struktury mają identyczne właściwości fizyko-chemiczne. Dla tak, za Esbensenem, rozumianej definicji należy przyjąć, że próbkę w postaci fragmentu obrazu wielobarwnego, wyekstrahowanego z powierzchni druku, czy to poprzez pomiar kamerą hiperspektralną, czy inną metodą obrazowania, należy uznać za heterogeniczną [61]. Czy to będzie zobrazowany fragment podłoża (0 % pokrycia farbą graficzną), czy zadrukowanej apli (100 % pokrycia farbą graficzną), bądź wszelkie zakresy pośrednie w druku wielotonalnym uzyskanym poprzez rastrowanie, w żadnym z tych przypadków nie spełniamy ściśle warunku homogeniczności. Wniosek ten dotyczy próbki rozumianej, jako fragment obrazu zadrukowanego na papierze, ale także samych surowców będących nośnikiem tegoż obrazu – czyli w przypadku druku offsetowego – farb graficznych i papieru.

7.8 Systemy ekspertowe

W procesie wprowadzania standaryzacji w środowiskach przemysłowych, ważnym elementem są niewątpliwie instrukcje robocze. Najlepszy, czyli najbardziej bezpieczny, zwykle najszybszy i optymalny kosztowo sposób wykonania danej czynności lub realizacji procesu to oczekiwany standard. Korzyści ze standaryzacji są tym bardziej zauważalne, im większa skala środowiska, w którym są wdrażane. Dobrze rozumiana standaryzacja to: zapewnienie oczekiwanego poziomu bezpieczeństwa, właściwa jakość procesów i produktów, a także dbałość o zgodność z obowiązującymi przepisami prawa. Jednym ze sposobów na utrwalenie korzystania ze standardów jest tworzenie i doskonalenie zrozumiałych instrukcji roboczych. Skuteczność narzędzia jakim są instrukcje robocze zależy od ich aktualności i dostępności, by to zapewnić należy ograniczyć ilość tego rodzaju dokumentacji do koniecznego minimum. Ważne też, by do tworzenia instrukcji roboczych włączyć ekspertów, którzy określone w instrukcjach zadania realizują na co dzień, a z drugiej strony zapewnić im wsparcie merytoryczne i redakcyjne w zakresie kompetencji do efektywnego tworzenia takiej dokumentacji. Dobrze przygotowane instrukcje robocze są nieocenioną pomocą przy wdrażaniu nowych osób do pracy na nowe dla nich stanowiska pracy, jak również przy wprowadzaniu zmian technologicznych przy jednoczesnym zachowaniu standardów produkcji.

Kolejnym naturalnym krokiem doskonalenia ustandaryzowanego środowiska przemysłowego są systemy ekspertowe. Systemy ekspertowe mają bogatą i długą historię, ale w dzisiejszym rozumieniu najbliższe im do niektórych precyzyjnych rozwiązań opartych o sztuczną inteligencję [62]. Choć są powszechnie stosowane, to popularność w rozumieniu rozpowszechniania wiedzy na temat tej kategorii systemów nie jest adekwatna do skali ich stosowania. W interesie przedsiębiorców, którzy wypracowali własne skuteczne narzędzia nie jest szerokie rozpowszechnianie wiedzy o tym jak uzyskują przewagę konkurencyjną. W elementarnym ujęciu program, który posiada oddzielną, tekstową bazę wiedzy pozyskaną od osoby-eksperta i system wnioskujący na podstawie tej bazy wiedzy według zdefiniowanych reguł logicznych – to system ekspertowy. Mówiąc o ekspercie w kontekście systemów wspomagających powtarzalne decyzje w celu ich automatyzacji, myślimy o osobie posiadającej obszerną, specjalistyczną wiedzę z danej dziedziny oraz, co nie mniej ważne, umiejętności wykorzystania tej wiedzy do wnioskowania i rozwiązywania konkretnych problemów. Struktura funkcjonalna systemu ekspertowego składa się z bazy wiedzy, systemu

wnioskującego, dynamicznej bazy wiedzy – służącej do przechowywania wyników wnioskowania, edytora bazy wiedzy i interfejsu użytkownika [63].

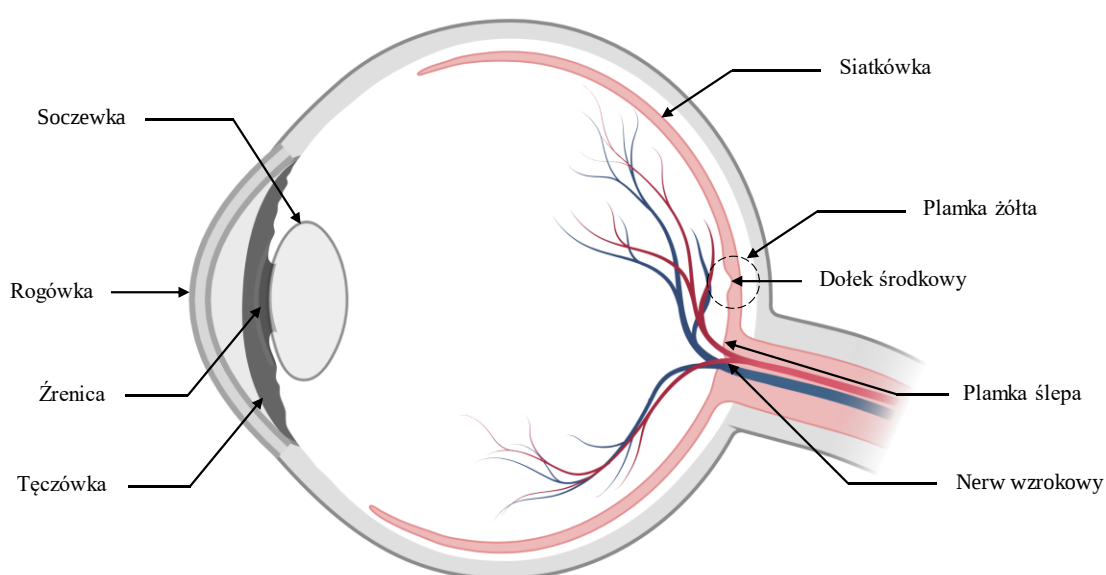


Rys. 16 Schemat przepływu danych i procesów w systemie eksperckim do oceny jakości barwy produktów poligraficznych przy użyciu obrazowania hiperspektralnego.

Złożoność i skuteczność rozmaitych systemów ekspertowych zależy w znacznej mierze od dostosowania założeń do charakterystycznych wymogów zależnych od specyfiki branżowej. W branży poligraficznej dość powszechnie stosowanym elementem oceny produktów są różnego rodzaju grafiki testowe i kontrolne [64]. Wybór konkretnych grafik testowych, tworzenie własnych, a także często hierarchiczny sposób interpretacji uzyskanych w tego rodzaju testach wyników, stanowi niejednokrotnie dorobek i know-how firm poligraficznych. Jednym z typowych podejść jest kolejna ocena równomierności nałożenia farb procesowych na polach testowych pokrytych w 100 % oddzielnie, każdą ze składowych CMYK. Następnie ocena stabilności charakterystyki tonalnej na polach kontrolnych rastrowych dla wybranych wartości na przykład 40 % i 80 % dla cyan i analogicznie dla pozostałych składowych. Ocena wizualna czy szarość jest neutralna kolorystycznie i nie ma dominującego zabarwienia na przykład żółtawego, a także pomiar na testach balansu szarości [65].

8. Postrzeganie barwy jako szczególny rodzaj akwizycji i analizy obrazu

Znakomita większość badań i systemów barwnych opiera się na założeniu widzenia tróchromatycznego, tak działa normalne postrzeganie kolorów przez człowieka. Oko ludzkie pozwala na dość złożone odbieranie bodźców i przetwarzanie ich na poziomie optycznym a następnie odbiór ich jako wrażen obrazu, ruchu i barwy powstających w umyśle obserwatora.



Rys. 17 Schemat budowy oka ludzkiego. Opracowanie własne z wykorzystaniem elementów graficznych BioRender.com na podstawie licencji akademickiej.

Siatkówka (ang. retina) w tylnej części oka zawiera wrażliwe na światło komórki – pręciki i czopki. Przetwarzana informacja o barwie jest wynikiem reakcji trzech rodzajów czopków na różne zakresy długości fali, niemniej cały proces jest znacznie bardziej skomplikowany [7,66]. Długofalowe czopki reagują z wysoką czułością na zakres promieniowania elektromagnetycznego zbliżony do wartości wywołujących wrażenie czerwieni. Czopki średniofalowe analogicznie dla wartości wywołujących wrażenie zieleni, natomiast czopki krótkofalowe dla niebieskiego. Czopki uaktywniają się już przy intensywności światła powyżej 3 cd/m^2 , niemniej realne widzenie fotonowe, czyli barwne osiągamy zwykle w świetle o intensywności powyżej 10 cd/m^2 . Pręciki odpowiadają za widzenie w słabszym świetle, pozwalając na tak zwane widzenie skotopowe. Intensywność bodźca przy którym widzenie barwne przechodzi już w ten rodzaj widzenia to około $0,001 \text{ cd/m}^2$ [67]. W literaturze można znaleźć informacje, że widzenie

skotopowe, pozwala dostrzec kształty, ale bez możliwości odróżniania barw, natomiast nawet przy ograniczonych źródłach światła to, co dostrzegamy nie zawsze jest bezbarwne [68]. Jako etap pośredni pomiędzy widzeniem fotopowym a skotopowym definiujemy widzenie mezopowe występujące przy intensywności bodźca świetlnego w zakresie około $0,001 \text{ cd/m}^2$ – 10 cd/m^2 i towarzyszące mu zjawisko zwane efektem Purkiniego [69]. Zjawisko to jest istotne szczególnie w kontekście informacji wizualnych na etapie przejściowym od zmierzchu do ciemności, a dobrym przykładem, takich ważnych choćby ze względów bezpieczeństwa informacji, są znaki i sygnały świetlne w ruchu drogowym. Oko ludzkie przystosowując się do mniejszej ilości światła staje się bardziej wrażliwe na niebieski zakres widmowy, a mniej na czerwony [70]. Obiekty czerwone wydają się bardziej ciemne, niż przy większej intensywności oświetlenia, zaś obiekty niebieskie jaśniejsze. Widzenie mezopowe dotyczy takiego zakresu luminancji, w którym zarówno czopki, jak i pręciki w siatkówce oka są aktywne.

Cały szereg impulsów i bodźców dociera do ludzkiego mózgu za pośrednictwem sieci neuronowej, a informacja o barwie jest tylko jedną z wielu rejestrowanych w procesie przetwarzania i analizowania tego co zobaczyliśmy. Potyliczny płat mózgu został określony jako szczególnie ważny dla procesu widzenia [71]. Informacje, które mogą być użyteczne są też skutecznie przetwarzane nawet jeśli nasz układ optyczny nie zarejestrował ich w pełni. Próbując zrozumieć fizjologiczne i neurologiczne aspekty postrzegania wizualnego otaczającej nas rzeczywistości, nie sposób pominąć aspektów wynikających z naszej wiedzy i doświadczenia. Czytając tekst, bez większych problemów jesteśmy w stanie zrozumieć wyraz, nawet gdy była w nim literówka, czy uchwycić sens zdania, w którym brakuje jednego wyrazu. Podobne mechanizmy funkcjonują przy postrzeganiu obrazów, w tym również obrazów wielobarwnych. Nasz mózg dość sprawnie uzupełnia brakujące informacje, korzystając z wcześniejszych doświadczeń i wiedzy [63].

Zdolności adaptacji widzenia barwnego przez człowieka do oświetlenia i otoczenia to nie tylko kwestia dostosowania się do określonej intensywności światła, jego temperatury barwowej, czy wreszcie wpływu kolorów, które nas otaczają. W otaczającej nas rzeczywistości coraz częściej jesteśmy poddawani równocześnie zróżnicowanym środowiskom wizualnym i oświetleniowym. W tym samym czasie obserwujemy ekran nawigacji i sytuację na drodze, często w zmieniających się warunkach atmosferycznych. Obsługujemy maszynę przemysłową, obserwując pracę ruchomych elementów mechanicznych w sztucznym oświetleniu i równocześnie dokonujemy korekt i operacji

na ekranach monitorów. W poligrafii porównujemy fizyczną próbkę wydruku z maszyny ze wzorem wyświetlanym na ekranie precyzyjnie skalibrowanego monitora, co stanowi realny problem w aspekcie efektywnego porównywania druku i wzoru podczas produkcji. Zagadnienie jest dość szeroko zbadane i opisane nie tylko w literaturze, ale także w stosownych normach, w szczególności w ISO 12646 i ISO 14861 [72]. Doświadczenie w środowisku poligraficznym pokazuje, że nadal wiele drukarni i wydawców preferuje fizycznie wydrukowane wzory kolorów. Takie rozwiązanie jest droższe i bardziej czasochłonne, niemniej pozwala uniknąć kilku istotnych wad korzystania z wzorów na ekranie monitora. Jednym z zagadnień do rozwiązania jest kwestia doboru oświetlenia optymalnego do oceny wydruku, są to warunki opisane w normie ISO 3664, a jej ostatnia edycja opublikowana w 2025 roku potwierdza, że wyzwania związane z oceną barwy są nadal aktualne. Najlepsze oświetlenie do oglądania wzoru koloru na skalibrowanym monitorze jest w sposób istotny różne od tego do oceny wydruków podczas regulacji koloru w trakcie produkcji. Jeśli ustawimy monitor blisko pulpitu maszyny drukującej z właściwym oświetleniem D50 o intensywności 2000 luxów, możemy odpowiednimi przesłonami próbować oddzielić ekran monitora od światła z pulpitu. Należy jednak pamiętać, że porównywanie druku z wzorem jest najbardziej efektywne wówczas, gdy mamy możliwość przyłożyć wydruk blisko wzoru i porównywać kolory patrząc na próbkę i wzór równocześnie, zatem albo monitor, albo wydruk znajdują się wówczas w oświetleniu różnym od optymalnego. Kolejnym ważnym zagadnieniem, choć dzisiaj już łatwiejszym do rozwiązania jest kwestia konieczności skalowania obrazu. Wydrukowany wzór możemy mieć rozłożony dokładnie przed sobą w formacie B1 czy nawet B0 i oceniać cały wydruk z dużej maszyny porównując go z tym wzorem, a jak wiadomo porównywanie przeskalowanego obrazu wpływa w sposób istotny na postrzeganie i ocenę kolorów. Dzisiejsza technologia pozwala na produkowanie coraz większych monitorów, jednak zapewnienie odpowiedniej powierzchni kilku skalibrowanych ekranów nadal wymaga poniesienia określonych kosztów zakupu, ich kalibracji i okresowej kontroli oraz rekalkibracji. Nie bez znaczenia jest również dokumentacja w postaci wzorów kolorów i próbek z druku. W przypadku ponownego otwarcia wzoru koloru na ekranie monitora po kilku dniach czy tygodniach mogą pojawić się zwykle różnice wynikające z dryftu kalibracji lub zmiany po skalibrowaniu do ustawień docelowych. Ewentualne porównywanie koloru na własnym monitorze przez zleceniodawcę druku wiąże się z ryzykiem różnic pomiędzy urządzeniami. Nawet w sytuacji, gdy mamy do czynienia z dwoma poprawnie

skalibrowanym urządzeniami to w określonych obszarach barwnych różnice pomiędzy nimi mogą się sumować, tym samym wydruk jest porównywany z nieco odmiennymi wzorami. Dochodzi też kwestia zaufania klientów do wzorców drukowanych oznaczonych sygnaturą certyfikacji. Taki fizyczny wzór koloru może zostać przesłany i porównany z próbką druku, dając większe poczucie pewności, że porównujemy dokładnie ten sam wzór, który był użyty do regulacji koloru podczas druku. Oczywiście zarówno wzory fizyczne, jak i te na ekranach monitorów mają swoje określone wady i zalety, dlatego tak ważne jest rozwijanie oraz doskonalenie obiektywnych metod oceny kolorów.

W literaturze dość dobrze ugruntowana jest teza o widzeniu trójkolorowym przez człowieka, niemniej wiadomo, że u części populacji występuje tetrachromatyzm. Widzenie tetrachromatyczne, czyli posiadanie i korzystanie przez obserwatora z czterech rodzajów czopków, daje w efekcie możliwość postrzegania w czterowymiarowej przestrzeni barw. W świecie zwierząt zbadano liczne przykłady widzenia w większej liczbie kanałów niż trzy, ale u ludzi uważa się to za zjawisko dość rzadkie [73,74]. W niektórych opracowaniach widzenie czterokanałowe jest postrzegane jako rodzaj wady czy anomalii w stosunku do widzenia trójkolorowego [75]. W nagrodzonym artykule Ren Ng i in. stawiają odważną hipotezę, że w społeczeństwie istnieje duża grupa ludzi (wśród kobiet może to być nawet powyżej 50%), którzy są genetycznie predystynowani do widzenia tetrachromatycznego. Badacze proponują konkretne modyfikacje istniejących systemów i rozwiązania dostosowane do identyfikowania tego zjawiska w warunkach naturalnych [76]. Lider zespołu, Ren Ng znany jest również z prac nad zastosowaniem soczewki plenoptycznej w fotografii, co w praktyce pozwala na swego rodzaju regulację ostrości obrazu post factum, na podstawie zarejestrowanych podczas wykonywania fotografii dodatkowych informacji [77]. Tego rodzaju podejście jest okupione zwiększoną znacząco ilością danych koniecznych do przetworzenia. Niemniej podobnie jak w przypadku obszernych danych hiperspektralnych, ogromny wzrost mocy obliczeniowej urządzeń, ich szybkości i dostępności zasobów niezbędnych do przechowania danych sprzyja dalszemu rozwojowi obszarów przetwarzania obrazów.

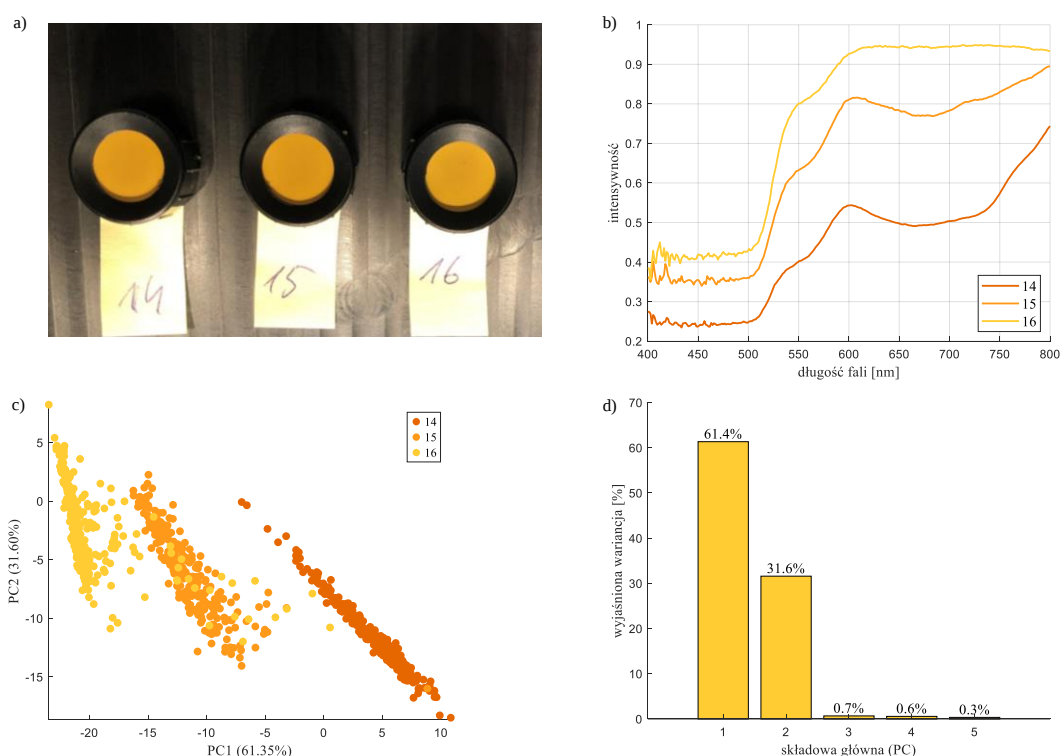
8.1 Kolory niewidmowe

Wydruk pokryty dowolnym kolorem będącym kombinacją CMYK można zmierzyć wybranym urządzeniem do pomiarów spektralnych w zakresie VIS, uzyskać intensywności sygnału dla poszczególnych długości fali i narysować wykres widma. Dla

wielu kolorów jesteśmy w stanie wyznaczyć jeden pik na wykresie i wskazać odpowiadającą mu dominującą długość fali. Ciekawym przykładem jest magenta – purpura, gdyż widmo tego koloru wykazuje na wykresie dwa piki, tym samym, nie wykazując jednej dominującej długości fali. W naszej percepcji magenta jest swego rodzaju wypadkową wrażliwości czopków L, M i S w ludzkim oku. Również bieli i czerni nie można przypisać do jednej dominującej długości fali elektromagnetycznej.

8.2 Czy ocena instrumentalna barwy druku zastąpi wizualną?

Na indywidualny odbiór barwy wpływa w różnym stopniu szereg czynników, których precyzyjne skwantyfikowanie i kontrolowanie jest niesłychanie trudne do wykonania. Pomimo świadomości licznych wad i ograniczeń wynikających z oceny barwy poprzez percepcję wzrokową wydaje się, że przy projektowaniu grafiki katalogów czasopism czy opakowań to odbiór twórcy i jego poczucie estetyki pozostanie decydujące



Rys. 18 Test Farnsworth'a-Munsella a) trzy sąsiadujące kapsle z kolorowymi próbkami, b) uśrednione widma trzech kolorowych próbek z testu, zobrazone na wdrożonym stanowisku pomiarowym kamerą Specim FX10 i wyekstrahowane w programie TESH przygotowanym w trakcie prac badawczo rozwojowych w ramach doktoratu wdrożeniowego w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o., c) wykres pierwszego i drugiego czynnika głównego wyliczonych dla pojedynczych widm, d) odsetek wyjaśnionej wariancji dla pięciu czynników głównych i łącznie 94,6 % zmienności.

Obok badań okulistycznych potwierdzających poprawność widzenia w jego różnych aspektach, istnieją również inne, obiektywne metody sprawdzania kompetencji w zakresie odróżniania barw i odcieni.

Dla osób pracujących na stanowiskach gdzie precyzyjne rozróżnianie kolorów jest ważne przeprowadza się wstępnie i okresowo dodatkowe testy. Jednym z takich narzędzi jest test Farnsworth'a-Munsella. Zadanie polega na ułożeniu we właściwej kolejności kolorowych kapsli we wnętrzu czterech tacek, które pozwalają na swobodne przemieszczanie próbek i zmianę ich kolejności, bez konieczności dotykania ocenianej powierzchni. Po zakończeniu układania testu, tacki są zamykane i po odwróceniu ponownie otwierane.

Na odwrocie każdego kapsla z kolorową próbką jest liczba. Na podstawie kolejności liczb dokonywana jest ocena poprawności wykonania testu. Błąd ma inną wagę, gdy osoba wykonująca test pomyli kolejność kapsli o jedno miejsce niż w przypadku, gdy ustawi jeden z 85 kapsli o dwa lub więcej miejsc od właściwego. Interpretacja wyników pozwala określić poprawność rozróżniania odcieni kolorów. Oprócz indywidualnych różnic pomiędzy ludźmi, stanu zdrowia, ogólnej kondycji czy dyspozycji dnia, wyniki mogą się też zmieniać wraz z wiekiem. Po 70 roku życia zmiany w postrzeganiu barwy zwykle są już dość wyraźne [78,79].

Doświadczenie branżowe dowodzi, że w środowisku grafików czy twórców reklamy zaufanie do technologii nieustannie rośnie, niemniej to czy odwzorowanie kolorów na wydruku jest poprawne, zwykle jest weryfikowane także wzrokowo. Podczas porównywania wydruków z fizycznym wzorcem ocena wizualna również jest niewątpliwie wartościowym uzupełnieniem metod instrumentalnych. Na etapie utrzymywania stabilności procesu druku i jakości odwzorowania barwy już po uzyskaniu oczekiwanego efektu, po regulacji do docelowych nastawów, przewaga metod numerycznych i instrumentalnych jest już niepodważalna.

9. Charakterystyka wybranych urządzeń do pomiarów spektralnych

9.1 Spektrofotometry poligraficzne do oceny barwy

X-Rite Exact Advance

Spektrofotometr ręczny, który jest powszechnie stosowany w branży poligraficznej. Lekkie, przenośne urządzenie, które biorąc pod uwagę zaawansowane funkcje jest wyjątkowo łatwe w obsłudze i przyjazne dla użytkownika. Pozwala na pomiar widm w zakresie długości fali od 400 do 700 nm. Rozdzielczość spektralna 10 nm umożliwia pomiar i analizę 31 kanałów spektralnych. Jeden pomiar urządzeniem daje uśredniony wynik dla powierzchni znajdującej się w obszarze okrągłego oczka pomiarowego o średnicy od 1,5 do 6 mm, w zależności od wersji. Ogromną zaletą jest możliwość uzyskiwania i eksportowania wyników dla kilku funkcji jednocześnie, np. pomiar widma, pomiar wartości L^* , a^* i b^* w jednym z kilku trybów pomiarowych (M0, M1, M2, M3), a także różnica barwy ΔE , gęstość optyczna (ang. density) i inne. Producent zapewnia zgodność urządzenia z normą ISO 13655 [37]. Pojedynczy pomiar trwa mniej niż 1s. Podczas pomiaru istotne jest zachowanie czystości mierzonej próbki. Pomiar przeprowadza się na stabilnej równej powierzchni, a także stosuje jednolite pod względem barwy podłoże. Jest to szczególnie ważne dla próbek o niskim stopniu nieprzezroczystości, jakimi są zwykle wydruki wielobarwne na papierze o gramaturze poniżej 60 g/m². Zaletą urządzenia jest zintegrowane oświetlenie i stosunkowo niewielki wpływ światła z otoczenia na wyniki pomiarowe. Kalibracja urządzenia odbywa się automatycznie na wbudowanym wzorcu bieli w cyklach wymuszanych przez oprogramowanie sterujące.

a)



b)



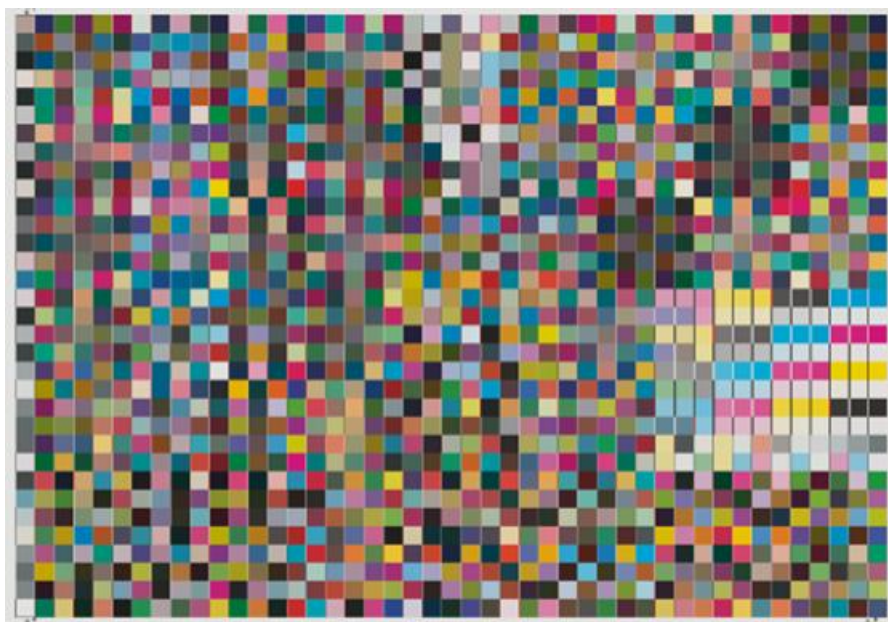
Rys. 19 Spektrofotometry: a) Exact firmy X-Rite, b) Spectrodens firmy Techkon.

Techkon Spectrodens

Bliskim konkurentem Exact'a jest Techkon Spectrodens, a większość elementów jego specyfikacji pokrywa się z urządzeniami Exact, zależnie od edycji i wersji. Ciekawostką i istotną różnicą jest możliwość samodzielnej wymiany oczka pomiarowego przez użytkownika. Zatem możliwa jest zmiana średnicy na przykład z 3 mm na 1,5 mm bez konieczności skorzystania z innego urządzenia. Pozwala to na pomiar mniejszych pól testowych, bez ryzyka, że otrzymamy nieprecyzyjny wynik z powodu nie trafienia we właściwe pole testowe. Tu warto przypomnieć, że dobór wielkości analizowanej powierzchni wynika nie tylko z aktualnych potrzeb, czy wprost z wielkości pól testowych, ale także z zaleceń właściwej normy ISO [37].

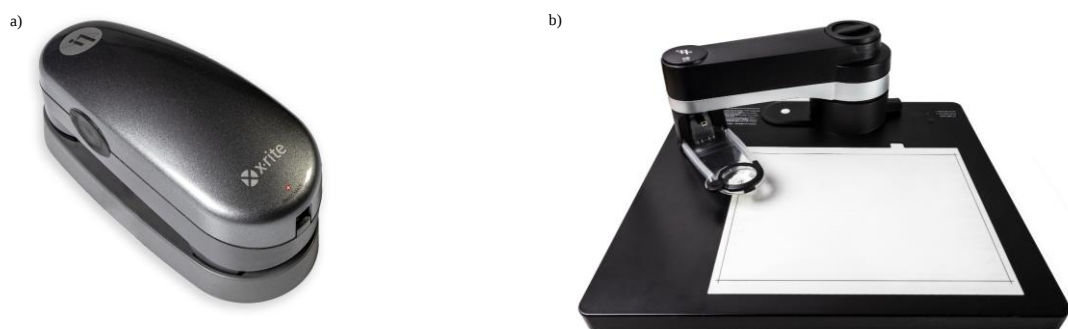
X-Rite i1&iO

Spektrofotometr i1 w połączeniu z elektrostatycznym stołem pomiarowym, prowadzony przez zintegrowane ramię, pozwala na pomiar różnych konfiguracji pól testowych. Podczas jednego cyklu zmierzony może zostać zarówno prosty wzornik, składający się z kilkudziesięciu pól testowych pasek pomiarowy, jak i plansze zawierające ponad tysiąc różnych pod względem barwy próbek.



Rys. 20 Grafika testowa zbudowana z 1485 barwnych pól kontrolnych.

Należy pamiętać, że do skutecznego wykonania automatycznych pomiarów niezbędne jest przygotowanie próbek zgodnych ze specyfikacją urządzenia. i1 może też być użyty niezależnie od modułu pomiarowego iO, podobnie jak inne spektrofotometry do pomiaru barwy, a także do weryfikacji oświetlenia i jego zgodności z normą [45]. Urządzenie może zostać zastosowane również do kalibracji monitora.



Rys. 21 a) Spektrofotometr i1 firmy X-Rite, b) stół pomiarowy iO firmy X-Rite z elektrostatyczną powierzchnią, zapewniającą stabilność próbki podczas pomiaru i z ruchomym ramieniem.

X-Rite IntelliTrax pozwala na pomiar skanujący wcześniej zdefiniowanej konfiguracji pól pomiarowych. Jego parametry zbliżone są do Exact'a, lecz wyższą wydajność pomiaru uzyskujemy kosztem niższej dokładności.



Rys. 22 Spektrofotometry do pomiaru pasków testowych zbudowanych z pól kontrolnych w trybie skanującym: a) SpectroDrive firmy Techkon, b) IntelliTrax firmy X-Rite.

Urządzenia skanujące bywają używane w konfiguracji tak zwanych „semi color closed loop”. W odróżnieniu od zamkniętych pętli koloru, pomiar odbywa się przy maszynie drukującej. Po zmierzeniu pobranej wcześniej próbki, wyniki pomiaru gęstości optycznej pól stuprocentowych kolorów podstawowych CMYK są przesyłane do konsoli maszyny. Korekta następuje jednocześnie dla wszystkich kluczy barbowych CMYK. Cykl jest powtarzany aż do uzyskania zdefiniowanego celu, uwzględniając zadaną tolerancję. Techkon SpectroDrive działa w sposób analogiczny do urządzenia IntelliTrax, niemniej, co warto odnotować, arkusz lub składkę można zmierzyć również w połowie formatu – wsuwając papier pod sensor. Konstrukcja urządzenia X-Rite nie pozwala na taki pomiar. Do pomiarów widm i analizy kolorów mogą zostać użyte również niektóre spektrofotometry laboratoryjne. Urządzenia z tej kategorii pozwalają na pomiar różnorodnych próbek, w tym cieczy i substancji sypkich. Oferują wysoką dokładność i powtarzalność, wymagają jednak odpowiedniego przygotowania próbek. Pozwalają na analizę absorbancji, transmitancji i reflektancji. Wyniki pomiaru mogą zostać przeliczone na wartości L^* a^* b^* .

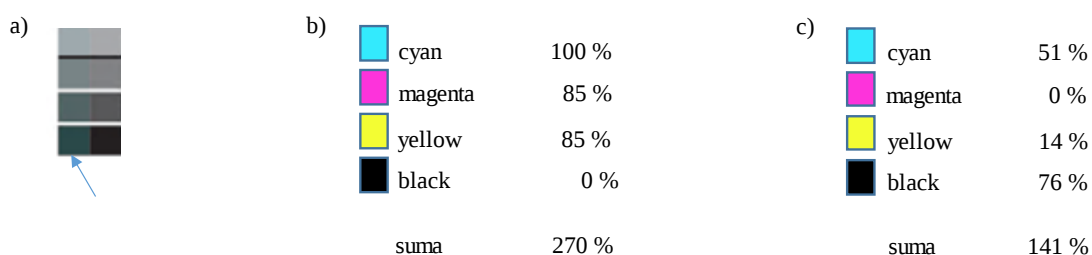


Rys. 23 Spektrofotometr laboratoryjny Thermo Scientific™ Evolution™ o rozdzielczości spektralnej 1 nm i zakresie spektralnym UV-VIS od 190-1100 nm.

W przypadku pomiaru próbek poligraficznych może być konieczne wycięcie niewielkich fragmentów, co w przypadku produktów poligraficznych ogranicza zastosowanie urządzeń tego rodzaju do celów naukowych.

10. Produkcja poligraficzna na przykładzie druku offsetowego, wstęgowego

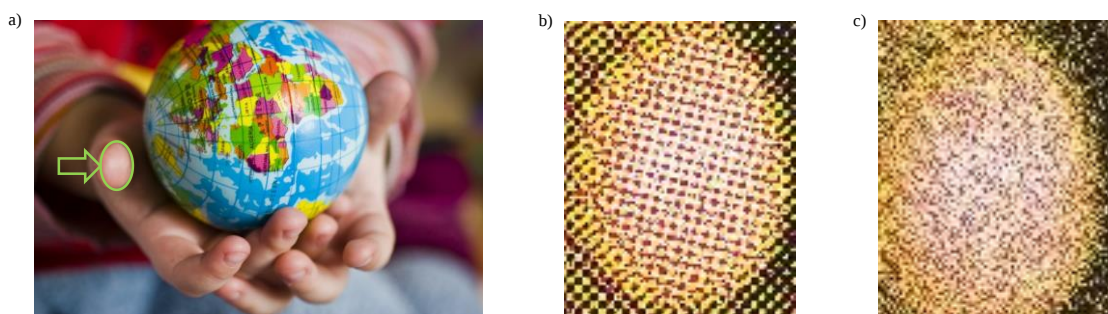
Jako początek produkcji możemy zdefiniować kilka kluczowych momentów, ale niewątpliwie żaden proces się nie rozpocznie przed przysłaniem przez klienta materiałów, treści produktu – czyli plików do druku. Strony katalogu bądź czasopisma, przygotowane w zgodnej ze specyfikacją formie w postaci plików PDF (ang. Portable Document Format), są umieszczane przez klienta na przeznaczonej do tego platformie webowej. To jeszcze czas na aktualizacje, ostatnie korekty, wymianę pojedynczych stron czy nawet wymianę treści okładki. Krytycznym momentem pod względem harmonogramu jest etap akceptacji przez klienta plików do produkcji. Od teraz zegar odmierza czas na realizację produktu, a pracownicy działu przygotowalni (ang. Prepress) rozpoczynają operację na plikach. Strony czasopisma podlegają procesom standaryzacji i normalizacji przed wykonaniem form drukowych. Do tych etapów zalicza się między innymi powszechnie stosowana redukcja składowych CMY i zastępowanie ich odpowiednią ilością black (ang. Gray Component Replacement, GCR). Jest to metoda wykorzystywana w druku offsetowym, który najczęściej opiera się na czterech separacjach barwnych zbudowanych ze składowych CMYK. Zmniejszanie ilości składowych CMY i uzupełnienie większą ilością black pozwala poprawić stabilność druku i kontrolę przejść tonalnych. Nie bez znaczenia jest też fakt, że po przetworzeniu plików suma składowych CMYK jest niższa, a farba black jest tańsza, co pozwala nie tylko na bardziej stabilny, ale również tańszy druk. Technikę tą można stosować według różnych algorytmów i różnych stopni intensywności, jeśli chodzi o stopień ingerencji w składowe wyjściowe.



Rys. 24 Różnica w składowych CMYK przy redukcji CMY i zastępowaniu ich odpowiednią ilością black: a) przykładowe pole kontrolne dla szarości, b) składowe CMYK przed redukcją CMY i zastąpieniem ich odpowiednią ilością black, c) składowe CMYK po redukcji CMY i zastąpieniu ich odpowiednią ilością black.

Proces GCR bywa przedmiotem sporów i kontrowersji, które mogą wynikać albo z niezrozumienia mechanizmu działania, albo ze stosowania zbyt rygorystycznych algorytmów, które pośrednio mogą powodować obniżenie jakości druku.

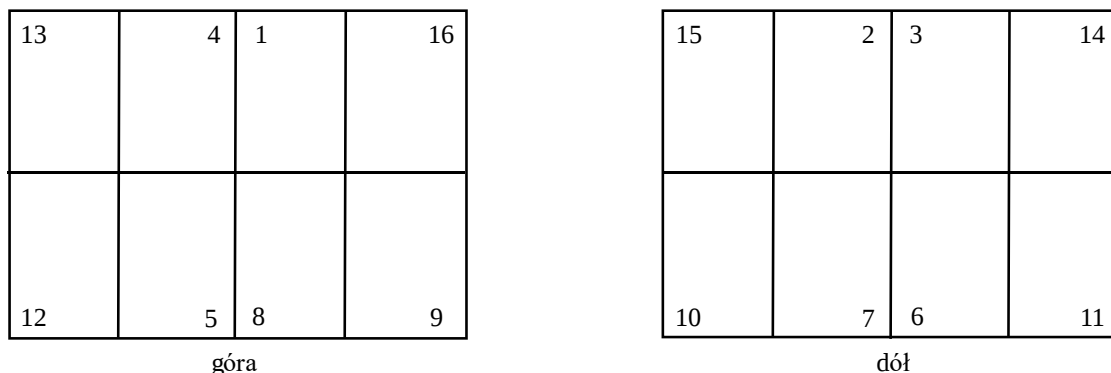
Istotnym aspektem przetwarzania plików bazowych jest rozbitcie obrazu na punkty rastra. Tonalność w druku offsetowym możemy uzyskać różnicując wielkość punktów rastra, ale zachowując stałe odległości pomiędzy nimi (ang. amplitude modulation, AM). Druga możliwość to zmienianie odległości dzielących punkty rastra. Wówczas wszystkie punkty są takiej samej wielkości. Takie rozwiązanie kwestii tonalności to raster stochastyczny, inaczej częstotliwościowy (ang. frequency modulation, FM). Raster AM określa liniatura, czyli liczba linii rastra na cal, lub liczba linii rastra na cm. W przypadku rastra FM definiujemy wielkość plamki na przykład 10 μm , 20 μm i inne. By wykorzystać zalety obu tych odmian rastrowania (AM i FM) stosuje się też rastrowanie hybrydowe. Wówczas, w ramach jednej strony mamy w jasnych obszarach rastrowych (światłach) i ciemnych (cieniach) raster FM, a w wybranym zakresie półtonów – raster AM. Wybór konkretnej metody rastrowania, a także kształtu punktów rastra wpływa również na możliwość do uzyskania rozpiętość barwną [44,64].



Rys. 25 Symulacja rodzajów rastrowania: a) wybrany fragment obrazu, b) raster AM, c) raster FM.

Część operacji na tych etapach przetwarzania plików produkcyjnych wynika wprost ze specyfikacji produktu i wytyczonej ścieżki produkcyjnej, niemniej niektóre z nich stanowią know-how firmy. Przetworzone i zmontowane w postaci gotowych impozycji pliki, są już właściwie gotowe do naświetlenia płyt offsetowych. Impozycję w tym kontekście należy rozumieć jako gotowy układ stron dla danej formy drukowej z uwzględnieniem kolejności stron, formatu brutto, złamów (niem. falz), kompensacji wypychania stron w oprawie szytej, czyli tzw. push-out'ów, a w oprawie klejonej naddatku na frez, czyli fragment części grzbietowej składki usuwany w trakcie procesu oprawy klejonej. Prosty przykład składania do docelowego formatu, czyli

złamywania arkusza papieru jest zakres 16 stron formatu A4, by otrzymać taką broszurę składamy trzykrotnie arkusz formatu A1 z uwzględnieniem stosownego naddatku i obcinamy do formatu A4 z trzech stron, pozostawiając nieobciętą stronę grzbietową.



Rys. 26 Schemat układu 16 stron przygotowanych do oprawy szytej.

W typowym przypadku druku z CMYK kompletna forma to cztery płyty dla jednej strony odbitki i cztery dla drugiej, czyli łącznie osiem płyt offsetowych. Taki komplet pozwala realizować obustronnie druk wielobarwny, czyli taki jak w większości dostępnych na rynku czasopism i katalogów.

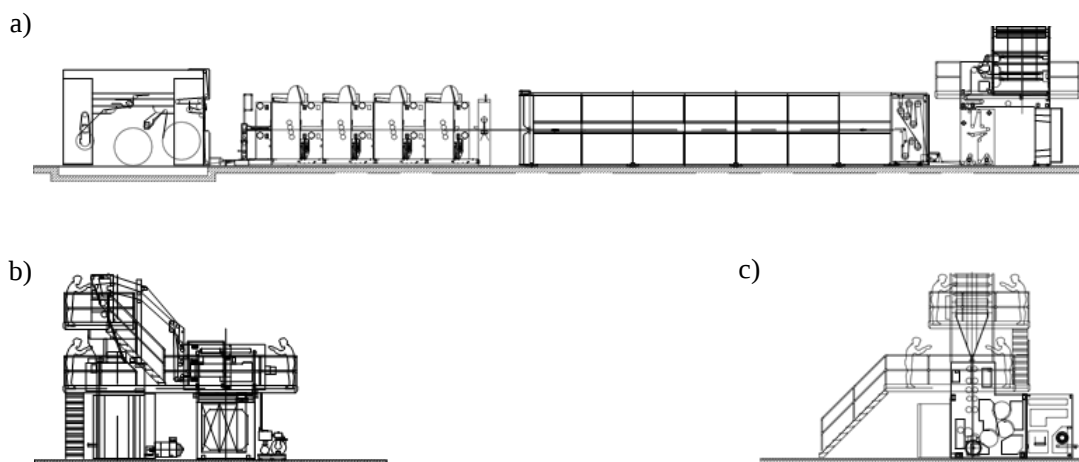
Na tym etapie powinny już być dostępne wzory koloru, jeśli zostały zamówione w drukarni lub dostarczone przez klienta. W branży poligraficznej funkcjonuje metoda odbitek próbnych, tzw. wzorów koloru, przygotowywanych wcześniej z właściwym profilem ICC (ang. International Color Consortium). Profile ICC pomagają uzyskać prawidłowe odwzorowanie kolorów podczas wprowadzania obrazów ze skanera lub aparatu i wyświetlania ich na monitorze lub drukowania. Określają one zależność między cyfrowymi zliczeniami, które urządzenie odbiera lub przesyła, a standardową przestrzenią kolorów zdefiniowaną przez International Color Consortium, opartą na systemie miar określonych na szczeblu międzynarodowym przez CIE (franc. Commission Internationale de l'Eclairage). Zatem, w przypadku profili dla każdego skanera, aparatu, wyświetlacza i drukarki, fakt, że odnoszą się one do standardowej przestrzeni kolorów, pozwala na ich połączenie. Dzięki temu możemy otrzymać właściwy kolor, gdy obrazy uzyskuje się z użyciem skanera lub aparatu, i ich wydrukowanie lub wyświetlenie. Profil ICC to taki, który jest zgodny ze specyfikacją ICC. Dzięki zgodności z tą specyfikacją profile mogą być wymieniane i poprawnie interpretowane przez innych użytkowników. Dwa główne typy profili to profile źródłowe (wejściowe) i docelowe (wyjściowe). Zasadniczo składają się one z tabel danych, które odnoszą się do współrzędnych

urządzenia ze standardową przestrzenią kolorów zdefiniowaną przez ICC. W każdym profilu zdefiniowane są różne relacje. Specjalne typy profili (ang. *devicelink* i *abstract*) są zdefiniowane dla aplikacji przepływu pracy. Wzór koloru jest weryfikowany pod względem zgodności z plikiem przeznaczonym do druku, jak również pod względem użycia właściwego profilu ICC i prawidłowej kalibracji. Kontrola odbywa się poprzez pomiar spektralny w zakresie percepcji barwy (około 400-700 nm) zestawu pól testowych (pasek kontrolny) umieszczonych w sąsiedztwie grafiki właściwej na odbitce próbnej (tzw. *proof*). Podobnie jak w przypadku kontroli druku, zakłada się, że jeśli pola testowe opisują prawidłowe wartości pomiarowe, to również grafika właściwa została zreprodukowana prawidłowo. Samo porównanie wzorca z drukiem odbywa się poprzez ocenę wizualną. Jest to metoda stosowana w precyzyjnie zdefiniowanych warunkach, odpowiednie wytyczne znajdują się w normie ISO 3664, niemniej metoda ta zawsze pozostaje w pewnym stopniu subiektywna. Wzory powstają z ostatecznej, zatwierdzonej wersji plików produkcyjnych na precyzyjnie skalibrowanych drukarkach, w oparciu o metodologię ICC z właściwym profilem, co pozwoli możliwie wiernie zasymulować jaki efekt uzyskamy w druku. Ważna funkcja wzorów koloru jest też taka, że jeśli wydawca przygotuje je odpowiednio wcześniej, ma szansę ocenić przed produkcją, czy efekt w zakresie barwy, będzie satysfakcjonujący. Jeśli nie jest zadowolony z prawidłowo przygotowanych wydruków próbnych, ma szansę dokonać korekty plików. W takim przypadku konieczne jest ponowne wykonanie wzorów koloru z ostatecznej wersji plików, to bardzo ważne zarówno dla klienta, jak i dla drukarni. Wzory wykonane z innej wersji pliku niż ta, która trafi do druku mogą skomplikować proces regulacji koloru na maszynie drukarskiej, a w razie reklamacji zgłoszonej przez klienta, mogą nie zostać uznane jako wiążący, kontraktowy wzór koloru.

10.1 Druk

Formy drukowe trafiają do hali maszyn offsetowych (ang. *Pressroom*). Ogromne maszyny wstęgowe i nieco mniejsze – arkuszowe, są już w tym momencie zaopatrzone w papier zgodny z zamówieniem dla danego produktu. Farby graficzne są dostarczane wprost do maszyn systemem rur zasilanych wydajnymi pompami z wielotonowych pojemników. Specyfika produkcji maszyn wstęgowych i dość długi czas przygotowania maszyny oraz wysoki koszt rozruchu sprawia, że stosunkowo rzadko są realizowane na nich produkcje w ilości mniejszej niż 10 tys. egzemplarzy. Rozruch dużej maszyny heatsetowej, od momentu dostarczenia papieru i formy drukowej, może trwać około

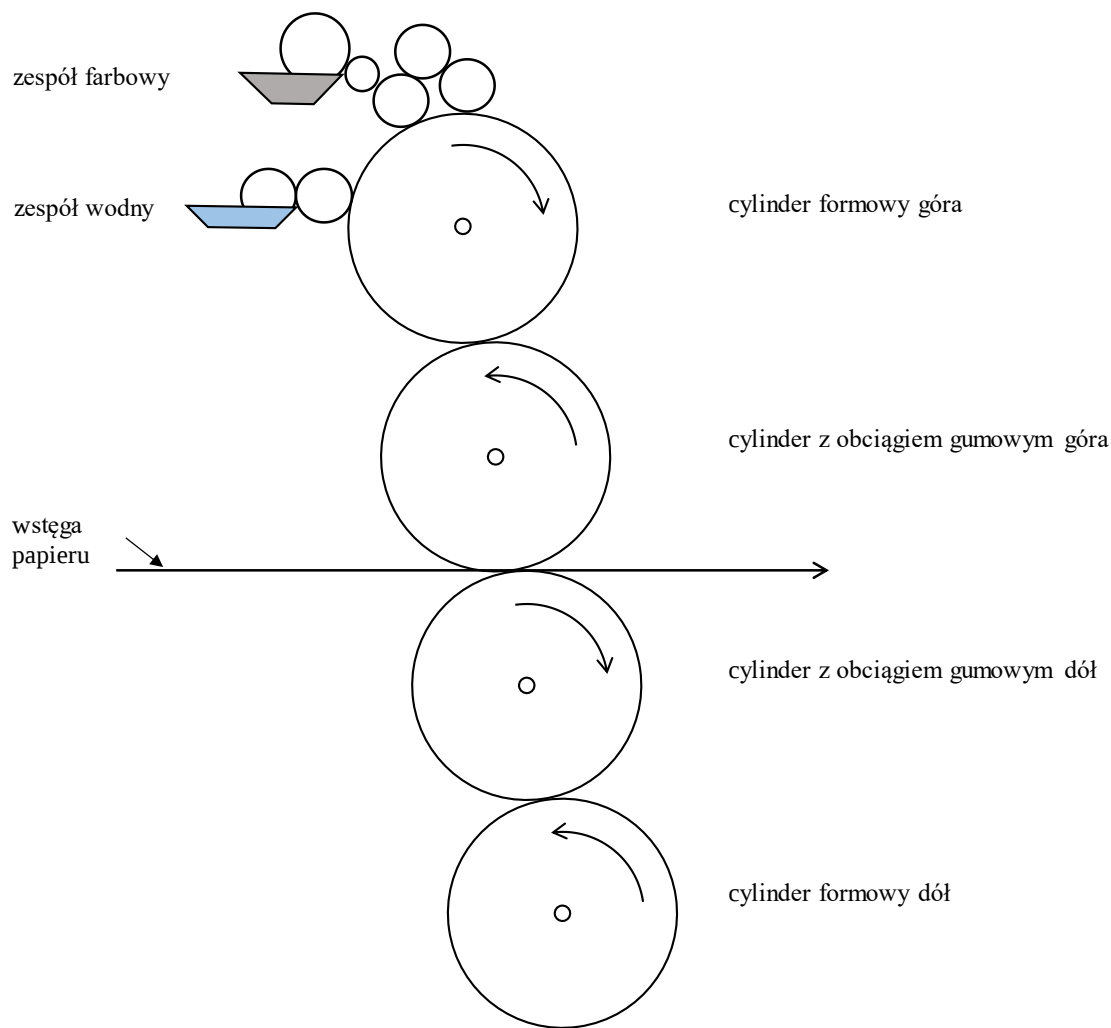
30-60 minut, w zależności od rodzaju pracy, a straty papieru niezbędne do uzyskania akceptowalnej jakościowo odbitki, to nawet kilka tysięcy odbitek makulaturowych.



Rys. 27 Rzuty maszyny offsetowej, wstęgowej: a) rzut wzdłużny maszyny, b) rzut poprzeczny złamywaka, c) rzut wzdłużny złamywaka.

Jedna forma drukowa w zależności od wielkości maszyny, pozwala na wydrukowanie z jednej odbitki 16, 24, 32, 64, a czasem więcej stron formatu A4. To oznacza, że aby wyprodukować czasopismo liczące 160 stron A4, używając maszyny, która drukuje jednorazowo 16 zadrukowanych obustronnie stron, należy wykonać 10 kompletnych form drukowych i 10 razy zrealizować rozruch maszyny dla każdej kolejnej formy, drukując najpierw pierwsze 16 stron czasopisma, potem kolejne i tak dalej. Szybkość druku typowych maszyn wstęgowych to około 30 do nawet 60 tys. odbitek na godzinę, w zależności od specyfikacji maszyny, a także od specyfiki produktu. Prędkość druku to kolejny powód, dla którego produkcje zamówień poniżej 10 tys. odbitek są rzadko realizowane na maszynach heatsetowych, czas na kontrolę tego dość skomplikowanego procesu i wprowadzanie stosownych korekt dla 10 tys. odbitek, to zaledwie kilkanaście minut. Podstawowym podłożem w druku i najkosztowniejszym komponentem produkcji poligraficznej od lat pozostaje papier. Przykładowa rolka papieru może mieć 1,5 m szerokości, 1,2 m średnicy, ważyć około 1,5 t i pozwolić na rozwinięcie blisko 25 km wstęgi papieru. Dane te mogą rzecz jasna znacząco się różnić w zależności od zamówionej szerokości i gramatury papieru, średnica jest zwykle standaryzowana. Kiedy kończy się papier z jednej rolki papieru, przy pełnej szybkości produkcyjnej, początek kolejnej rolki jest doklejany do końca poprzedniej tak, aby kontynuować nieprzerwanie

druk. Pewna ilość półproduktu z etapu doklejania trafia do kosza z makulaturą. Druk offsetowy na maszynach heatsetowych odbywa się równocześnie na obu stronach wstęgi papieru. Wstęga z rozwijaka jest prowadzona przez agregaty drukujące, papier trafia pomiędzy cylindry z obciążeniem gumowym i pod wpływem nacisku naświetlony na formach drukowych obraz zostaje przeniesiony na podłoże – zwykle papier.



Rys. 28 Schemat budowy zespołu drukującego w systemie guma-guma.

Najczęściej stosowana kolejność zadruku poszczególnych kolorów procesowych CMYK to: black jako pierwszy, jako drugi cyan, trzeci magenta i ostatni yellow. Kolejne kolory są nadrukowywane precyzyjnie na siebie z dokładnością do dziesiątych części milimetra, farba graficzna na pierwszym agregacie trafia bezpośrednio na papier, ale już na kolejnych agregatach drukujących również na nieutrwalone jeszcze warstwy farby naniesione przez poprzednie agregaty.



Rys. 29 Symulacja separacji barwnych narastająco: a) black, b) black i cyan, c) black, cyan i magenta, d) CMYK.

Całość zadruku utrwała się w temperaturze dochodzącej do 200°C, w kilkumetrowej suszarce zasilanej gazem ziemnym. Następnie już zadrukowana i utrwalona wstęga trafia na walce chłodzące. Walce chłodzące to zespół kilku cylindrów o średnicy kilkudziesięciu centymetrów, chłodzonych wodą o zadanej temperaturze. Kolejnym etapem jest opcjonalnie: wtórne nawilżanie wstęgi stosowane dla niektórych typów papierów, następnie wstęga jest pokrywana cienką warstwą roztworu silikonowego, co ogranicza elektryzowanie i zabezpiecza do pewnego stopnia zadrukowaną powierzchnię przed zabrudzeniami. Wreszcie wstęga trafia do złamywaka, gdzie jest odcinana i składana na pojedyncze ulotki, które mogą być, w zależności od zamówienia, gotowym produktem lub półproduktem – częścią większego katalogu.

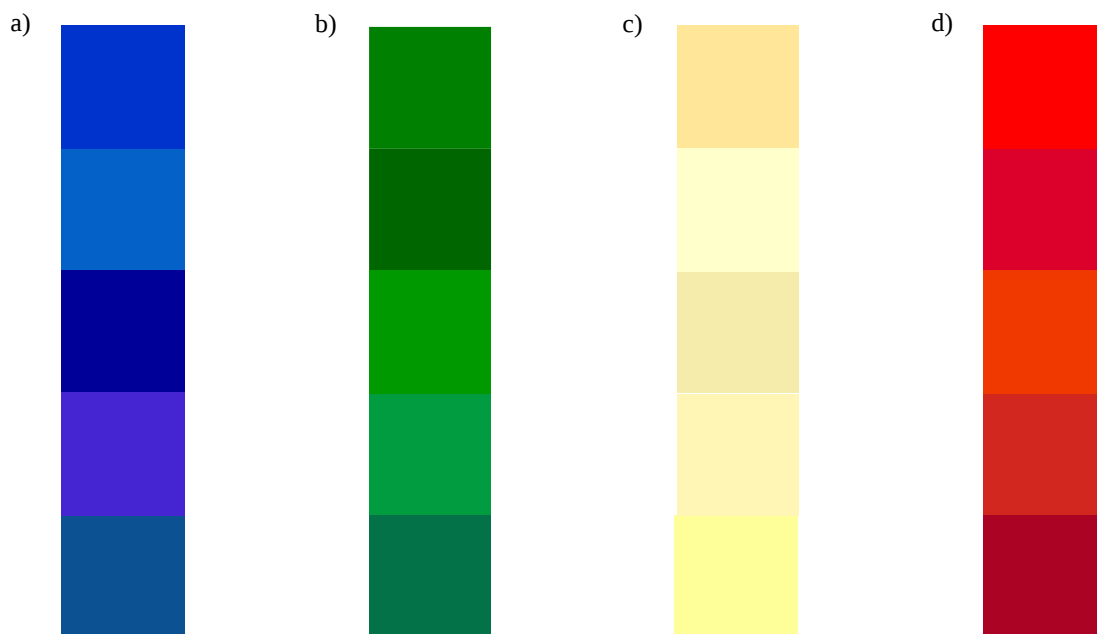
10.2 Proces regulacji, kontroli i zarządzania barwą

Oddzielnego komentarza wymaga proces uzyskiwania oczekiwanej barwy produktu drukowanego i ściśle z tym związane zadania w obszarze zarządzania barwą (ang. color management). Ciągła kontrola procesu i pomiary spektralne barwy mają z jednej strony

pozwolić na pozyskiwanie wiedzy o jakości produktu i przebiegu samego procesu. Z drugiej strony, równie istotne jest wprowadzanie zmian i korekt na podstawie zaobserwowanych trendów. Ważne, by takie korekty uwzględniały naturalną wariancję charakterystyki przyrostu punktu wynikającą z cech samego procesu i niepodlegającą korekcie. Na podstawie licznych pomiarów i obserwacji druku offsetowego, heatsetowego zmiany przyrostu punktu dla pól tonalnych 50 % w zakresie o 2 punkty procentowe, należy uznać za normalną zmienność procesu. Zatem, jeśli średnia wartość przyrostu punktu mierzonego na polu 50 % wynosi na przykład 15 %, lecz oscyluje w trakcie procesu druku w zakresie 13-17 %, można to uznać za naturalną zmienność procesu. Zmiany o 3 i więcej punktów procentowych, potwierdzone poprzez wielokrotne pomiary reprezentatywnych próbek i wykazujące trend odbiegający od wartości docelowej, podlegają korektom krzywych przyrostu punktu.

Zarządzanie barwą to także dobór optymalnych profili kolorystycznych niezbędnych do wydruku wzorów koloru. W momencie wprowadzania nowego papieru (lub innego podłoża) do druku, konieczna jest weryfikacja i ewentualna zmiana stosowanego profilu ICC. Dobór profilu dokonywany jest na podstawie pomiaru podłoża i po wprowadzeniu danych do bazy istniejących profili oraz porównania kilku najbliższych profili. W kolejnym kroku wzory koloru wydrukowane dla kilku najbliższych numerycznie profili są porównywane wizualnie z wydrukiem testowym na papierze, do którego jest dobierany profil optymalny. Ocena wizualna wykonywana jest niezależnie, przez co najmniej trzech ekspertów, w warunkach opisanych w normie ISO 3664 [45]. Do zadań zespołu należy również analiza reklamacji dotyczących koloru i jakości druku, odpowiedzi na pytania i uwagi dotyczące tego obszaru a także opinie eksperckie. Poza realizacją druku w CMYK, regularnie stosowane są kolory specjalne, najczęściej z palety Pantone. Kontrola barwy kolorów specjalnych wymaga szczególnego podejścia na kilku etapach. Po wyborze koloru przez klienta, ocenie podlega projekt graficzny i jego zgodność ze specyfikacją i zaleceniami technologicznymi. Dla fragmentów grafiki z farb specjalnych innych, niż CMYK, a szczególnie farb fluorescencyjnych i metalicznych, nie stosuje się rastrowania i przejść tonalnych, gdyż normy nie specyfikują charakterystyki

przyrostu punktu dla takich farb, zatem efekt uzyskany w druku byłby trudny do przewidzenia.



Rys. 30 Rysunek poglądowy, pokazujący wpływ zmiany rodzaju podłoża na efekt uzyskany w druku:
a) dla koloru niebieskiego, b) dla koloru zielonego, c) dla koloru żółtego, d) dla koloru czerwonego.

Oczywiście, w odpowiedzi na niestandardowe oczekiwania możliwe jest przeprowadzenie testów przedprodukcyjnych, ale to dość czasochłonne, a co za tym idzie, kosztowne rozwiązanie. Zarządzanie barwą w wielkoskalowej produkcji przemysłowej to również wprowadzenie standaryzacji i ciągła dbałość o jej utrzymanie. Z praktycznego punktu widzenia chodzi o to, by uzyskiwać wysoką i akceptowalną jakościowo zgodność produktów drukowanych na różnych maszynach, przez różne osoby znajdujące się czasami w różnych lokalizacjach. Do zadań ekspertów zarządzania barwą, obok opieki nad poprawnością działania urządzeń do druku wzorów koloru, czy analizy trendów na maszynach drukujących i wprowadzania korekty, należy także dbanie o szkolenie i rozwój zespołów odpowiedzialnych za druk, jakość i barwę. Jednym z aspektów tego podejścia, obok regularnych audytów jakościowych w obszarach produkcyjnych, jest przygotowywanie i realizacja dedykowanych szkoleń dla poszczególnych grup specjalistów. Nieco innego szkolenia oczekuje grupa specjalistów obsługi klienta, niż grupa drukarzy, czy specjalistów technicznych. Kontrola barwy to pomiary, w tym

zakresie ważna jest dbałość o sprawność i powtarzalność pomiarową spektrofotometrów, począwszy od ręcznych urządzeń pomiarowych, poprzez urządzenia półautomatyczne i listwy skanujące, aż po zamknięte pętle koloru (ang. color closed loop). Weryfikacji wymagają też obszary do przeprowadzania oceny wizualnej, kontroli spektrofotometrami podlega oświetlenie i jego zgodność z właściwą normą ISO, a także neutralność barwowa otoczenia [45]. W bliskim sąsiedztwie obszaru oceny wizualnej nie powinny się znaleźć przedmioty o intensywnych, mocno kontrastowych kolorach. Jakość produktów drukowanych i dokładność odwzorowania barwy dla wielu klientów jest na tyle istotna, że ich wizyty podczas regulacji koloru na maszynie drukującej nie należą do rzadkości. Podczas takich wizyt w obszarach produkcyjnych, obok specjalistów obsługi klienta, dodatkowym wsparciem eksperckim, fachową obsługą klienta, służą specjaliści zarządzania barwą.

11. Kontrola jakości w kontekście produkcji poligraficznej

Z całego bogactwa narzędzi, podejść, systemów i technik wypracowanych w nauce o zarządzaniu i jakości, poszczególne gałęzie przemysłu i biznesu muszą wybrać to, co w określonych warunkach skuteczne i efektywne. Wiele z wypracowanych badawczo i doświadczalnie rozwiązań ma wysoce uniwersalny charakter, ale nie mniej ważne są również te podejścia, które pozwalają sprostać specyficznym wymaganiom branżowym. Kontrolę jakości produktów poligraficznych realizujemy już dla dostarczanych surowców i komponentów [80]. W kolejnym kroku na poziomie półproduktów i produktów, ale co ważne, równolegle na poziomie poszczególnych procesów. Takie analityczne podejście pozwala sprostać wymaganiom wielu zależności procesów technologicznych i zmiennych fizyko-chemicznych wpływających na siebie wzajemnie, i na ostateczną jakość produktu. Obok jakości surowców i nastawów maszyny, na ostateczny efekt wpływają takie czynniki jak reologia farby graficznej, temperatura wewnątrz i na zewnątrz maszyny drukującej, a także właściwa aklimatyzacja papieru przed produkcją.

11.1 Podejście procesowe

Jeśli jesteśmy w stanie skutecznie kontrolować każdy kolejny proces, by zapewnić oczekiwaną jakość procesu, właściwa jakość produktu jest niejako naturalną konsekwencją uzyskania wymaganej jakości samych zachodzących kolejno procesów. Zarządzanie procesowe zatem, rozumiane zarówno na poziomie procesów biznesowych zachodzących w firmie, jak również procesów operacyjnych, pozwala na kompleksową kontrolę i doskonalenie w skali całej organizacji [81].

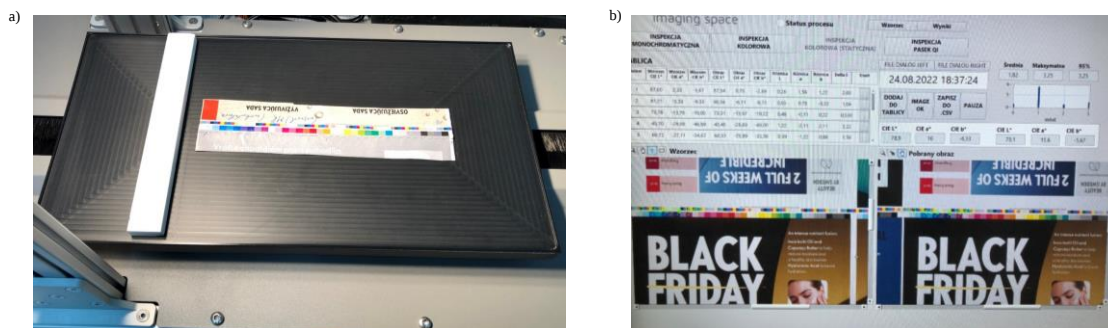
Złożoność i niejednorodność produkcji poligraficznej sprawia, że do kolejnych zamówień oraz produkcji konieczne jest mocno zindywidualizowane podejście. Jeśliby nawet przyjąć, że produkujemy wyłącznie jedną kategorię z ogromnej palety różnorodnych produktów poligraficznych, to i tak rzadko spotykamy dwa identyczne zamówienia. Przykładem może być produkcja czasopism i wydawnictw cyklicznych. Chociaż pozornie kolejny numer miesięcznika, to realizacja następnej partii produkcyjnej tego samego produktu, to w praktyce różnice są znaczące. Przede wszystkim, każde kolejne wydanie różni się treścią, a co za tym idzie rozkładem zadruku i zużyciem jednego z podstawowych surowców, jakimi są farby graficzne. Nie jest niczym niezwykłym, że kolejny numer wydawnictwa periodycznego różni się także ilością stron i nakładem, czyli

wielkością zamówienia. Różnice te mogą być na tyle istotne, że wymagają innej platformy technicznej i korekty ścieżki technologicznej. Objętość jednego wydania może pozwolić na produkcję z oprawą klejoną lub szytą inline. Zwiększenie objętości o kolejne 4, 8 lub 16 stron, może wymagać już oprawy offline, realizowanej jako osobny proces po zakończeniu druku. Takie zmiany w konsekwencji wpływają nie tylko na cenę, harmonogram, ale również na wybrane strategie kontroli jakości. Tym bardziej zasadne jest koncentrowanie się na jakości poszczególnych procesów i definiowanie wewnętrznych specyfikacji jakościowych w oparciu o ocenę procesów. Wśród parametrów podlegających ocenie w produktach poligraficznych wymienić można między innymi zachowanie wymiarowości, geometrii i kształtu. Istotny jest także właściwy poziom połysku i szorstkości powierzchni. Osobnego komentarza wymaga treść produktu, która musi spełniać nie tylko kryteria użyteczności, ale także wszelkie wymogi estetyczne. Do tej kategorii należą poprawność złamu, jakość barwy, poprawność naniesienia i intensywność zapachu na stronach zapachowych, a także jakość wszelkich zastosowanych uszlachetnień. Z długiej listy możliwych do zastosowania uszlachetnień warto wymienić, lakierowanie dyspersyjne, lakierowanie UV i laminowanie, występujące w wykończeniach błyszczących, matowych i pośrednich, a każde z takich uszlachetnień wpływa na wygląd pokrytego nim wydruku, w tym także odbiór barwy.

11.2 Zautomatyzowany monitoring i systemy wspierające decyzje

Nowoczesne, rozbudowane systemy informatyczne klasy ERP (ang. Enterprise Resource Planning) i MRP (ang. Material Requirements Planning) są już od lat standardem w dużych przedsiębiorstwach, w tym również poligraficznych. Presja konkurencji i dynamicznie zmieniające się otoczenie biznesowe powodują, że od takich rozwiązań oczekujemy coraz większej efektywności i równocześnie dużej elastyczności. Jednym z kluczowych wymogów jest przepływ informacji produkcyjnych, w tym dotyczących jakości w czasie rzeczywistym. Podstawowym narzędziem do regulacji i kontroli druku ciągle są zamknięte pętle koloru (ang. color closed loop). Do kontroli jakości grafiki i oceny barwy szczególnie efektywne są systemy wizyjne. Monitorowanie wzrokowe jakości druku w trakcie procesu na wstędzie jest niewykonalne ze względu na prędkości druku wstęgowego – papier porusza się z prędkością nawet kilkunastu m/s. W zależności od rodzaju drukowanych produktów i treści, różna jest też waga ewentualnych błędów. Niedokładnie wydrukowany odcień w reklamie to potencjalne

straty finansowe i wizerunkowe dla firmy i klienta, z kolei brak jednej kropki lub przecinka w informacji o dawce leku, może skutkować niebezpieczną dla zdrowia pomyłką. Rejestracja obrazu online z pędzącej wstęgi zadrukowywanego papieru to ogromne ilości danych do przetworzenia, niemniej wdrażanie takich rozwiązań i ich stosowanie znajduje solidne biznesowe oraz praktyczne uzasadnienia. Oferowane na rynku systemy radzą sobie skutecznie z kontrolą jakości niezadrukowanego papieru przed zadrukiem. Dostępne rozwiązania i algorytmy pozwalają także na wykrywanie błędów w druku, rozumianych jako różnice treści i grafiki [82,83]. Istnieją również systemy pozwalające na statystyczną i cykliczną, opartą o pomiar spektralny, kontrolę barwy online w druku wstęgowym o skali przemysłowej [84]. Rozwiązanie firmy BST Elexis Company, będące efektem współpracy z X-Rite, pozwala na kontrolę homogenicznego pola pomiarowego o minimalnych wymiarach 5×5 mm. System działa w oparciu o głowicę Mondrian firmy X-Rite i pozwala na pomiar w zakresie 380 – 730 nm z rozdzielczością spektralną 10 nm do prędkości 16 m/s. Niemniej, ciągła analiza hiperspektralna całości obrazu pędzącej z prędkością kilkunastu m/s wstęgi ciągle pozostaje wyzwaniem.



Rys. 31 Kontrola druku pod względem barwy: a) próbka na ruchomym stole kamery hiperspektralnej w laboratorium Instytutu Chemii Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach b) prototyp systemu kontroli i analizy obrazu zrealizowany w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o. w ramach projektu: Platforma zintegrowanego zarządzania, planowania i sterowania procesami logistycznymi w przedsiębiorstwie produkcyjnym z wykorzystaniem cyber-fizycznych systemów, grant realizowany w okresie 2018–2022, finansowany ze środków NCBiR, POIR.01.01.01-00-0458/18, wartość projektu: PLN 25 289 158.34, wartość dofinansowania NCBiR: PLN 15 882 915.94.

11.3 Bezpośrednia kontrola jakości półproduktów i produktów gotowych

Obok podejścia procesowego oraz analizy i archiwizacji próbek z systemów wizyjnych, ciągle powszechnie są stosowane metody cyklicznego pobierania i archiwizowania fizycznych próbek półproduktów i produktów, w oparciu o idee wywodzące się jeszcze z założeń kart Shewarta [85]. Wykresy zmienności procesu pozwalają na monitorowanie jakości i wprowadzanie korekt w sytuacji przekroczenia założonych tolerancji. Podczas druku offsetowego, wstęgowego w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o. pobierane są i sygnowane stosownymi informacjami wydrukowane odbitki. Na początku procesu dokonywana jest dokładna kontrola półproduktu pod względem geometrycznym. Pojedyncza odbitka zostaje docięta do docelowego formatu netto, zdefiniowanego dla danego produktu. Po docięciu odbywa się kontrola. Zweryfikowana zostaje między innymi zawartość pod względem treści, grafiki i kolejności stron. Zostaje sprawdzona również właściwa geometria i umiejscowienie elementów graficznych przechodzących ze strony na stronę w odniesieniu do stron rozkładowych. Na tym etapie istnieje możliwość wykrycia na przykład tabeli zajmującej dwie strony, której wiersze na jednej stronie nie schodzą się precyzyjnie, w sensie geometrycznym, z tymi na kolejnej. Odbitka docięta zostaje zestawiona z odbitką w formacie brutto pobraną z maszyny drukującej i opisana stosowną kartą informacyjną, tak zwaną kartą „Format ok”. Równolegle trwa już druk i regulacja pasowania separacji CMYK, precyzyjne korekty złamów i regulacja koloru. Po osiągnięciu akceptowalnych, zgodnych ze specyfikacją nastawów maszyny odkładana zostaje kolejna odbitka i opisana kartą informacyjną „Pierwsza akceptowalna”, na tym etapie potwierdzone zostają dodatkowo: poprawność pasowania, a także kolorystyka, w tym zgodność kolorystyczna stron rozkładowych wewnętrznych i zewnętrznych, to znaczy takich wydrukowanych wcześniej lub równolegle na innych maszynach drukujących. W trakcie druku ciągle trwa precyzyjna regulacja kolorystyki, ocena wizualna z wzorcem i kontrola zgodności parametrów druku z wytycznymi technologicznymi i właściwą dla danego produktu specyfikacją. Kolejnym ważnym momentem jest zaakceptowanie odbitek o optymalnej kolorystyce pod względem uzyskanych parametrów druku i możliwie wysokiej zbieżności wizualnej ze wzorem koloru. Takie odbitki zostają sygnowane kartami informacyjnymi „Kolor Ok”. Podczas druku regularnie odkładane są odbitki kontrolne opisane również stosownymi kartami informacyjnymi. Odbitki kontrolne są dodatkowo sprawdzane przez pracowników kontroli jakości, a następnie starannie pakowane i archiwizowane. Częstotliwość odkładania odbitek kontrolnych jest zdefiniowana w zależności od wielkości całego

zamówienia. Przykładowe próbkowanie dla druku offsetowego wstęgowego to pobieranie próbki nie rzadziej, niż:

- 1 odbitka co 5 tys. wydrukowanych egzemplarzy dla zamówień do 30 tys. egzemplarzy
- 1 odbitka co 10 tys. wydrukowanych egzemplarzy dla zamówień od 30 tys. do 300 tys. egzemplarzy
- 1 odbitka co 20 tys. wydrukowanych egzemplarzy dla zamówień powyżej 300 tys. egzemplarzy

Istnieje również szereg indywidualnych uzgodnień z klientami dotyczących specjalnych działań i procedur, z których wiele zostało wypracowanych na podstawie wieloletniego doświadczenia firmy. Wiedza i procedury z tej kategorii stanowią know-how firmy oraz należą do informacji będących przedmiotem poufnych uzgodnień z poszczególnymi partnerami biznesowymi.

11.4 Reprezentatywne miejsca grafiki

Analiza całości obrazu (grafiki, strony czasopisma) wymaga wstępnego przygotowania danych również pod względem reprezentatywności. W odróżnieniu od dedykowanych pól testowych, analiza piksel po pikselu obarczona jest określoną ilością szumów. Pierwszym krokiem jest ograniczenie analizy do pikseli quasi-homogenicznych. W kolejnych krokach istotne jest określenie wag dla analizowanych obszarów, by uwzględnić różnorodność zarówno pod względem barwy, jak i treści. Innymi słowy, jeśli na stronie jest głównie tło, czarny tekst i niewielkie logo marki w kolorze czerwonym, wynik analizy nie może być wartością średnią różnicy barwy dla wszystkich punktów (pikseli) obrazu, ponieważ przy bardzo źle odwzorowanym logo i poprawnie wydrukowanym tekście, wynik mógłby wskazywać, że cała strona jest wydrukowana poprawnie. Logiczne podejście do próbkowania pod względem jego reprezentatywności, dla strony na której znajduje się wyłącznie logo, tekst i podłoże, to podobna liczba pomiarów z każdej z wytypowanych kategorii. W przypadku stron zawierających wiele barwnych elementów graficznych, właściwym podejściem jest wybór skończonej liczby quasi-homogenicznych fragmentów z uwzględnieniem próbek ze wszystkich obszarów barwnych i tonalnych. Każdy z wybranych fragmentów powinien uwzględniać minimalne pole powierzchni zalecane do próbkowania w przypadku obrazów rastrowych [37].

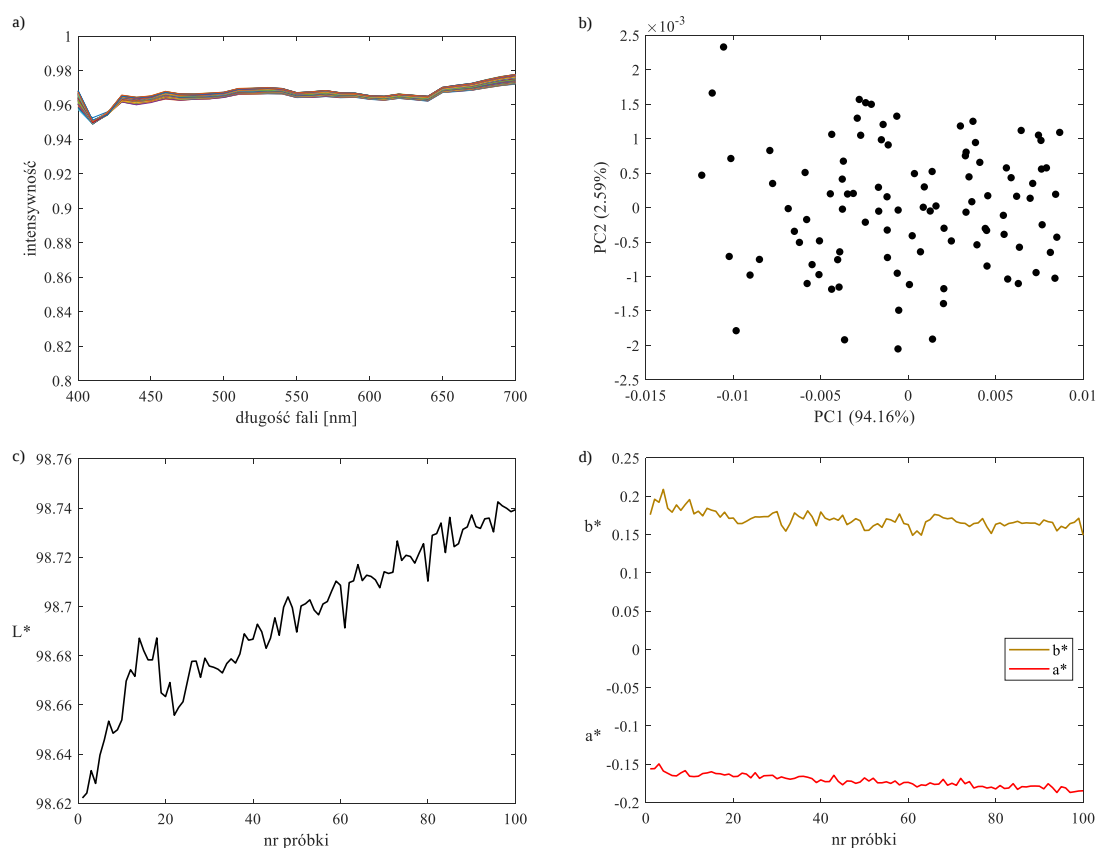
12. Eksperymenty i wyniki badań

12.1 Sprawdzenie dokładności i powtarzalności urządzenia Exact firmy X-Rite

Urządzenie Exact firmy X-Rite zostało wytypowane jako spektrofotometr referencyjny ze względu na jego powszechne stosowanie w szeroko rozumianej branży poligraficznej. Specyfikacja Exact'a i zakres dostępnych funkcji jest dostosowany do potrzeb oceny jakości produktów poligraficznych. Również doświadczenia w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o. wykazały, że spektrofotometry tego typu i tego producenta posiadają wystarczającą dokładność i powtarzalność na potrzeby kontroli procesu w produkcji przemysłowej. Do sprawdzenia powtarzalności urządzenia użyto stabilnego barwowo materiału referencyjnego, jakim jest Spectralon®. Urządzenie Exact zostało w pełni naładowane i podłączone do komputera kablem typu USB dołączonym do zestawu. Do eksportu danych użyte zostało oprogramowanie X-Rite DataCatcher, które pozwala na bezpośredni eksport danych pomiarowych do wybranych zewnętrznych aplikacji, jak arkusz kalkulacyjny czy MATLAB. Pomiar refleksyjności na powierzchni materiału referencyjnego został powtórzony kolejno 100 razy, bez przerw. Wybrane warunki pomiarowe to M0, obserwator 2°, oświetlenie D50, pomiar w zakresie spektralnym 400-700 nm przy rozdzielczości spektralnej 10 nm. Proces został przeprowadzony w warunkach biurowo-laboratoryjnych w temperaturze otoczenia 21°C. Wyniki pomiaru zostały zapisane w postaci intensywności sygnału 31 kanałów spektralnych dla każdego ze 100 pomiarów, oraz wartości L^* a^* b^* dla każdego ze 100 pomiarów. Urządzenie działa w taki sposób, że wbudowane oświetlenie włącza się tylko na czas pomiaru, zatem nie jest możliwe wstępne nagrzewanie źródła światła.

Analiza wyników wykazała wyraźny trend, który spowodowany jest prawdopodobnie nagrzewaniem się sensora pod wpływem kolejnych pomiarów, analogiczne zjawisko zostało potwierdzone również przy użyciu czterech innych egzemplarzy urządzenia typu Exact firmy X-Rite. Taki sam test urządzenia Spectrodens firmy Techkon wykazał podobny trend. W warunkach przemysłowych stukrotne powtarzanie pomiaru tej samej próbki nie jest zwykle wykonywane, natomiast wykonywanie kilkudziesięciu i więcej pomiarów różnych próbek w sposób ciągły już tak. Warto mieć wówczas świadomość, że w wyniku nagrzewania się detektora, urządzenie nie zachowuje się zgodnie z rozkładem normalnym w aspekcie błędów pomiarowych. Abstrahując od wielkości i istotności wykrytych błędów w kontekście kontroli jakości w środowisku przemysłowym, typowym i oczekiwanym zachowaniem aparatury badawczej jest

propagowanie błędów w granicach specyfikacji producenta i w ramach rozkładu normalnego. W przypadku interpretacji wyników dla osi L^* opisującej poziom jasności, byłyby to wówczas odchylenia zarówno poniżej, jak i powyżej linii trendu. Dla urządzenia Exact próba interpretacji wyniku 100 pomiarów pod względem jasności próbki skłaniałaby do błędnego wniosku, że z każdym pomiarem próbka staje się coraz jaśniejsza.



Rys. 32 Wyniki 100 pomiarów wykonanych urządzeniem Exact firmy X-Rite, a) wykres widm spektralnych, b) wykres pierwszego i drugiego czynnika głównego wyliczonych dla 100 widm, c) wykres wartości L^* z widocznym wyraźnym trendem rosnącym dla kolejnych pomiarów, d) wykres wartości a^* i b^* .

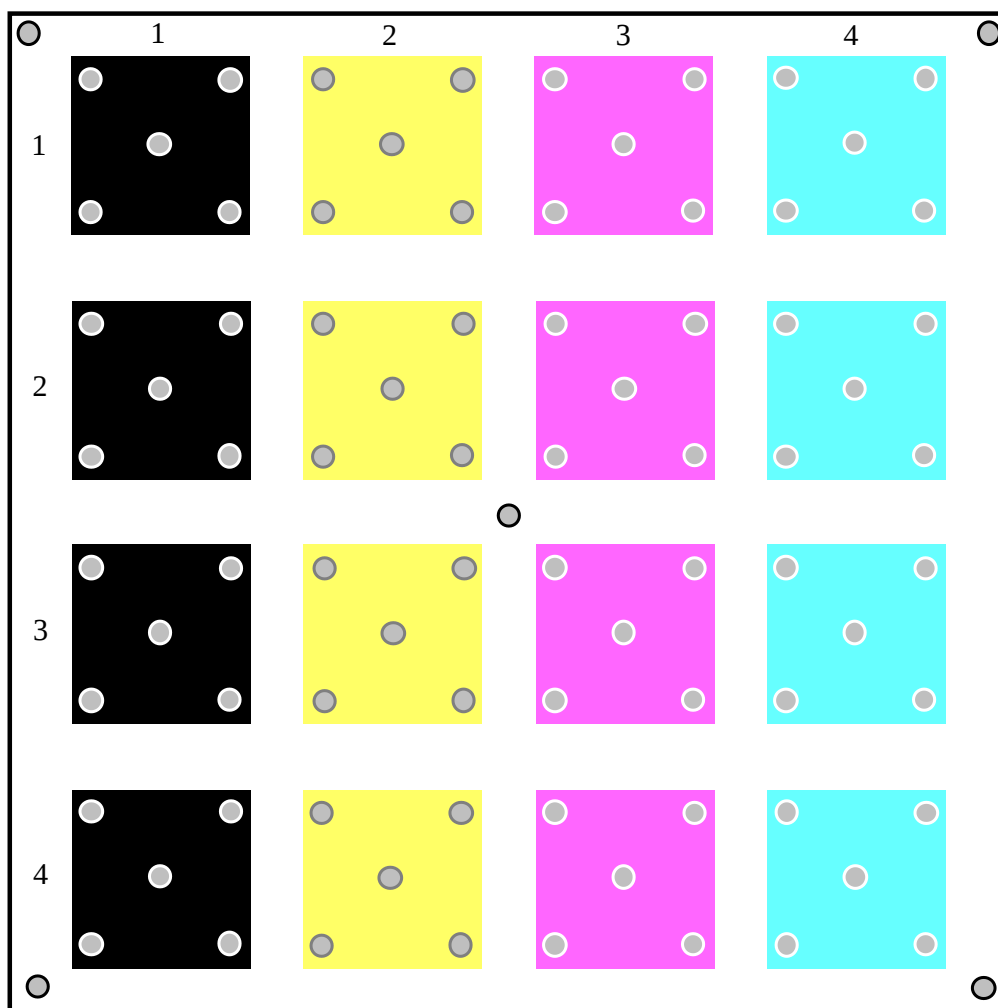
12.2 Analiza widm próbek CMYK dla wzoru koloru

Na drukarce kalibrowanej zostały przygotowane trzy jednakowe wydruki z profilem ISO_Coated_v2_eci.icc. Grafika na każdym wydruku to 16 kwadratów, 4 dla cyan i analogicznie dla pozostałych składowych z CMYK. Kwadraty zostały rozmieszczone na stronie w równomiernym układzie przestrzennym 4×4 . W kolumnie pierwszej

znajdują się cztery pola black, w drugiej cztery pola yellow, w trzeciej cztery pola magenta, a w czwartej kolumnie cztery pola cyan.

Do pomiarów użyto urządzenia Exact firmy X-Rite z aperturą o średnicy 2 mm. Parametry pomiaru to odpowiednio: warunki pomiarowe M0, iluminant D50, obserwator 2°. Uzyskano dane w postaci widm w zakresie od 400-700 nm, co 10 nm dla 31 kanałów spektralnych oraz wartości L^* a^* b^* dla 255 pomiarów.

Każdy z barwnych kwadratów został zmierzony w pięciu miejscach w uporządkowanej kolejności. Jako pierwszy został zmierzony obszar kwadratu black 1-1, znajdujący się w pierwszym wierszu i w pierwszej kolumnie na pierwszym wydruku. Pierwszy z pięciu pomiarów kwadratu black 1-1 to lewy górny narożnik kwadratu, pomiar drugi prawy górny narożnik, pomiar trzeci lewy dolny narożnik, pomiar czwarty prawy dolny narożnik i pomiar piąty środek. Drugi w kolejności kwadrat to black 2-1 zmierzony analogicznie w pięciu punktach, w takiej kolejności punktów od 1 do 5 jak w przypadku kwadratu 1-1 black. Jako kolejny został zmierzony kwadrat 3-1 black, a następnie kwadrat 4-1 black. Po zakończeniu pomiarów czterech kwadratów black na wydruku pierwszym, jako kolejne zostały zmierzone kwadraty yellow, jako pierwszy kwadrat 1-2 yellow znajdujący się w pierwszym wierszu i w drugiej kolumnie, następnie kwadrat 2-2 yellow, kwadrat 3-2 i wreszcie kwadrat 4-2 yellow. Kolejność pomiarów w ramach kwadratów yellow została wykonana analogicznie jak w przypadku kwadratów black, w pięciu miejscach dla każdego kwadratu. W następnym kroku zostały zmierzone kwadraty magenta i cyan w analogicznej kolejności jak w przypadku kwadratów black i yellow, zarówno jeśli chodzi o kolejność kwadratów, jak również w kwestii kolejności obszarów w ramach każdego kwadratu. Jako ostatnie zostało zmierzone tło wydruku, również w pięciu różnych obszarach: pomiar pierwszy tła w lewym górnym narożniku wydruku, pomiar drugi w prawym górnym narożniku, pomiar trzeci w lewym dolnym narożniku, pomiar czwarty w prawym dolnym narożniku i pomiar piąty to pomiar tła na środku wydruku. W kolejnym kroku wykonane zostały pomiary drugiego wydruku, analogicznie jak w przypadku wydruku pierwszego, a następnie pomiary wydruku trzeciego, również według zasad przyjętych dla dwóch wcześniejszych wydruków.

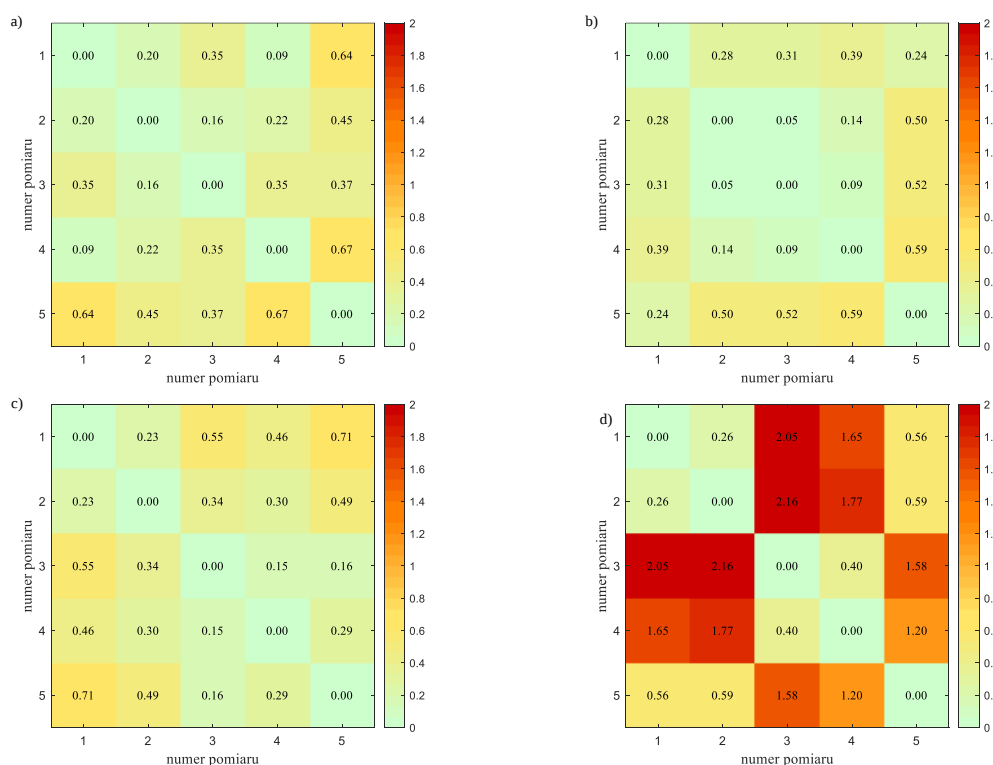


Rys. 33 Wizualizacja pojedynczego wydruku wykonanego na drukarce kalibrowanej z profilem ISO_Coated_v2_eci.icc wraz z orientacyjnym wskazaniem miejsc dla 85 pomiarów widm.

Kompletne pomiary zostały zapisane w macierzach i wektorach danych w pliku typu: nazwa.mat w programie MATLAB. Plik data.mat składa się z 3 macierzy i dwóch wektorów. Macierzy X zawierającej 255 widm w funkcji odbicia łącznie dla wszystkich zmierzonych pól pomiarowych. Macierz Y pełni funkcję pomocniczą i zawiera wskaźniki liczbowe pozwalające precyzyjnie określić każdy z wierszy macierzy X. Macierz Y zawiera również 255 wierszy. Kolumna 1 w macierzy Y definiuje numer wydruku, kolumna 2 odpowiednio kolor próbki, gdzie 1 to black, 2 – yellow, 3 – magenta, 4 – cyan a 5 to kolor tła. Kolumna 3 zawiera informacje o tym, który w kolejności kwadrat w danym kolorze analizujemy. Kolumna 4 macierzy Y pozwala określić kolejność każdego z 5 pomiarów w ramach danego barwnego kwadratu. Macierz Lab zawiera wartości L^* a^* b^* w 3 kolumnach i 255 wierszach. Wektor wav to informacja o długości

fali w nanometrach dla każdego z 31 kanałów spektralnych. Wektor d zawiera wyniki pomiaru gęstości optycznej dla każdego z 255 pól pomiarowych.

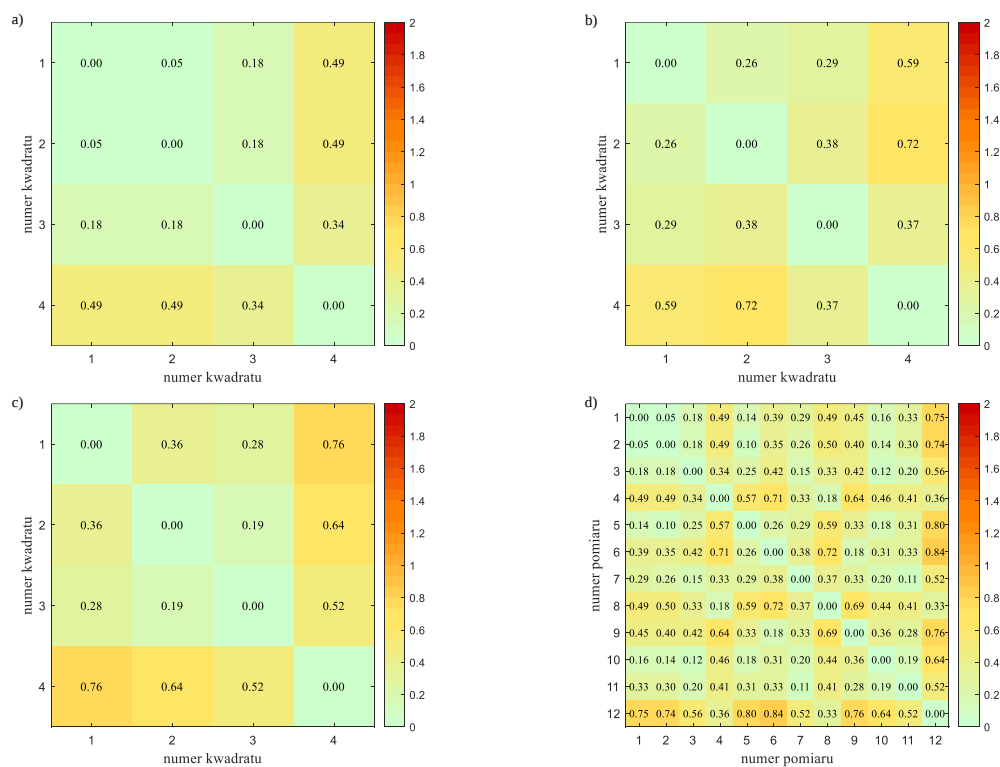
Porównanie punktów pomiarowych w ramach poszczególnych kolorów zostało wyliczone i zaprezentowane w szeregu konfiguracji, jako odległość euklidesowa pomiędzy punktami pomiarowymi w ramach jednego barwnego kwadratu na wydruku, pomiędzy barwnymi kwadratami na jednym wydruku i wreszcie pomiędzy wydrukami na podstawie danych z macierzy Lab. W pierwszym kroku porównane zostały wyniki dla black na wydruku numer 1.



Rys. 34 Porównanie różnicy barwy indykátorem odległości euklidesowej pomiędzy pięcioma punktami pomiarowymi na wydruku z barwnymi kwadratami a) black, wydruk 1, kwadrat 1, punkty 1-5, b) black, wydruk 1, kwadrat 2, punkty 1-5, c) black, wydruk 1, kwadrat 3, punkty 1-5, d) black, wydruk 1, kwadrat 4, punkty 1-5.

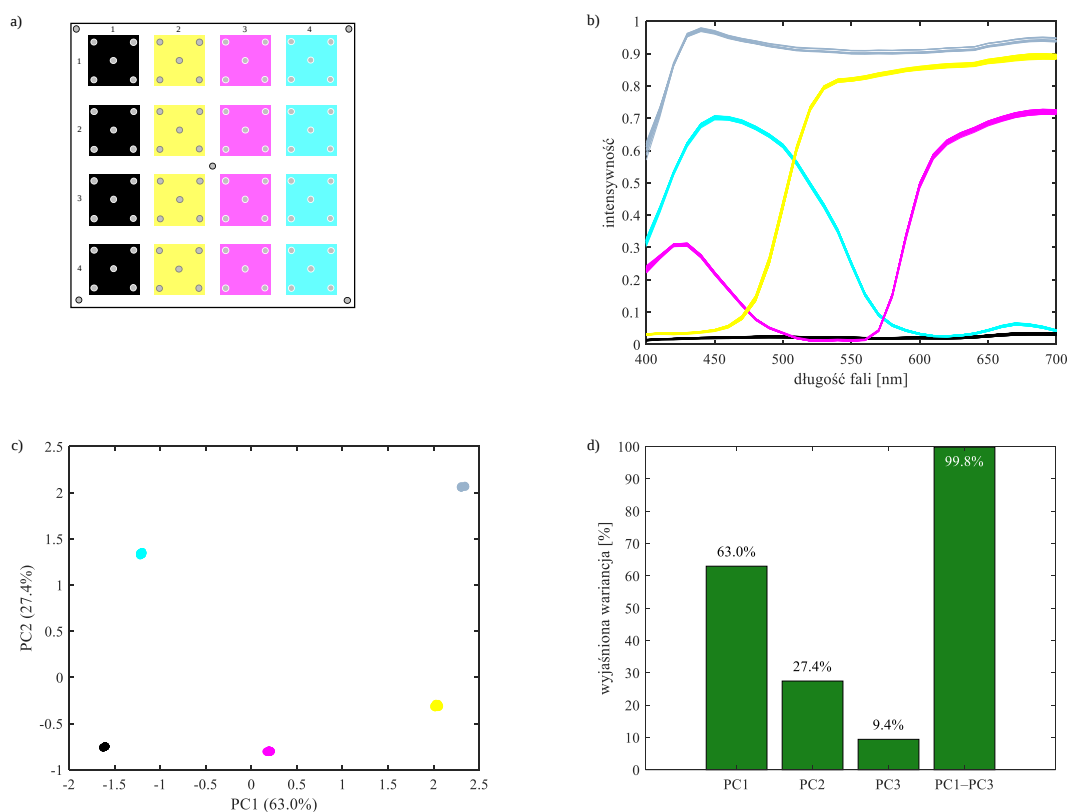
Wyniki wskazują na niewielkie różnice w spójności koloru w ramach jednego wydruku, niemniej na kwadracie 4 są one wyraźnie większe niż na kwadratach 1-3. Interpretacja różnicy barwy ΔE_{76} dla wartości L^* a^* b^* pomiędzy punktami, czyli matematycznego odpowiednika odległości euklidesowej, przyjmuje, że wynik mniejszy od 1 jest niezauważalny, a zbliżony do 2 dostrzeże tylko doświadczony obserwator.

W kolejnym kroku porównane zostały tylko środkowe pola pomiarowe na każdym kwadracie black.



Rys. 35 Porównanie środkowych pól pomiarowych black, a) wydruk 1, kwadraty 1, 2, 3 i 4 black, pola pomiarowe w środku kwadratu, b) wydruk 2, kwadraty 1, 2, 3 i 4 black, pola pomiarowe w środku kwadratu, c) wydruk 3, kwadraty 1, 2, 3 i 4 black, pola pomiarowe w środku kwadratu, d) wydruk 1, 2 i 3 zbiorczo, kwadraty 1, 2, 3 i 4 black, pola pomiarowe w środku kwadratu.

Pomiar i analiza danych przy dość niewielkim zbiorze w postaci 255 widm mogą być efektywne przy użyciu różnych metod, przewaga obrazowania hiperspektralnego rośnie wraz ze wzrostem skali, niemniej już na tym niewielkim zbiorze warto wykazać zalety nowego podejścia. Grupowanie poszczególnych widm i ich wysoką podatność na kompresję potwierdza już zbiorczy wykres intensywności sygnału w relacji do długości fali i analiza czynników głównych.



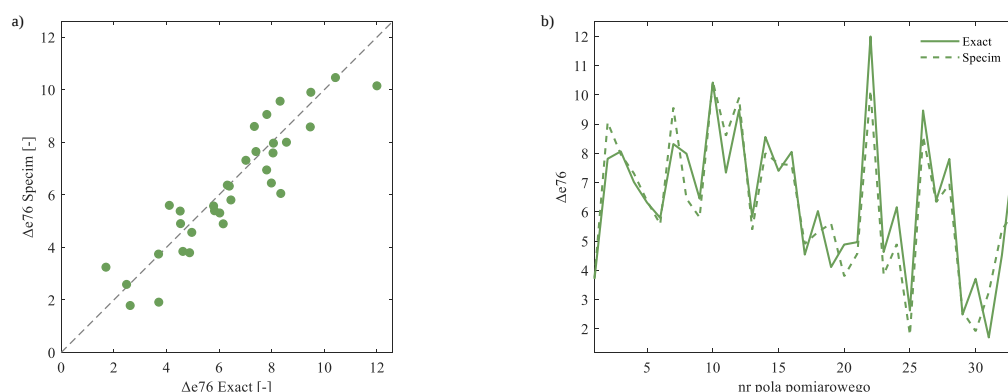
Rys. 36 Analiza wyników pomiaru 255 punktów pomiarowych: a) wizualizacja wybranych punktów pomiarowych, b) wykresy widm spektralnych, c) wykres punktowy na podstawie analizy czynników dla PC1 i PC2, d) wyjaśnienie zmienności dla PC1, PC2, PC3 i zbiorczo PC1-3.

12.3 Korelacja wyników kamery Specim i spektrofotometru Exact

Próba walidacji wyników pomiarowych wykonywanych urządzeniem Exact firmy X-Rite, podała w wątpliwość zasadność użycia wyników z tegoż urządzenia jako bazy do budowania modeli kalibracyjnych dla wyników pomiarowych uzyskanych kamerą hiperspektralną. Powodem był, omówiony już, wyraźny dryft wyników w czasie, w postaci trendu pomiarowego. Niemniej hipoteza dotycząca korelacji wyników pomiarowych spektrofotometru Exacta i kamery Specim została zbadana.

Do testów przygotowano dwa wydruki, wzór z plotera kalibrowanego i wydruk wykonany techniką druku offsetowego. Oba wydruki zawierały tę samą grafikę składającą się z kwadratowych pól kontrolnych. Z grafiki testowej składającej się z 1485 pól pomiarowych o różnych składowych CMYK do analizy wybrano jeden wiersz składający się z 33 różnych pól pomiarowych. Zarówno wydruk testowy, jak i wzór

zostały zeskanowane kamerą Specim, a następnie zmierzone spektrofotometrem Exact firmy X-Rite w warunkach pomiarowych M0. Wyniki pomiaru Exactem zostały zapisane w postaci $L^* a^* b^*$, a następnie została wyliczona różnica barwy ΔE_{76} dla każdego z 33 pól pomiarowych wzoru i 33 pól wydruku. Na podstawie wycinków z obrazu hiperspektralnego dla tych samych pól pomiarowych zostały pobrane i uśrednione widma. Zakres spektralny z kamery Specim został ograniczony do analogicznego z Exactem, czyli 400-700, a rozdzielczość spektralna do 10 nm. Następnie wyliczono $L^* a^* b^*$ z danych uzyskanych z kamery hiperspektralnej i porównano 33 pola pomiarowe wzoru z 33 polami pomiarowymi z wydruku tak, jak w przypadku Exacta, wyliczając ΔE_{76} dla każdego z 33 pól pomiarowych odpowiednio dla wzoru i wydruku. Wartości bezwzględne $L^* a^* b^*$ w sposób istotny różnią się pomiędzy urządzeniami, natomiast odległość euklidesowa pomiędzy widmami dla poszczególnych porównywanych fragmentów grafiki pozwoliła potwierdzić wysoką korelację.



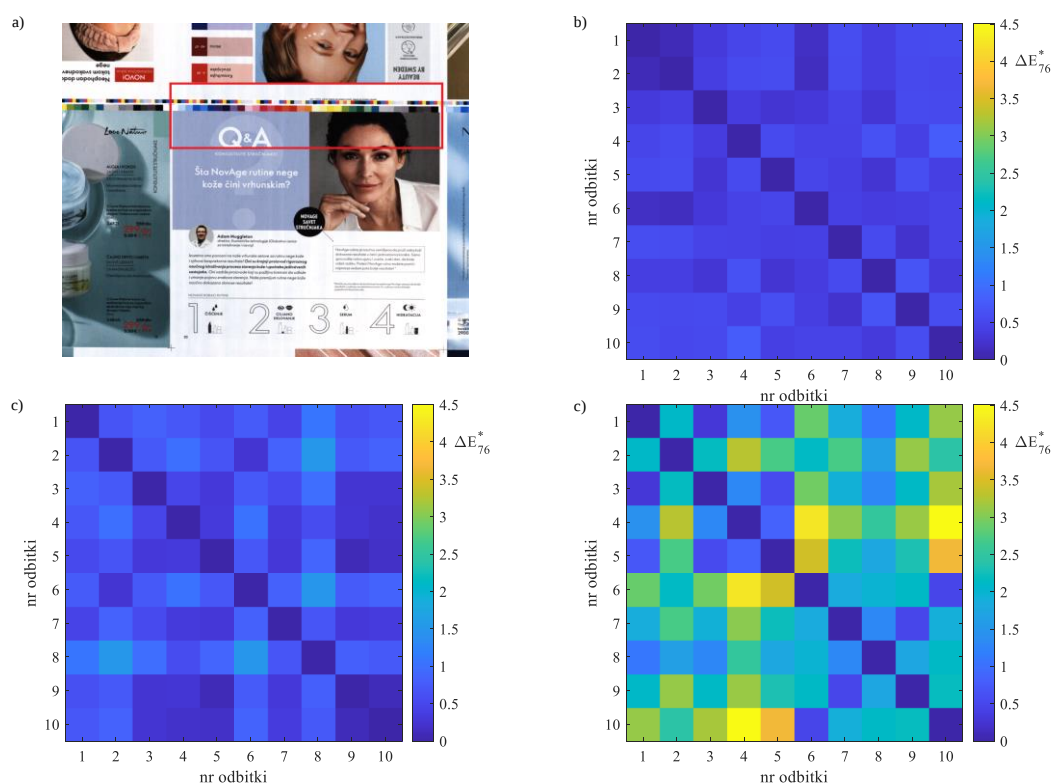
Rys. 37 Porównanie wyników pomiaru różnicy barwy ΔE_{76} pomiędzy spektrofotometrem Exact firmy X-Rite a kamerą Specim FX 10: a) wizualizacja 33 punktów dla wyników pomiarowych z linią idealnej korelacji, b) wykresy liniowe, linia ciągła Exact, linia przerywana Specim

W tym miejscu warto zwrócić uwagę na szereg różnic pomiędzy urządzeniami i co za tym idzie samą metodą pomiaru oraz wyjściowych wyników. Urządzenie Exact ma wbudowane oświetlenie, oddzielone od wpływu z zewnątrz, i bardzo małą odległość sensora od próbki, zaś sama próbka w trakcie pomiaru jest nieruchoma. Kamera pracuje w trybie skanującym nawet kilkadziesiąt cm nad próbką i w trakcie pomiaru próbka się porusza.

12.4 Charakterystyka zmienności druku offsetowego, wstęgowego

Proces druku offsetowego charakteryzuje się naturalną zmiennością wynikającą ze specyfiki samej technologii i cech surowców. Papier będący podłożem naturalnym, farby graficzne i roztwór zwilżający formę drukową podlegają też wpływowi zewnętrznym. W szczególności są to wilgotność i temperatura powietrza w otoczeniu maszyny. Temperatura elementów mechanicznych maszyny drukującej oraz zmieniająca się w wyniku zanieczyszczeń farbą i pyłem papierowym charakterystyka roztworu zwilżającego, także wymagają uwagi. Aby efektywnie i wiarygodnie diagnozować niekorzystne zmiany w procesie, należy scharakteryzować taką zmienność, która wynika z cech samego, poprawnie prowadzonego procesu, w krótkim przedziale czasowym i jest niejako jego naturalną składową.

Podczas produkcji na dużej maszynie offsetowej, heatsetowej po około 90 minutach ciągłego druku na papierze powlekany o gramaturze 60 g/m² pobrano 5 kolejnych odbitek, a po upływie 60 s jeszcze raz 5 kolejnych odbitek.



Rys. 38 Ocena stabilności druku dla wybranej kolumny na podstawie pomiaru pól testowych:
a) analizowany fragment drukowanej grafiki z paskiem pomiarowym, b) pole pomiarowe nr 11,
c) pole pomiarowe nr 29, d) pole pomiarowe nr 26.

Na każdej z 10 odbitek wykonano 37 pomiarów L^* a^* b^* dla pól kontrolnych urządzeniem Exact firmy X-Rite w warunkach pomiarowych M0.

Wynik pomiaru został zapisany w postaci macierzy danych w taki sposób, że każdy z 37 wierszy to kolejne pole kontrolne. Kolumny to odpowiednio L^*_{*1} , a^*_{*1} i b^*_{*1} w pierwszych trzech kolumnach dla pierwszej odbitki, następnie L^*_{*2} , a^*_{*2} i b^*_{*2} w kolejnych trzech kolumnach dla drugiej odbitki i analogicznie dla pozostałych odbitek. Macierz składa się z 37 wierszy i 30 kolumn, po 3 kolumny dla każdej odbitki.

Przekątna dla każdej macierzy zmienności procesu na rysunku 38 prezentuje wynik zerowy, bo dotyczy wyniku różnicy barwy pola 1-1, 2-2 i analogicznie dla kolejnych odbitek w ramach danego pola pomiarowego. Pozostałe wyniki obrazują zmienność procesu jako wzajemną relację różnicy barwy każdego z 10 pomiarów dla danego pola pomiarowego.

12.5 Efektywność przetwarzania obrazów hiperspektralnych

Jednym z kluczowych zagadnień, od którego w znacznym stopniu zależy skuteczność i zakres wdrażania metod obrazowania hiperspektralnego na potrzeby kontroli jakości w warunkach produkcyjnych, w tym automatycznej kontroli barwy, jest efektywne przetwarzanie danych hiperspektralnych. W tym miejscu warto przypomnieć fakt, że dane hiperspektralne z definicji są bardzo złożone, a ich przechowywanie wymaga niezwykle dużo pamięci i miejsca na dysku. Dostępne na rynku kamery hiperspektralne mogą z łatwością rejestrować podczas pojedynczego pomiaru (jedna klatka) setki widm, a cały obraz tworzą setki klatek. W przypadku testowanych przeze mnie dwóch liniowych kamer Specim FX 10 (jedna dostępna w Instytucie Chemii UŚ, a druga w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o. jako integralny element wdrożonego stanowiska pomiarowego), które obrazują przesuwające się pod obiektywem kamer próbki w osi prostopadłej do położenia szczeliny pomiarowej kamery, na pojedynczy pomiar składa się jednocześnie do 1024 widm, przy czym każde z nich opisuje 224 odpowiedzi detektora dla 224 niezależnych kanałów spektralnych. A zatem, tego typu tryb rejestracji obrazów będzie generował dane hiperspektralne, dla których dwa wymiary będą precyzyjnie określone, tj. rozdzielczość przestrzenna (1024 piksele – w efekcie widma) oraz rozdzielczość spektralna (224 kanały), natomiast ostateczna wielkość trzeciego wymiaru danych będzie faktycznie zależała od czasu rejestracji obrazu, co w skrajnym przypadku może polegać na ciągłym gromadzeniu widm. Zakładając, że jesteśmy w stanie przy odpowiednio dobranych ustawieniach kamery uzyskać widma o odpowiednio dobrej jakości, tj. oczekiwanym

stosunku sygnału do szumu, przyrost danych będzie warunkował wyłącznie czas obrazowania.

W toku prowadzonych przeze mnie różnych testów i eksperymentów z wykorzystaniem dwóch kamer hiperspektralnych ustaliłem, że istnieje kilka możliwych sposobów znacząco polepszających efektywność przetwarzania i modelowania gromadzonych danych hiperspektralnych. Na efektywność ich przetwarzania i modelowania wpływ ma przede wszystkim fizyczny rozmiar danych.

Zidentyfikowane przeze mnie sposoby poprawy efektywności procesu kontroli koloru w oparciu o przetwarzanie zbiorów widm hiperspektralnych to kilka grup podejść. Można je przypisać do poszczególnych etapów procesu gromadzenia i przetwarzania danych. Koncentrują się one na takich kwestiach jak:

możliwości i modyfikacje sprzętowe uwzględniające dostępny układ pomiarowy (sensor, transfer danych, obiektyw oraz źródło oświetlenia) i komputer (procesor, pamięć operacyjna i dysk twardy), odpowiedni wybór parametrów rejestracji widm za pomocą kamery hiperspektralnej w zakresach ustawień przewidzianych przez producenta (czas ekspozycji, prędkość skanowania i liczba ramek), potencjalne wykorzystanie możliwości programistycznych będących w zakresie określonego języka programowania, dobór algorytmów przetwarzania i modelowania danych, a także wskazany kierunek ich modyfikacji w perspektywie tworzenia odpowiednio szybkiego systemu eksperckiego ułatwiającego podejmowanie decyzji, w oparciu o miękkie reguły logiczne, wdrożenie filozofii obliczeń równoległych, dalsze przyspieszanie operacji matematycznych z wykorzystaniem mocy obliczeniowej kart graficznych Tesla. Należy zauważyć, że czas podejmowania decyzji przez uprzednio wyuczony system ekspercki zależy od poszczególnych operacji jednostkowych, tworzących kluczowe elementy operacyjne poszczególnych etapów, w tym rejestracji, transferu, przetwarzania i modelowania danych, które wzajemnie współzależą. Zatem, zwiększenie efektywności gromadzenia, transferu, przechowywania i/lub przetwarzania danych w każdym kroku jest bardzo pożądane, gdyż przełoży się nie tylko na szybszą możliwość podjęcia ostatecznej decyzji w oparciu o system ekspercki i odpowiednie operacje matematyczne, ale również zmniejszy ilość przechowywanych danych zarówno w pamięci RAM komputera, jak i później na różnych ich nośnikach. Niemniej jednak, moim celem była identyfikacja ścieżek usprawnień niewymagających dodatkowych nakładów finansowych, przyjmując, że z zakupionej kamery i komputera należy uzyskać maksymalną sprawność nie ponosząc dodatkowych nakładów finansowych. W kolejnych

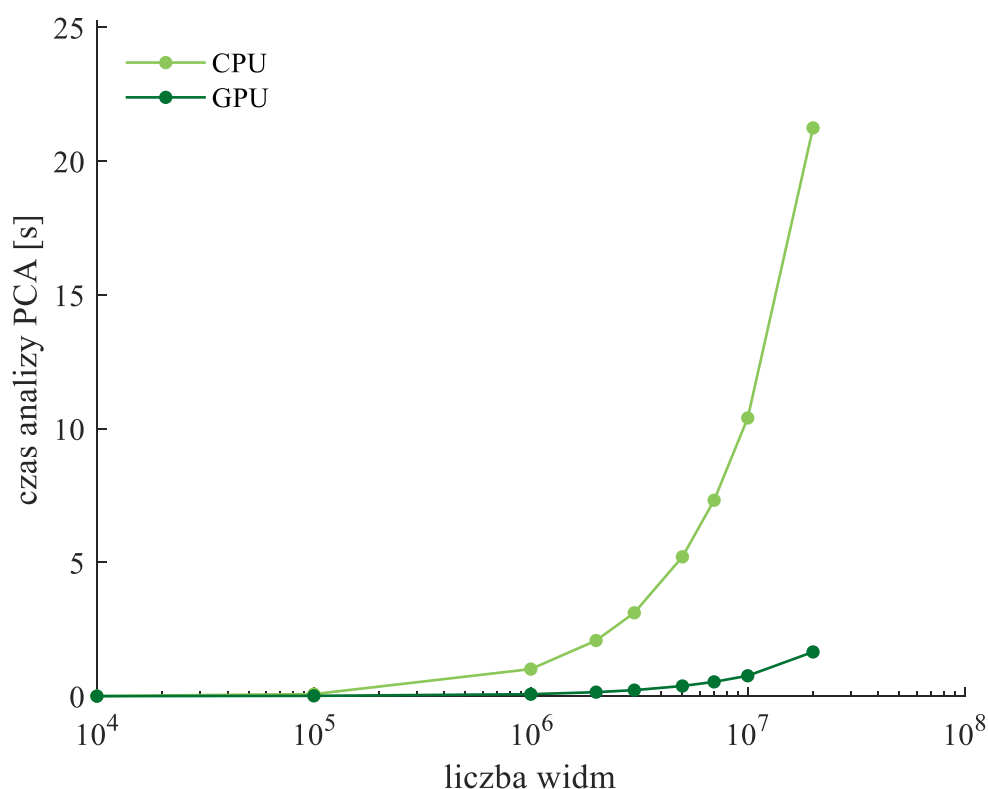
akapitach omówię pokrótce moje wnioski, które zostały zweryfikowane przez przeprowadzone niezależne testy dla odpowiednio dobranych próbek pomiarowych, w tym faktycznych próbek grafik barwnych, odnosząc się do każdego z powyżej wyszczególnionych zagadnień. Mają one bezpośrednie i praktyczne zastosowanie. To właśnie dzięki nim było możliwe zaprojektowanie i uruchomienie stanowiska pomiarowego w części produkcyjnej firmy, co stanowiło główny cel wdrożeniowy niniejszego doktoratu. Każdy układ pomiarowy, w którego skład wchodzi kamera hiperspektralna działająca jako detektor, układ transferujący dane z kamery do komputera, źródło oświetlenia, system umożliwiający przesuwanie próbek pod obiektywem kamery i komputer jako nadrzędna jednostka sterująca oraz obliczeniowa, ma określone parametry fabryczne podzespołów. Możliwości ich wymiany czy zmiany ustawień są możliwe, ale nie są nieograniczone. Wymiana niektórych podzespołów czy elementów układu pomiarowego jest możliwa, ale wymaga dodatkowych nakładów finansowych. Stąd istotne jest, aby przed dokonaniem ich zakupu precyzyjnie rozważyć cel, specyfikę i oczekiwania, którym potencjalnie ma sprostać projektowane rozwiązanie aktywnie wykorzystujące obrazowanie hiperspektralne. Aktualnie, w przypadku kamery FX10 jej użytkownik może na własne potrzeby dokonać zmiany obiektywu i w ten sposób rozszerzyć bądź zawęzić pole obrazowania, przy czym standardowa soczewka zapewnia obrazowanie odpowiadające FOV 38° (ang. Field of View). Jeśli chodzi o transfer danych z kamery do komputera, już w momencie zakupu należy zdecydować się na konkretny typ interfejsu, który jest zintegrowany z kamerą – interfejs CameraLink wraz z kartą Frame Grabber czy interfejs GigE, wykorzystujący kartę sieciową komputera, co wpływa wprost na szybkość transferu danych, przy czym oba typy interfejsów zostały przeze mnie poddane testom, które potwierdziły wnioski płynące z przeglądu literatury i konsultacji z dostawcą kamery.

W tym miejscu należy zaznaczyć, że linia kamer Specim FX10 to właściwie nowy produkt, a producent prócz podstawowego wsparcia technicznego i znajomości technicznych rozwiązań konstrukcyjnych kamery, które w znacznym zakresie są tajemnicą firmy, udziela odpowiedzi na temat wyników testów przeprowadzonych przez siebie i na własne potrzeby. Jak okazało się w trakcie moich badań, te informacje nie w pełni charakteryzują faktyczny zakres problemów napotykanym w trakcie kontroli koloru prowadzonej na potrzeby przemysłu poligraficznego, a także nie są dostępne w literaturze. Stąd było konieczne zaprojektowanie i przeprowadzenie własnych testów wydajnościowych, przez co uzyskane z nich wnioski są pionierskie.

Nie ulega wątpliwości, że wszystkie komponenty i podzespoły układu pomiarowego powinny się ze sobą nie tylko odpowiednio komunikować, ale również oferować maksymalną wydajność sprzętową. O ile producent kamery hiperspektralnej FX10 zapewnia jej dobrą integrację z modulem przesyłającym dane, stolikiem pomiarowym i oprogramowaniem sterującym, to już komputer i jego istotne podzespoły, w tym procesor, karta graficzna, pamięć operacyjna RAM i nośnik danych, a także oprogramowanie wykorzystywane do dalszych obliczeń są konfigurowane wedle uznania ich przyszłego użytkownika i jego możliwości finansowych. Niestety, nie zawsze wybór tego, co jednostkowo najwydajniejsze pod względem oferowanych parametrów, docelowo gwarantuje optymalne działanie. Niektóre kwestie sprzętowe wydają się prostsze, choć nie w pełnym zakresie. Mając na względzie bardzo duży rozmiar danych hiperspektralnych, wskazane jest zapewnienie maksymalnie dużej ilości pamięci wewnętrznej komputera, o jak najszybszym dostępie. Niemniej jednak a priori trudno powiedzieć jak dobór pamięci wpłynie na ostateczne możliwości całego układu pomiarowego. Punktem wyjścia były dosyć ogólne zalecenia przedstawiciela firmy QuantumDesign GmbH będącego dystrybutorem Specim w Europie, dotyczące doboru konfiguracji stacji roboczej, nie udało się jednak znaleźć potwierdzenia w postaci realnych testów wydajnościowych, ani testów dotyczących stabilności pracy dla przykładowych konfiguracji i zestawów sprzętowych. Rekomendacje przedstawiciela Specim, to 8 GB pamięci RAM lub więcej, procesor Intel i7, klasy równoważnej bądź wyższej i 2 dyski typu SSD, by zapewnić oddzielny dysk do zapisu danych hiperspektralnych. Mając na uwadze brak potwierdzonych testów wydajnościowych, przy doborze konfiguracji sprzętowej priorytetowa była możliwość ewentualnej późniejszej rozbudowy i skalowania wydajności. W efekcie wyjściowa pamięć RAM przewidziana w konfiguracji wdrożeniowej to 16 GB pamięci typu DDR5 o taktowaniu 4800 Mhz, ale z uwzględnieniem rozwiązań RDIMM (ang. Registered Dual In-Line Memory Module) oraz ECC (ang. Error-Correcting Code), zapewniających stabilność pracy układu i dokładność przetwarzanych danych.

Prowadzenie obliczeń na późniejszym etapie dla danych hiperspektralnych stanie się w znacznym stopniu szybsze, jeśli procesor komputera będzie miał wysokie taktowanie i zapewniał wielowątkowość, tzn. będzie miał kilka rdzeni, a także podręczną pamięć, do której dostęp jest bezpośredni (w odróżnieniu od pamięci RAM). Wielordzeniowość procesora może być niezwykle pomocna, nie tylko aby przeprowadzić wymagane obliczenia znacznie szybciej niż przez procesor z jednym rdzeniem, ale również otwiera

możliwość jednoczesnego prowadzenie kilku operacji matematycznych, tzw. obliczenia równoległe, o ile zastosowany pakiet obliczeniowy je zapewnia. Dodatkowym wątkiem, i zupełnie nowym w obszarze obrazowania hiperspektralnego, jest wspieranie obliczeń poprzez specjalny typ kart graficznych. Już użycie nowoczesnych wielowątkowych procesorów pozwala poprawić wydajność kilkakrotnie, przy optymalnym zaplanowaniu obliczeń. Zastosowanie profesjonalnych kart graficznych i wykorzystanie procesorów graficznych GPU (ang. Graphics Processing Unit) pozwala podnieść efektywność obliczeń o rząd wielkości. Wykonanie szeregu testów pozwoliło potwierdzić efektywność stosowania procesorów graficznych do analizy obszernych danych hiperspektralnych. Do przeprowadzenia testów użyłem jako bazy 255 widm w zakresie spektralnym 400-700 nm i 31 kanałów spektralnych przy rozdzielczości 10 nm.



Rys. 39 Porównanie wydajności dla analizy czynników głównych na GPU karty NVIDIA® Tesla™ T4 16 GB zainstalowanej w komputerze stacjonarnym Dell Precision 7960 Tower XCTO z procesorem Intel Xeon w5-3423 i na CPU komputera przenośnego Dell Latitude 5420 z procesorem Intel i5 i 32 GB RAM.

Widma zostały zapisane w postaci macierzy danych w środowisku MATLAB, następnie na potrzeby testów obciążeniowych były duplikowane cyklicznie, przy zachowaniu tej samej ilości kanałów spektralnych, aż do osiągnięcia oczekiwanych ilości.

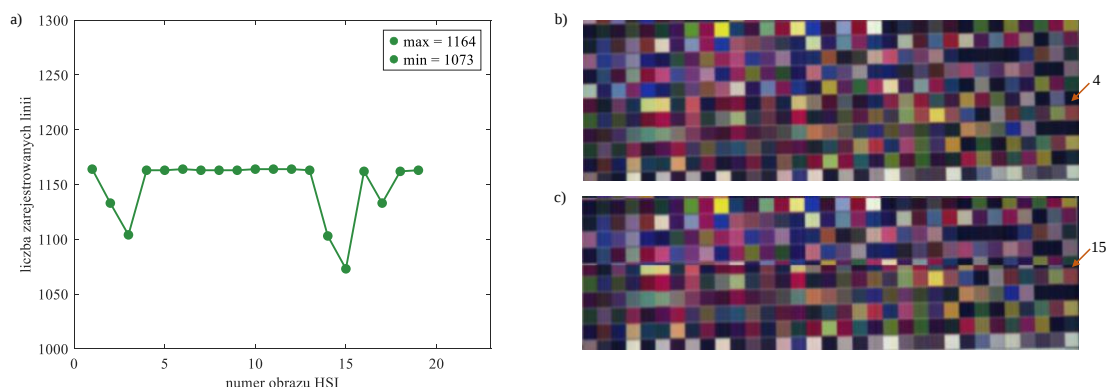
Wyniki pozwoliły wykazać, że analiza PCA dla ilości w zakresie 1-20 mln testowanych widm trwa ponad $10 \times$ krócej przy użyciu GPU w porównaniu do CPU. Oczywiście konkretne wyniki testów wydajnościowych będą się w sposób istotny różnić w zależności od doboru platformy sprzętowej, konkretnych algorytmów, jak i specyficznej struktury analizowanych danych. Warto też zwrócić uwagę, że zarówno w przypadku użycia CPU, jak i GPU możliwa jest dalsza optymalizacja i poprawa efektywności. Aktualne wyniki, jednakże, są podstawą do projektowania kolejnych algorytmów analitycznych, z uwzględnieniem specyfiki zrównoleglonych obliczeń przy użyciu zaawansowanych procesorów graficznych. Przy pracy na mniejszych zbiorach danych dążenie do optymalizacji wydajności może wydawać się nieuzasadnione, niemniej, zastosowania przemysłowe wymagają zmiany podejścia do tego zagadnienia.

Nie bez znaczenia pozostaje również wybór typu twardych dysków, ich ilości oraz pojemności. Konieczność transferu bardzo dużej liczby danych, właściwie w czasie rzeczywistym, wymaga stosowania najszybszych dysków twardych. Są to tak zwane dyski SSD (ang. solid state drive), wykorzystujące najnowszej generacji pamięci flash. W odróżnieniu od klasycznych dysków twardych nie zawierają one żadnych elementów ruchomych, przez co są znacznie szybsze, cichsze, odporne na wstrząsy i bardziej energooszczędne. Szybkość transferu danych oferowana przez dyski SSD, zarówno w trybie zapisu, jak i odczytu, bywa różna i zależy od interfejsu transferu danych, typu zastosowanej pamięci flash, ale jest to zwykle nie mniej, niż około 550 Mb/s. Warto zwrócić uwagę na fakt, że informacje dotyczące szybkości transferu danych, wynikające ze specyfikacji producenta, rzadko znajdują pełne odzwierciedlenie w rzeczywistych warunkach. By posłużyć się konkretnym przykładem: przenośny dysk typu SSD o pojemności 1 TB według specyfikacji producenta posiada prędkość odczytu na poziomie 1050 MB/s, natomiast prędkość zapisu to 1000 MB/s. Urządzenie zostało wyprodukowane przez firmę Sandisk Corporation i posiada interfejs USB 3.2 Gen. 2. Teoretycznie zapis 100 GB danych na taki dysk mógłby zostać zrealizowany w optymalnych warunkach w czasie poniżej 2 minut. W praktyce, na realne wyniki transferu danych ma wpływ szereg czynników sprzętowych, systemowych lub związanych z charakterystyką samych plików. Rzeczywisty transfer 100 GB danych

hiperspektralnych w postaci różnej wielkości obrazów, składający się z ponad 2000 plików trwał 4 minuty i 41 sekund. Proces dotyczył transferu danych z komputera do akwizycji obrazów HSI z dyskiem typu SSD na dysk przenośny SSD. Dla porównania transfer analogicznych danych z dysku HDD na ten sam przenośny dysk SSD za pośrednictwem interfejsu USB 2.0 trwał 1 godzinę i 20 minut. Z moich wcześniejszych doświadczeń wynika, iż w komputerze optymalnie powinny zostać zainstalowane dwa twarde dyski, przy czym pierwszy z nich musi być dyskiem SSD o możliwie najlepszych parametrach zapisu i odczytu danych. Jego zadaniem jest podstawowa obsługa komputera, w tym systemu operacyjnego, a także bieżąca rejestracja danych hiperspektralnych. Ze względów praktycznych dobrze jest, aby dysk został na początku podzielony na co najmniej dwie partycje, wyodrębniając jedną wyłącznie na potrzeby obsługi systemu operacyjnego, a drugą rezerwując na rejestrację danych hiperspektralnych. Dane zapisywane na drugiej partycji będą na niej gromadzone tymczasowo, nim zostaną zarchiwizowane na drugim niezależnym dysku twardym. Jego gwarantowane parametry transferu danych nie są aż tak istotne. Wraz z coraz większą dostępnością szybkich dysków SSD, ich rosnącą pojemnością w relacji do ceny, coraz częściej odchodzi się od modelu podziału na partycję i dysk operacyjny oddzielony od danych archiwalnych, w przypadku komputerów osobistych. W zastosowaniach profesjonalnych i przemysłowych nadal takie podejście wydaje się dobrą praktyką. Osobną kwestią pozostają kopie zapasowe, a także bezpieczeństwo danych dostosowane do potrzeb środowiska i użytkowników.

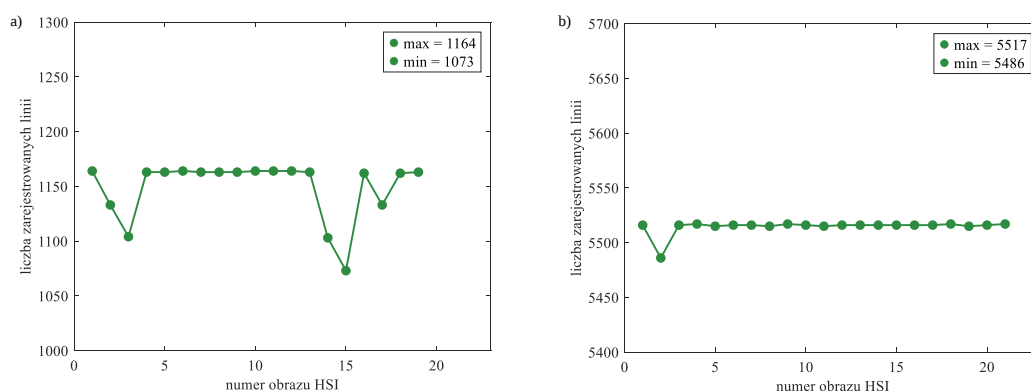
Alternatywnym lub dodatkowym sposobem archiwizacji danych, w tym danych hiperspektralnych, jest użycie dysków sieciowych. Transfer danych z komputera na dysk sieciowy odbywa się poprzez złącze stałe lub Wi-Fi. Tego typu dysk pracuje zupełnie niezależnie i jest autonomiczną jednostką pod względem zasilania i działania. Nie wymaga żadnych dodatkowych połączeń z płytą główną komputera i tym samym nie zabiera dodatkowego miejsca. Użytkowników dysku sieciowego może jednocześnie być wielu. Inną praktyczną zaletą takiego sposobu archiwizacji to łatwość rozbudowy dysku sieciowego o kolejne moduły.

Realizując testy wydajnościowe układu laboratoryjnego w Instytucie Chemii Uniwersytetu Śląskiego w oparciu o interfejs GigE, zaobserwowałem zjawisko utraty linii w obrazie HSI. Kilkanaście powtórzeń obrazowania tej samej próbki dla identycznych ustawień dawało zbliżone ilości zeskanowanych linii, niemniej dla niektórych iteracji różnice były znaczące, co pokazałem na rysunku 40.



Rys. 40 Zjawisko utraty linii skanu HSI podczas akwizycji obrazu kamerą hiperspektralną Specim FX10e z interfejsem GigE, a) wykres ilości pobranych linii dla 19 kolejnych skanów próbki dla tych samych ustawień, b) trójkanałowa reprezentacja fragmentu prawidłowo pobranego obrazu dla skanu nr 4, c) trójkanałowa reprezentacja nieprawidłowo pobranego obrazu z utratą kilkunastu linii dla skanu nr 15.

Stacja robocza w laboratorium została skonfigurowana w oparciu o procesor Intel i3, 4 GB RAM i twardy dysk HDD. Specyfikacja była zgodna z rekomendacją przedstawiciela firmy Specim w momencie uruchamiania stanowiska pomiarowego, które zostało przygotowane do prowadzenia eksperymentów naukowych.



Rys. 41 Zjawisko utraty linii skanu HSI podczas akwizycji obrazu kamerą hiperspektralną: a) Specim FX10e z interfejsem GigE, b) Specim FX10 z interfejsem CameraLink.

W przypadku skanowania niewielkich homogenicznych próbek, zjawisko to zwykle nie występuje, a jeśli się już pojawia to nie ma większego znaczenia, gdyż można zawsze pobrać do analizy inne fragmenty obrazu. Podczas analizy większych obrazów ze zróżnicowaną grafiką, jest to zjawisko absolutnie krytyczne. Utrata pojedynczych linii skanu, przy prawidłowym próbkowaniu z właściwym marginesem grafiki wokół próbki, może zostać skompensowana. Brak kilku lub kilkunastu linii obrazu o zróżnicowanej graficznie powierzchni jednak już w sposób istotny wpłynie na otrzymane wyniki, a porównanie obrazu wzorca z obrazem wydruku będzie nieprecyzyjne lub w ogóle niemożliwe.

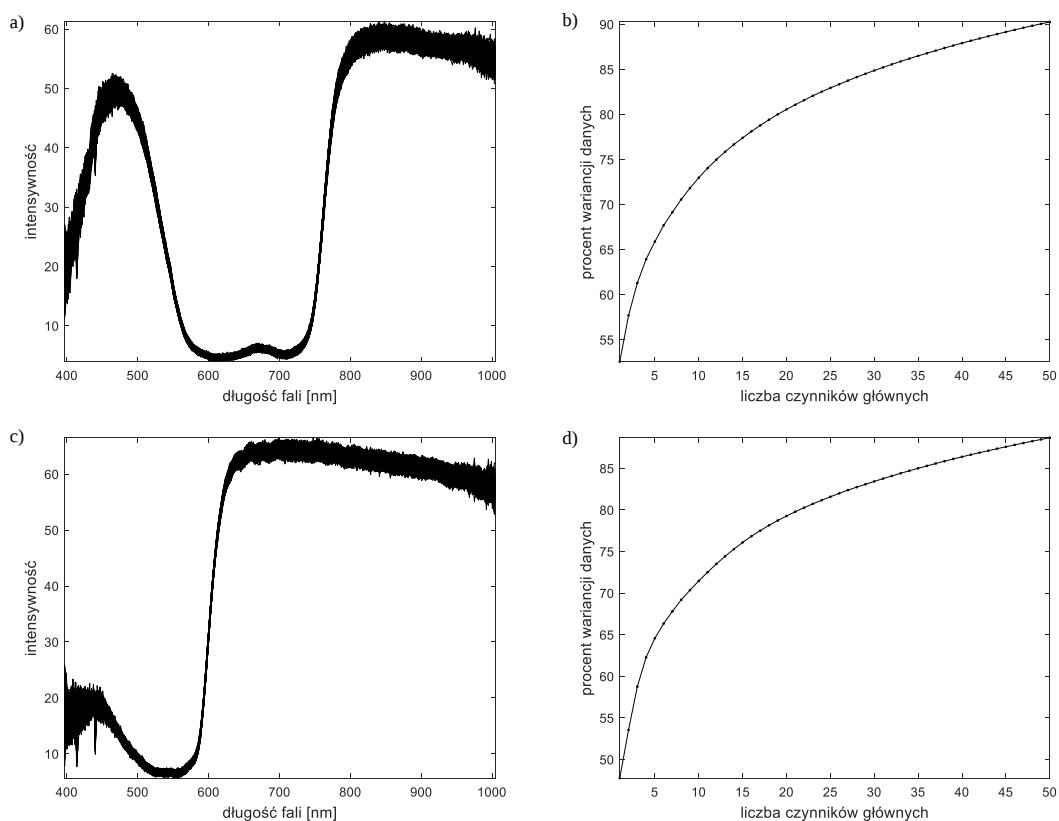
Podobny test przeprowadziłem na wdrożonym stanowisku pomiarowym w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o. dla konfiguracji z interfejsem CameraLink. Układ wykazał lepszą stabilność i powtarzalność akwizycji dla niemal pięciokrotnie większych obrazów niż w przypadku GigE, niemniej w jednym przypadku również doszło do utraty niewielkiego fragmentu skanu, zobacz rysunek 41 b). To potwierdza, że zaobserwowane przeze mnie doświadczalnie zjawisko wymaga dalszej uwagi i nie dotyczy wyłącznie interfejsu GigE.

12.6 Nowe sposoby wizualizacji zmienności procesu druku

Mając na względzie konieczność badania postępu procesu druku barwnego w oparciu o zestawy widm spektroskopowych, w ramach niniejszej pracy doktorskiej opracowane zostały narzędzia ułatwiające wizualizację danych procesowych. W tym miejscu należy podkreślić, że dotychczas prowadzona kontrola barwy w przypadku procesu druku była prowadzona wyłącznie w oparciu o pomiary barwy i sprowadzała się do badania różnicy barwy ΔE na podstawie wartości L^* , a^* oraz b^* . W pracy doktorskiej, po raz pierwszy, zaproponowano podejścia analizy barwy bezpośrednio w oparciu o widma spektroskopowe, a właściwie ich liczne zbiory, co wymaga zupełnie innego sposobu weryfikacji i badania ukrytej w nich informacji, w tym wizualnej oceny podobieństw.

Zważywszy na wielowymiarowy charakter danych hiperspektralnych, ich bezpośrednia wizualizacja jest niestety niemożliwa. Należy zauważyć, że w przypadku kontroli jakości barwy opartej na badaniu barwnych pól wzornika, każde z pól faktycznie opisuje nie jeden pomiar, ale wiele pomiarów, co tworzy liczny zbiór wielu widm. W odróżnieniu od prostego urządzenia pomiarowego, jakim jest Exact i pojedynczego pomiaru danego pola, kamera hiperspektralna z dużą prędkością i zarazem łatwością dla każdego pola barwnego rejestruje setki widm w czasie rzeczywistym. Liczba widm opisująca barwne

pole może być różna i zależy przede wszystkim od wybranej przez użytkownika wielkości pola do analizy (tzw. ROI), liczby możliwych do zarejestrowania przez kamerę hiperspektralną pikseli oraz określonych preferencji. Stąd, podstawowym rekomendowanym narzędziem przetwarzania danych hiperspektralnych jest analiza czynników głównych, ponieważ ma ona dwie zasadnicze zalety. Po pierwsze zapewnia kompresję wielowymiarowych danych opisujących proces druku, a także wspiera ich późniejszą wizualizację. Wziąwszy pod uwagę silną korelację zmiennych obserwowaną w przypadku widm rejestrowanych w zakresie światła widzialnego, kompresja danych jest zwykle bardzo skuteczna. Oznacza to, że każdy z pomiarów, pierwotnie opisany przez kilkaset punktów pomiarowych może być skutecznie reprezentowany przez zbiór wyników, tj. projekcję widm na przestrzeń czynników głównych, których liczba jest relatywnie mała w stosunku do pierwotnej wymiarowości danych i sprowadza się właściwie zaledwie do kilku.



Rys. 42 Zbiory trzystu widm i efektywność ich kompresji za pomocą metody PCA dla wybranych pól pomiarowych ze 100 % pokryciem: a), b) cyan, c), d) magenta; jako procent wariacji danych opisany przez kolejne czynniki główne.

Wizualizacja zmienności pojedynczego procesu, trajektorii jego ewolucji, a także indywidualnych etapów może być zatem uważnie obserwowana, badana, a następnie interpretowana poprzez wizualną analizę odpowiednio skonstruowanych diagramów projekcji wyników. Jest to niewątpliwie duży atut i zarazem niezwykle pożądany efekt w przypadku wykonywania podstawowych zadań kontrolnych oraz diagnostycznych.

Aby zilustrować przydatność metody PCA, przygotowano dwa różne przykłady kompresji danych dla dwóch zbiorów, po trzysta widm każdy, zarejestrowanych w pełnym zakresie spektralnym oferowanym przez kamerę, odpowiednio dla pól cyan i magenta z wzornika barwy wydrukowanego na jednym z kilku etapów druku. Ogólnie, efektywność kompresji danych możemy oceniać poprzez analizę procentu wariancji danych jaką opisują kolejno konstruowane czynniki główne tworzące model PCA.

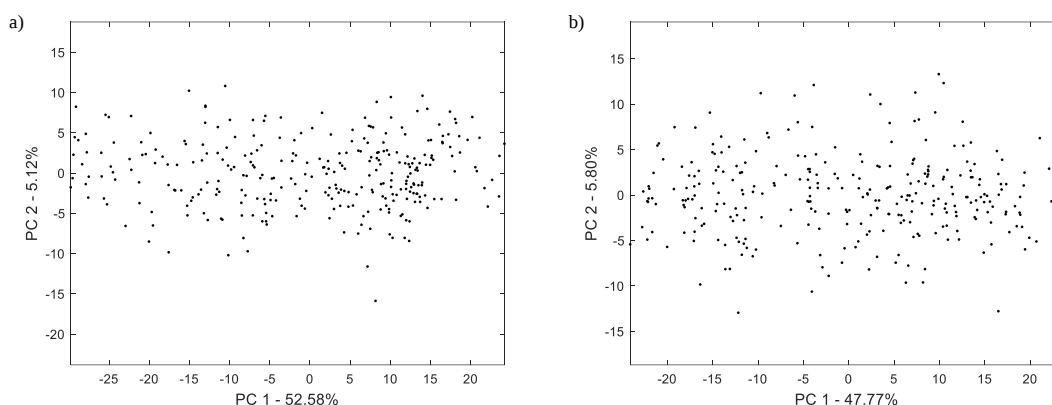
Rysunek 42 przedstawia odpowiednio dwa zbiory trzystu widm i wkłady czynników głównych do całkowitego opisu ich wariancji danych w funkcji ich liczby.

Analizując poszczególne zbiory widm widzimy, że dla jednej barwy są one relatywnie spójne, a ich zmienność wynika przede wszystkim z większego poziomu szumu sygnału, w szczególności w niskich i wysokich zakresach długości fal. To zjawisko może być tłumaczone różną wrażliwością detektora kamery oraz wielkością piksela pomiarowego w stosunku do analizowanego mikroobszaru. Przekłada się to wprost na stopień kompresji danych, która wymaga większej liczby czynników, aby opisać zakładany procent wariancji. W przypadku zbioru widm zarejestrowanych dla pola o barwie cyan, pierwsze dziesięć czynników głównych modelu PCA opisuje około 73 % całkowitej wariancji danych, a w przypadku widm opisujących pole o barwie magenta około 71 %. Choć zapewne życzylibyśmy sobie bardziej efektywnej kompresji, to nawet dziesięć pierwszych czynników głównych jest skuteczniejszą formą opisu danych spektralnych niż ich pierwotna forma, a dalsze obliczenia czy stosowanie metod wykorzystujących wprost wyniki modelu PCA jako reprezentację danych zapewniają znaczące przyspieszenie dalszych obliczeń. Innym istotnym aspektem zmiany oryginalnej formy danych jest częściowa redukcja poziomu błędu pomiarowego mającego charakter losowy, tzn. polepszenie stosunku sygnału do szumu.

Kolejny bardzo istotny wniosek dotyczący projektowania i rozwijania narzędzi wizualizacji ewolucji procesu, a także innych efektywnych narzędzi analizy barwy w oparciu o obrazowanie hiperspektralne barwnych pól kontrolnych wzornika wynika wprost ze zmiany paradygmatu reprezentacji pola barwnego i sposobu pomiaru. W odróżnieniu od standardowego podejścia, jedno pole – jeden pomiar,

w proponowanym w pracy doktorskiej scenariuszu, wykorzystującym obrazowanie hiperspektralne, każde z pól kontrolnych reprezentuje zbiór widm, co powoduje, że możemy teraz mówić o wielowymiarowej dystrybucji i zmienności tychże widm, postrzeganej jako parametry rozkładu.

Rysunek 43 obrazuje widma poszczególnych pikseli obrazu uzyskane jako projekcje widm na przestrzeń pierwszych dwóch czynników głównych dla omawianych wcześniej wybranych dwóch pól wzornika.

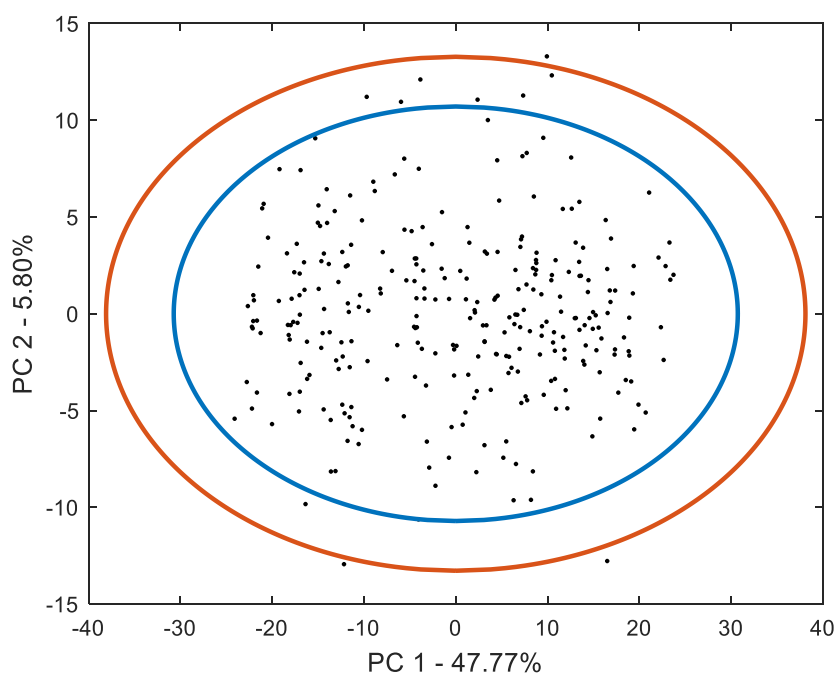


Rys. 43 Przykładowe projekcje widm na przestrzeń pierwszego i drugiego czynnika głównego dla dwóch pól kontrolnych o barwie: a) cyan, b) magenta.

Zarówno w pierwszym, jak i w drugim przypadku możemy zaobserwować, że pola pomiarowe opisują różne dystrybucje punktów w przestrzeni czynników głównych, a te odpowiadają poszczególnym zbiorom oryginalnych widm, tj. poszczególnym punktom pomiarowym fragmentu obrazu czyli pikselom, co pozwala na szybkie śledzenie wzajemnych podobieństw pomiędzy nimi. Pierwszy czynnik główny opisuje około 50 % całkowitej zmienności, a zatem jest on powiązany z dominującą zmiennością pomiarową. Widząc rozrzut punktów pomiarowych, w sposób zupełnie naturalny rozważamy jaki w sensie statystycznym śledzą one rozkład.

W najprostszym, jednoparametrowym przypadku, należy oczekiwać, że faktyczny rozkład rejestrowanych wartości pomiarowych będzie zbliżony do rozkładu normalnego, którego maksimum estymuje wartość średnia. Z kolei rozrzut wyników wokół wartości średniej można estymować za pomocą takich parametrów jak wariancja czy odchylenie standardowe. Jeśli daną próbkę jednocześnie opisuje wiele pomiarów – co najmniej dwa

parametry, wówczas mamy do czynienia z wielowymiarowym rozkładem, który w przypadku obrazowania pól kontrolnych będzie wielowymiarowym rozkładem normalnym. Jego maksimum również będzie estymowane przez wartości średnie poszczególnych parametrów oraz odpowiadające im wartości wariancji i kowariancji, opisujące wzajemne zależności pomiędzy wszystkimi parametrami.



Rys. 44 Projektacja wyników na przestrzeń pierwszych dwóch czynników głównych modelu PCA, skonstruowanych dla zbioru widm opisujących przykładowe pola kontrolne o jednolitej barwie, z zaznaczonymi konturami wskazującymi obszar 95 % i 99 % prawdopodobieństwa wystąpienia wyników, wyznaczonymi na podstawie założenia o normalnym rozkładzie punktów i realnych danych pomiarowych.

Dwuwymiarowy normalny rozkład punktów pomiarowych wpisuje się w okrąg lub elipsę, której położenie, wielkość i orientacja w przestrzeni względem osi układu współrzędnych zależy od wartości średnich parametrów, zakresu zmienności parametrów i ich wzajemnej korelacji. Co istotne, zakładając rozkład normalny, w oparciu o jego parametry łatwo da się ustalić promień lub promienie koła albo poszczególne osie elipsy, które obejmują punkty pomiarowe, zakładając wybrany poziom prawdopodobieństwa wystąpienia w niej wyników, np. 95 % lub 99 %.

Przykładowy rozkład punktów w dwuwymiarowej przestrzeni czynników głównych, można zobaczyć na rysunku 44. Na projekcji wyników przedstawiono dwie elipsy, których niebieskie i czerwone kontury obejmują odpowiednio 95 % i 99 % punktów pomiarowych, przy czym parametry elips zostały ustalone na podstawie faktycznego zbioru punktów pomiarowych i wartości krytycznych dla dwuwymiarowego rozkładu normalnego.

W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że faktycznie osie elips pokrywają się z osiami największej wariancji danych. Pamiętając o założeniach modelu PCA i sposobie konstruowania czynników głównych zauważymy, że osie elips będące zarazem osiami największej wariancji danych, to tak naprawdę kierunki kolejno konstruowanych czynników głównych. Istnieje także relacja matematyczna, pozwalająca określić mimośrodę elipsy, wiążąc je z wartościami własnymi. A zatem, im większe dysproporcje w wartościach własnych dwóch czynników głównych, tym bardziej elipsa staje się wąska. Uwzględniając kontury prawdopodobieństwa, dość łatwo można ustalać, które z punktów pomiarowych nie wpisują się w elipsę i na tej podstawie opracować narzędzie diagnostyczne i/lub decyzyjne. Jeśli użyjemy odpowiednich, stabilnych estymatorów środka danych czy wariancji-kowariancji, wówczas narzędzie diagnostyczne będzie nieczułe na obecność ewentualnych obiektów odległych, a jednocześnie poprawnie opisując większość danych, umożliwi skuteczną diagnostykę obiektów odległych [86]. Typowymi stabilnymi miarami określającymi środek wielowymiarowych danych są mediana albo L1-mediana. Z kolei stabilnym estymatorem położenia i rozproszenia, o maksymalnym możliwym punkcie załamania wynoszącym 51 % jest estymator MCD (ang. minimum covariance determinant) [87]. Rozważania użycia stabilnych wariantów różnych estymatorów wydają się być szczególnie pożądane do budowania narzędzi diagnostycznych w przypadku procesów o bardzo dużej oczekiwanej zmienności.

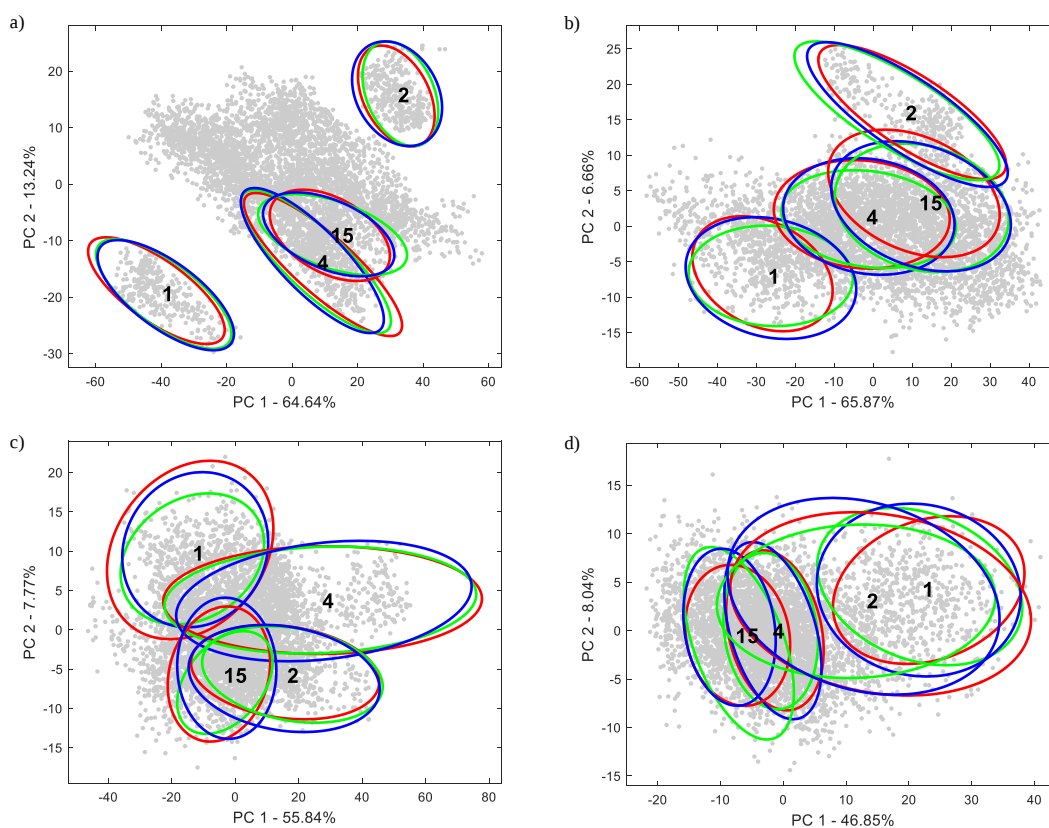
Reasumując, stworzona na podstawie punktów pomiarowych elipsa, w sposób naturalny, wizualizuje podstawowe parametry rozkładu, tj. położenie (wartości średnie), wielkość (wariancja) oraz zależność parametrów (kowariancja). W przypadku czynników głównych uzyskanych dla jednego zbioru punktów nie widzimy, by elipsa była nachylona względem osi układu współrzędnych, ponieważ te osie tworzą czynniki główne, które z definicji są ortogonalne.

Powyższe przesłanki i poczynione w trakcie badań i analiz danych obserwacje stały się podstawą do zaproponowania nowego podejścia wizualizacji dystrybucji danych hiperspektralnych, ujawniania i śledzenia przebiegu procesu monitorowanego

z wykorzystaniem nowoczesnej technologii obrazowania hiperspektralnego, a także porównywania określonych momentów procesu lub partii produkcyjnej w oparciu o odpowiednie dystrybucje lub ich parametry, a nie pojedyncze pomiary barwnych pól wzornika.

12.7 Badanie stabilności pomiarów kamerą typu FX10 firmy Specim

Potencjalne różnice w stabilności działania kamery hiperspektralnej zostały zbadane poprzez powtarzanie pomiarów wybranych pól barwnych wzornika. Do analizy wykorzystano omawiane wcześniej podejście w oparciu o elipsy symbolizujące przyjęty poziom prawdopodobieństwa występowania wyników dla zbioru pomiarów opisujących określone pole barwne mierzone trzy razy.



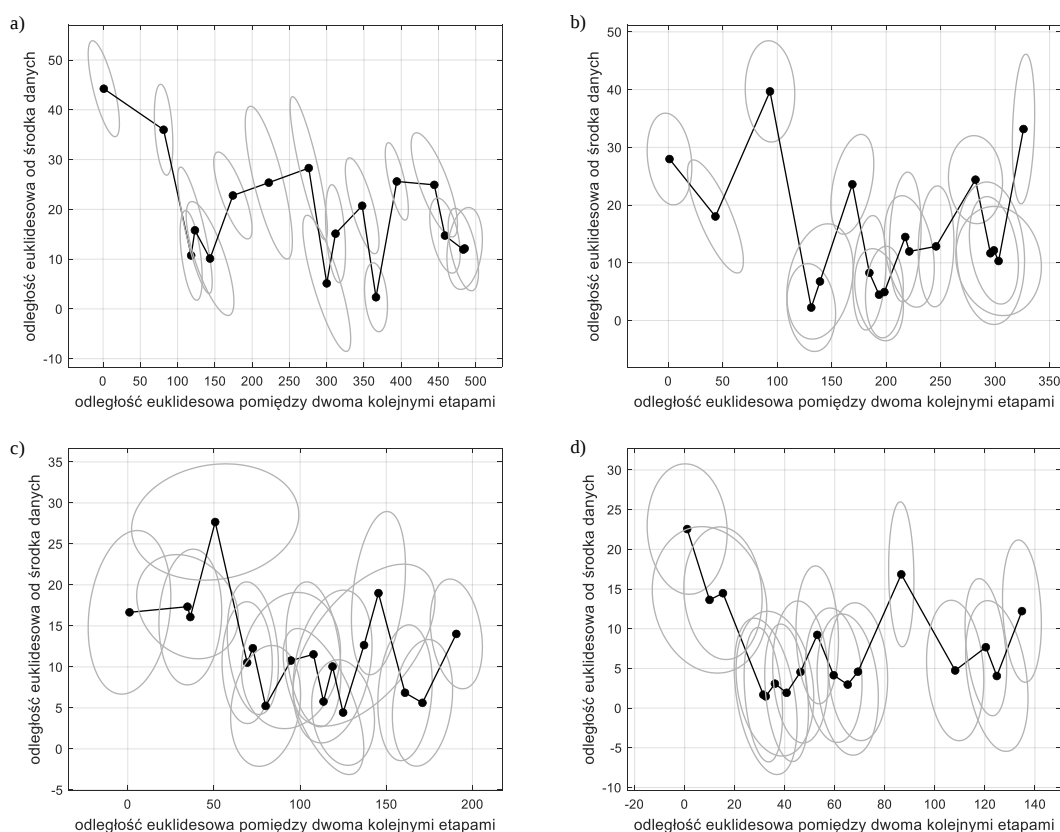
Rys. 45 Projekcje widm wszystkich etapów przykładowego procesu druku na przestrzeń pierwszych dwóch czynników głównych wraz z zaznaczonymi kolorowymi elipsami dla wybranych etapów procesu (1, 2, 4 i 15), których kolory odpowiadają powtórzeniom pomiarów, odpowiednio dla jednolitych pól o barwach: a) cyan, b) magenta, c) yellow, d) black.

Rysunek 45 przedstawia projekcje elips skonstruowanych dla wybranych składek pobranych w 1, 2, 4 i 15 etapie wysokowydajnego procesu druku, czterech jednobarwnych pól kontrolnych o maksymalnej tonalności (cyan, magenta, yellow i black), rejestrowanych trzy razy. Podczas obrazowania próbek za każdym razem zachowano to samo naświetlenie powierzchni (kąt padania strumienia światła i jego intensywność), a także utrzymywano takie same pozostałe warunki pomiarowe.

Na podstawie położenia, orientacji i wielkości odpowiadających sobie elips, oznaczonych kolorem niebieskim, zielonym i czerwonym, niezależnie od etapu procesu czy koloru obrazowanego pola kontrolnego, obserwujemy bardzo duże podobieństwo, co wynika z ich nakładania się. Na tej podstawie możemy wnioskować, że kamera hiperspektralna użyta w eksperymencie w sposób stabilny rejestruje obrazy dla tych samych próbek.

12.8 Wizualna kontrola procesu druku na podstawie wybranych pól kontrolnych

Teraz przedstawimy i omówimy sposób wizualizacji przebiegu procesu druku dla czterech wybranych pól kontrolnych wzornika odpowiadających podstawowym i jednolitym barwom, tj. cyan, magenta, yellow i black, konsekwentnie rejestrowanych w kolejnych etapach procesu druku. Unikalną własnością oryginalnego sposobu wizualizacji, który zaproponowano w mojej pracy doktorskiej, jest możliwość przedstawiania jednocześnie kilku różnych, a zarazem istotnych danych świadczących o przebiegu procesu druku, jego postępie i skali zmienności w czasie. Poglądowe wybrane diagramy wizualnej kontroli procesu zamieszczono na rysunku 46. Pozioma oś rysunku przedstawia podobieństwo pomiędzy następującymi po sobie etapami procesu, które jest wyrażone jako odległość euklidesowa, obliczona w przestrzeni dwóch pierwszych czynników głównych pomiędzy dwoma środkami rozkładu punktów pomiarowych, opisujących dane pole kontrolne z wzornika dla i-tego wydruku oraz kolejnego. Z kolei oś pozioma obrazuje odległość euklidesową mierzoną pomiędzy środkiem rozkładu reprezentującego pomiary danego pola kontrolnego w i-tym czasie procesu, a początkiem układu współrzędnych. Natomiast na każdym z kolejnych punktów wykresu została osadzona elipsa 95 % konturem prawdopodobieństwa występowania wyników. Jej nachylenie i rozmiar wyznaczono na podstawie rozkładu punktów pomiarowych obserwowanych dla danego pola kontrolnego w i-tym czasie procesu druku. Analiza kolejnych punktów sprowadza się do weryfikacji nachylenia i wielkości kolejnych elips.



Rys. 46 Diagramy przedstawiające wizualizację ewolucji procesu druku dla czterech wybranych pól kontrolnych o jednolitych barwach a) cyan, b) magenta, c) yellow, d) black. Każda z elips obejmuje przestrzeń, w której powinny z 95 % prawdopodobieństwem wystąpić wyniki, przy założeniu normalnego rozkładu punktów. Poszczególne etapy procesu charakteryzują zbiory widm kolejno rejestrowane kamerą hiperspektralną.

W idealnym przypadku wielkość, orientacja i położenie sąsiadujących ze sobą elips powinny być zbliżone. W omawianym przypadku, najmniejsza wariancja procesu dotyczy wydruku kolorów cyan i magenta, gdyż kształt elips i ich orientacja są bardzo podobne.

Warto w tym miejscu podkreślić, że zaproponowany sposób konstrukcji diagramów służących monitorowaniu procesu druku wielobarwnego nie jest jedynym możliwym. Z łatwością można tego typu diagramy rozwijać czy modyfikować uwzględniając inne, dodatkowe parametry lub określone preferencje użytkownika. Niemniej, najbardziej atrakcyjny wydaje się pozostawać główny zamysł – czyli wykorzystanie elips opisujących rozkład punktów pomiarowych. Jest to znaczące rozszerzenie podstawowych

diagramów kontroli procesów, gdzie w klasycznym podejściu obserwuje się ewolucję jednego parametru w czasie.

12.9 Systemy eksperckie SIMCA w kontroli druku wielobarwnego

Aby zilustrować ideę kontroli procesu druku wielobarwnego wykorzystując w tym celu system ekspercki SIMCA, posłużymy się realnymi danymi eksperymentalnymi. Dane za pomocą widm rejestrowanych kamerą hiperspektralną charakteryzują zmienność wybranych pól o jednolitej barwie, wchodzących w skład wzornika kolorów, standardowo drukowanego podczas procesu na papierze maszyną drukarską o wysokiej wydajności. Konstruując system ekspercki skupiliśmy się tylko na czterech polach barw podstawowych, które są koloru cyan, magenta, yellow i black o 100 % pokryciu. Wybór ten był podyktowany pragmatycznym założeniem, że przecież wszystkie inne kolory powstają jako ich mieszanina. Należy jednak zwrócić uwagę, że w rozważanej konfiguracji, system ekspercki SIMCA monitoruje barwę, a w mniejszym stopniu jej tonalność. W przypadku konieczności monitorowania stopnia pokrycia powierzchni kolorem lub punktów rastra, należy rozważyć skonstruowanie odrębnego systemu eksperckiego podejmującego decyzje w oparciu o dodatkowe parametry ilościowe. W zależności od potrzeb wynikających z przyjętych procedur, relatywnie łatwo można rozszerzyć zakres automatycznego monitorowania o dodatkowe pola kolorów, które w ujęciu metody SIMCA stanowią faktycznie grupy próbek (widm) i są charakteryzowane przez indywidualne modele PCA. W zależności od przyjętej strategii monitorowania procesu druku, konieczne jest wybranie referencyjnej i zarazem reprezentatywnej grupy próbek, dobrze definiującej zakres tolerowanej zmienności. Taką grupę referencyjną może tworzyć zbiór widm, opisujących wybrane pola kolorów z wzorników nadrukowywanych już po osiągnięciu stabilności procesu druku. W naszym przypadku przyjęliśmy, że ze wszystkich pobranych 17 partii produkcyjnych (odbitek drukarskich), tą reprezentatywną i zarazem optymalną jest piąta partia, którą potraktujemy jako wzór, czyli nasz odpowiednik składki kolor ok.

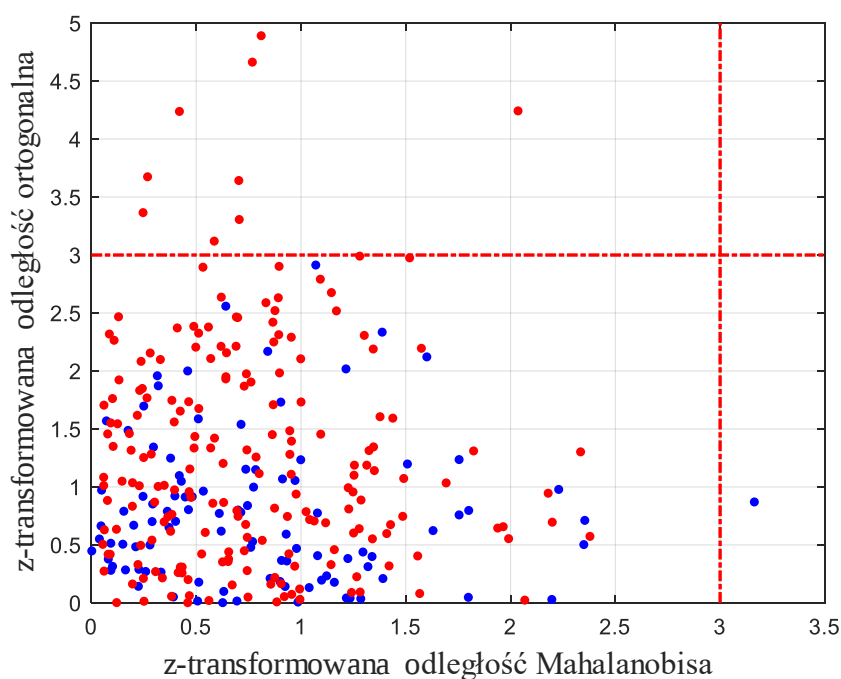
Wobec powyższego, grupę referencyjną danego koloru tworzy zbiór widm piątej partii, dla którego konstruujemy model PCA o optymalnej liczbie czynników głównych, a następnie, korzystając z parametrów modelu weryfikujemy podobieństwo innych grup względem grupy referencyjnej. Optymalną liczbę czynników modelu możemy wyznaczyć stosując podejście walidacji krzyżowej, lub zakładając określony procent wariancji danych, który powinien uwzględnić model PCA. Liczba czynników głównych,

które tworzą model PCA dla grupy referencyjnej jest ważna, ponieważ to właśnie od niej zależy stopień podobieństwa innych grup do grupy referencyjnej, wyrażany w przestrzeni odległości Mahalanobisa oraz odległości od przestrzeni modelu. Wraz ze wzrostem liczby czynników użytych do konstrukcji modelu kurczy się przestrzeń wokół modelowanej grupy, ponieważ model jest coraz bardziej dopasowany do danych i zarazem marginesy reguł logicznych są coraz mniejsze. W odróżnieniu od metod dyskryminacyjnych, model SIMCA koncentruje się tylko na modelowanej grupie próbek, a do budowy reguł logicznych nie rozważa próbek z innych grup. Ustalenie optymalnej kompleksowości modelu, to faktycznie poszukiwanie kompromisu pomiędzy maksymalnym możliwym uwzględnieniem przez model PCA analitycznie istotnej informacji a w minimalnym stopniu uwzględnieniem szumu pomiarowego.

Chociaż model ekspercki SIMCA może informować wyłącznie o wyniku podejmowanych decyzji w oparciu o jedną lub kilka miękkich reguł logicznych, to bardzo ciekawą, z punktu widzenia monitorowania procesu, jest jego graficzna reprezentacja za pomocą prostych w interpretacji diagramów odległości. Dla uproszczenia budowy reguł logicznych, zostały one wyznaczone w oparciu o diagramy odległości, które uwzględniają bezwzględne z-transformowane odległości Mahalanobisa oraz reszty od modelu, co pozwoliło na ustalenie wartości granicznych w oparciu o rozkład normalny. Aby z-transformować wartości danej zmiennej należy od każdej wartości odjąć wartość średnią zmiennej, a następnie wynik podzielić przez odchylenie standardowe zmiennej. Ta transformacja powoduje, że z-transformowana zmienna będzie miała wartość średnią wynoszącą zero i jednostkowe odchylenie standardowe. I tak absolutne, z-transformowane wartości odległości mniejsze od trzech, oznaczają, że rozważana próbka znajduje się w obszarze 99.9% prawdopodobieństwa określonego przez rozkład wartości odległości dla grupy referencyjnej. Z kolei wartości obserwowane powyżej ustalonego limitu świadczą o znacznej odmienności próbek względem grupy referencyjnej, tzn. nie jest spełnione kryterium przynależności do grupy referencyjnej, co należy tłumaczyć znaczącymi, czyli nieakceptowanymi różnicami barwy w stosunku do grupy referencyjnej. Relatywnie prosto, bazując na zbudowanych regułach logicznych możemy automatycznie identyfikować, które z partii nie spełniają kryteriów jakości dla określonej barwy lub kilku barw, a następnie w zależności od wyniku skonfigurować system, aby podjął ostateczną decyzję. Widzimy zatem, że takie podejście zakłada stworzenie równoległe działających modeli PCA i równoległe przewidywanie dla testowanych próbek. Odpowiednie zaprojektowanie i skonfigurowanie systemu

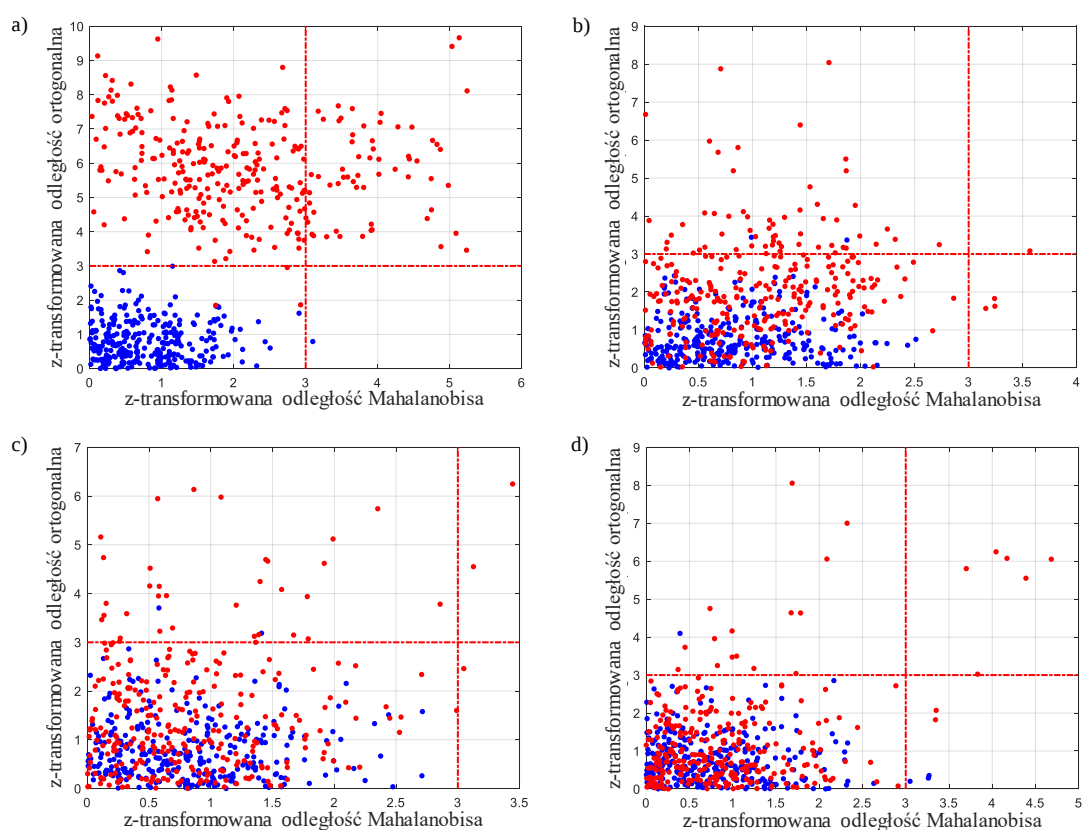
eksperckiego, co nie zawsze jest w przypadku innego typu modeli możliwe, otwiera możliwość prowadzenia obliczeń równoległych, o ile dysponujemy odpowiednią infrastrukturą obliczeniową, np. wielordzeniowy procesor, specjalne karty graficzne. Wówczas czas obliczeń i działanie całego systemu eksperckiego ulega znacznemu przyspieszeniu.

Jednym z ciekawych zastosowań systemu eksperckiego jest możliwość szybkiego uchwycenia dryftu pomiarowego urządzenia w procesie weryfikacji powtórzeń. Kontrola spójności pomiarowej następujących po sobie powtórzeń pomiarów może odbywać się w oparciu o model SIMCA w wariancie jednoklasowym, gdzie budowane reguły logiczne weryfikują tylko spełnianie kryteriów jakościowych. Na rysunku 47 przedstawiono model SIMCA zbudowany dla sprawdzenia, czy kamera hiperspektralna rejestruje stabilnie widma w czasie na podstawie jednego pola kontrolnego.



Rys. 47 Diagram odległości dla zbioru widm rejestrowanych dla pola o barwie cyan (niebieskie punkty) oraz powtórzeń pomiarów (czerwone punkty) tego pola zbudowany na podstawie modelu SIMCA wraz z zaznaczonymi krytycznymi wartościami.

Powtarzalność pomiarów charakteryzuje się obecnością wszystkich wyników w pierwszym polu diagramu odległości, co oznacza, że z-transformowane odległości Mahalanobisa oraz odległości od przestrzeni modelu PCA są mniejsze od przyjętej wartości krytycznej. Analizując rozkład odległości przedstawiony na rysunku 47 należy wyciągnąć wniosek, że powtórzenia pomiarów właściwie nie różnią się od siebie i poza kilkoma wyjątkami znajdują się w przestrzeni zgodności (lewa dolna ćwiartka diagramu). Z kolei w przypadku próbek zbioru modelowego, tylko jedna próbka na sto została odrzucona przez model SIMCA ze względu wartość z-transformowanej odległości Mahalanobisa większej od wartości krytycznej. Natomiast w przypadku powtórnego pomiaru, dziewięć pomiarów na sto zostało odrzucone z powodu za dużych wartości reszt od modelu.



Rys. 48 Cztery modele SIMCA skonstruowane, aby porównać spójność odwzorowania czterech podstawowych kolorów z pola wzornika z dwóch partii wydruków: a) cyan (4 czynniki główne), b) magenta (6 czynników głównych), c) yellow (5 czynników głównych), d) black (6 czynników głównych).

Zakładając zachowanie tych samych zewnętrznych warunków pomiarów, świadczy to o stabilności pracy kamery hiperspektralnej i znacznej odtwarzalności wyników.

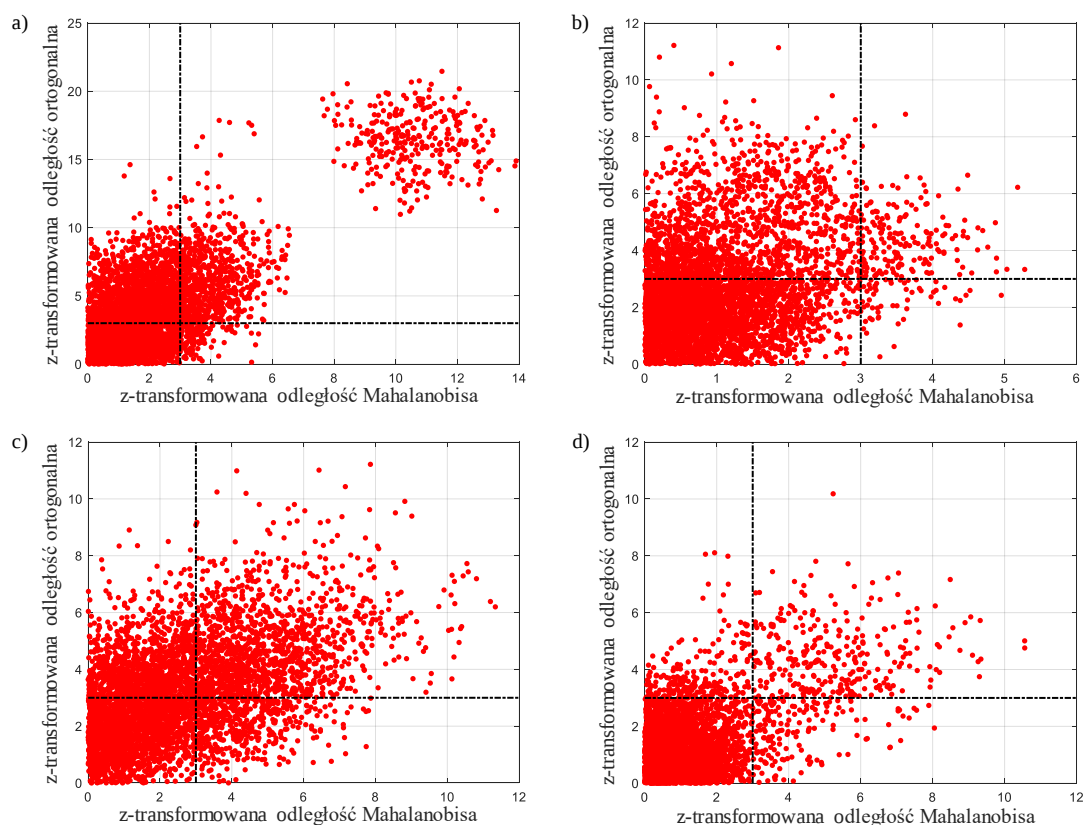
W analogiczny sposób możemy użyć systemu eksperckiego SIMCA i skonstruowanych reguł decyzyjnych, aby potwierdzać zgodność partii, badać różnice pomiędzy nimi, a nawet je kwantyfikować. Kolejny rysunek przedstawia cztery sytuacje, w których weryfikujemy stopień zgodności produkowanych po sobie dwóch partii wydruku ze względu na zgodność podstawowych czterech kolorów. Rysunek 48 pokazuje cztery modele SIMCA, które zostały skonstruowane dla optymalnej liczby czynników głównych, odpowiednio czterech, sześciu, pięciu i sześciu.

Analiza diagramów odległości i wizualne porównanie wyników dla dwóch kolejnych partii pozwala twierdzić, że pod względem odtworzenia kolorów magenta, yellow oraz black, nie ma istotnych różnic. Natomiast, proces druku nie osiągnął jeszcze stabilności jeśli uwzględnimy w naszych rozważaniach również zmienność koloru cyan. Alternatywnie, możemy twierdzić, że w tym przypadku dwie kolejne partie produkcyjne w pełni różnią się od siebie.

Scenariusz podejmowania decyzji, w którym uwzględniamy wszystkie cztery kanały barw oznacza wnioskowanie w oparciu o odpowiedzi czterech reguł logicznych. Możemy w różny sposób zdefiniować końcową decyzję, jej próg, a także określić odpowiednią reakcję. Na przykład, gdy jeden z czterech monitorowanych kanałów barwy od partii do partii nie odwzorowuje jej w oczekiwanym zakresie, system ekspercki sygnalizuje błąd krytyczny.

Możliwe jest także zdefiniowanie różnych poziomów alertów, przyjmując z góry ustalone liczby odrzuconych przez indywidualne modele pomiarów czy monitorowanie innych parametrów takich jak, na przykład, czułość i specyficzność dla określonej reguły logicznej bądź ich zestawu.

Na rysunku 49 przedstawiono diagramy odległości wizualizujące podobieństwa względem grupy referencyjnej czterech wybranych kolorów. Ich analiza pozwala w łatwy sposób, automatycznie lub wizualnie, ocenić różnice podobieństw próbek i uchwycić potencjalne problemy produkcyjne obserwowane od partii do partii. W zależności od liczby próbek dla których absolutne z-transformowane odległości przekraczają przyjęte granice reguły logicznej, możliwe są różne scenariusze decyzji i tak naprawdę w dużej mierze zależą od preferencji końcowego użytkownika i specyfiki zamówienia.



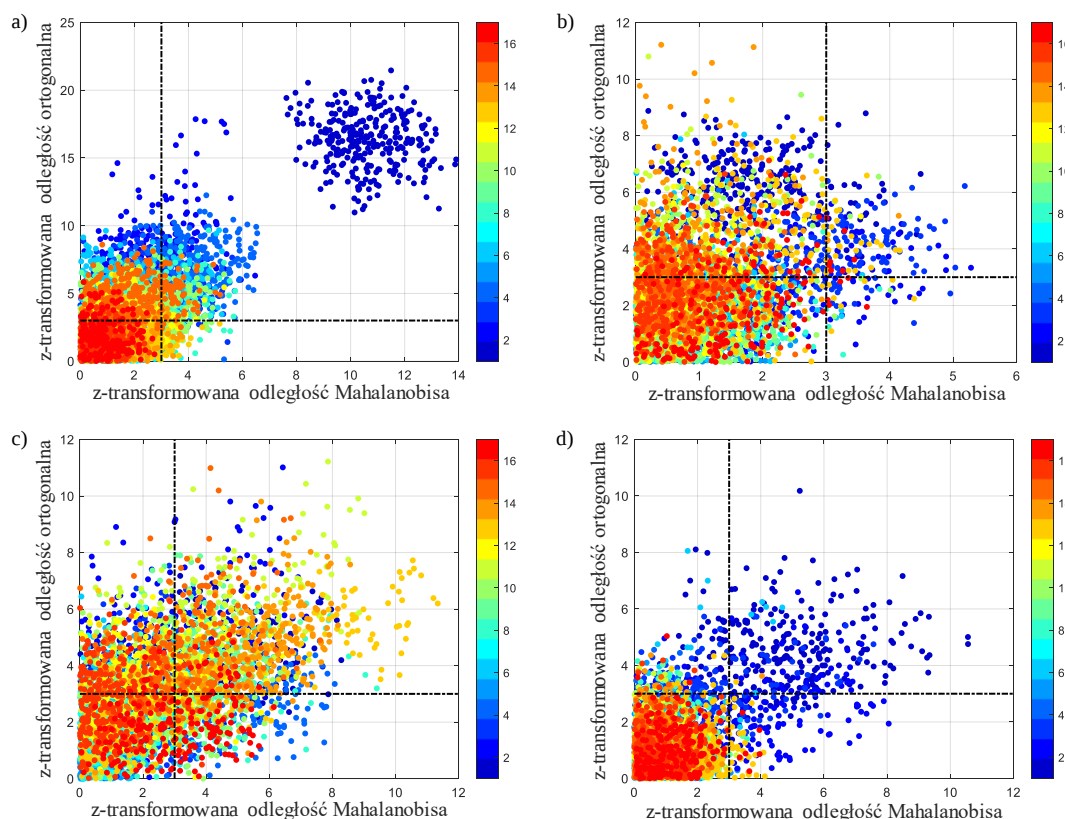
Rys. 49 Diagramy odległości przedstawiające podobieństwa względem grupy referencyjnej czterech wybranych kolorów wszystkich pozostałych szesnastu partii. Poszczególne modele są skonstruowane z tą samą liczbą czynników głównych jak w przypadku modeli pokazanych na rysunku 48.

Konfiguracja systemu eksperckiego będzie uwzględniała te kwestie, a zatem w zależności od aplikacji ulegnie większym lub mniejszym modyfikacjom.

W naszych rozważaniach, na potrzeby dyskusji wyników, przyjmujemy ostatecznie wartości progowe równe trzy, określoną grupę referencyjną oraz ustalamy z góry kompleksowość modelu PCA dla grupy referencyjnej.

Alternatywnie, na diagramach odległości możemy również wizualizować dystrybucje opisujące poszczególne partie produkcji, używając markery o różnych kolorach. Tego typu sposób wizualizacji pozwala szybko ujawnić te z nich, które znacząco odbiegają od charakterystyki wybranej grupy referencyjnej (zobacz rysunek 50).

Z przedstawionego diagramu odległości na rysunku 48 widać wyraźnie, że pierwsza partia druku nie tylko znacznie różni się od grupy referencyjnej, ale również od wszystkich pozostałych partii.

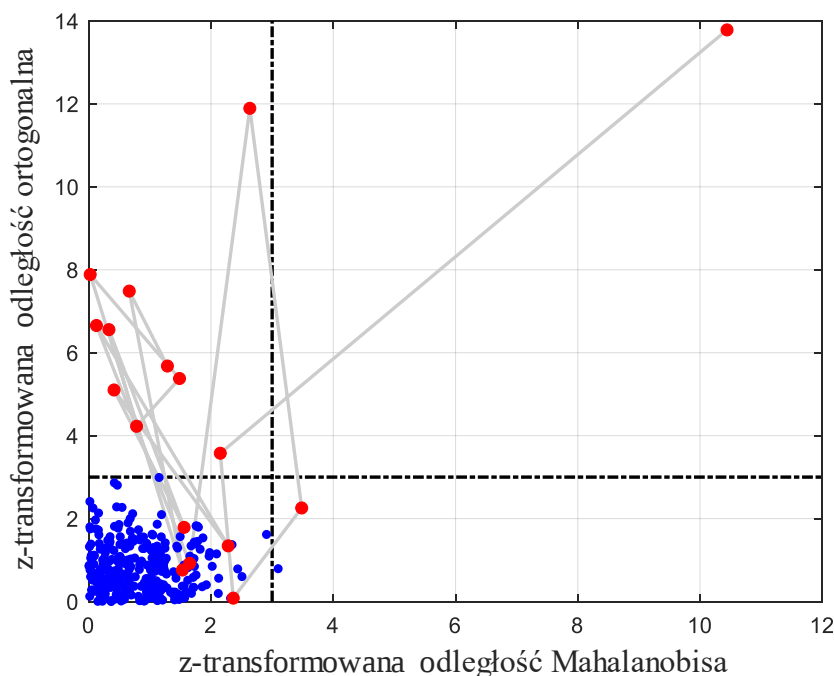


Rys. 50 Diagramy odległości przedstawiające podobieństwa względem grupy referencyjnej (piąta grupa), skonstruowane dla czterech podstawowych kolorów obserwowanych na wszystkich pozostałych szesnastu partiach. Poszczególne modele zostały skonstruowane z tą samą liczbą czynników głównych, jak w przypadku modeli pokazanych na rysunku 48. Kolory z wzornika opisują dystrybucje punktów dla każdej z siedemnastu partii produkcyjnych.

Odległość do grupy referencyjnej w przestrzeni skonstruowanych reguł logicznych można również rozważać jako alternatywny sposób monitorowania procesów i obserwowania ich trajektorii w czasie. To podejście ma charakter ilościowy, w odróżnieniu od klasycznego użycia modelu SIMCA w trybie klasyfikacyjnym.

Wówczas, diagramy odległości można znacznie uprościć, aby łatwiej skupić się na śledzeniu położenia danej partii procesu względem grupy referencyjnej, którą opisują średnie widma charakterystyczne dla danego pola koloru z wzornika danej partii

produkcyjnej. Taki właśnie sposób analizy przebiegu procesu druku na podstawie analizy zmian koloru cyan przedstawiono na rysunku 51.



Rys. 51 Trajektoria procesu druku naniesiona na diagram odległości skonstruowany w oparciu o model SIMCA dla pola o kolorze cyan, z uwzględnieniem położenia punktów grupy referencyjnej oraz kolejnych partii produkcyjnych opisanych przez średnie widma.

Zaproponowane w niniejszej pracy doktorskiej sposoby wizualizacji danych procesowych w oparciu o modele SIMCA i diagramy odległości, bynajmniej, nie wyczerpują wszystkich potencjalnych możliwości i wskazują na bardzo duży potencjał tego typu narzędzi. Mogą one być dalej rozwijane, wzbogacane o inne istotne dla monitorowania procesu dane, a w efekcie stanowić uzupełnienie używanych w kontroli procesów narzędzi diagnostycznych. W połączeniu z potencjałem oferowanym przez techniki obrazowania hyperspektralnego, w szczególności związane z bardzo precyzyjnym i szybkim obrazowaniem powierzchni, otwierają zupełnie nowe możliwości monitorowania przebiegu procesów druku wielobarwnego z wykorzystaniem najnowszych technologii zarówno pomiarowych, jak i przetwarzania danych.

13. Wdrożenie – stanowisko do kontroli jakości

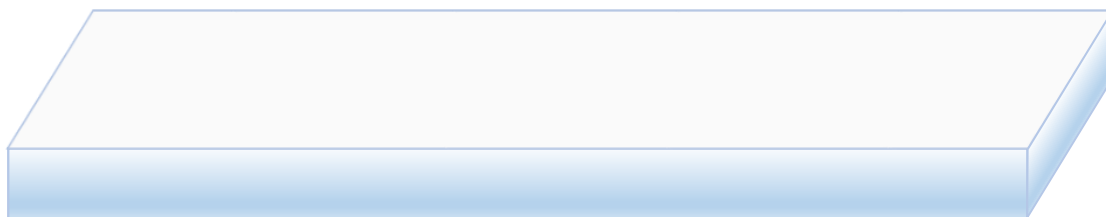
Wdrożone stanowisko pomiarowe składa się z liniowej kamery hiperspektralnej firmy Specim Spectral Imaging LTD. model FX10, ruchomego stołu roboczego, dedykowanego oświetlenia halogenowego oraz stacji roboczej. Do akwizycji obrazów hiperspektralnych służy odpowiednie oprogramowanie, natomiast do ich analizy program w środowisku Python napisany w ramach realizacji doktoratu i wdrożenia. O wyborze kamery zdecydowała zgodność ze specyfikacją niezbędną do kontroli barwy, w tym wymagana rozdzielczość spektralna i zakres spektralny obejmujący VIS, a także łatwość integracji w środowisku przemysłowym.



Rys. 52 Kamera hiperspektralna FX10 firmy Specim.

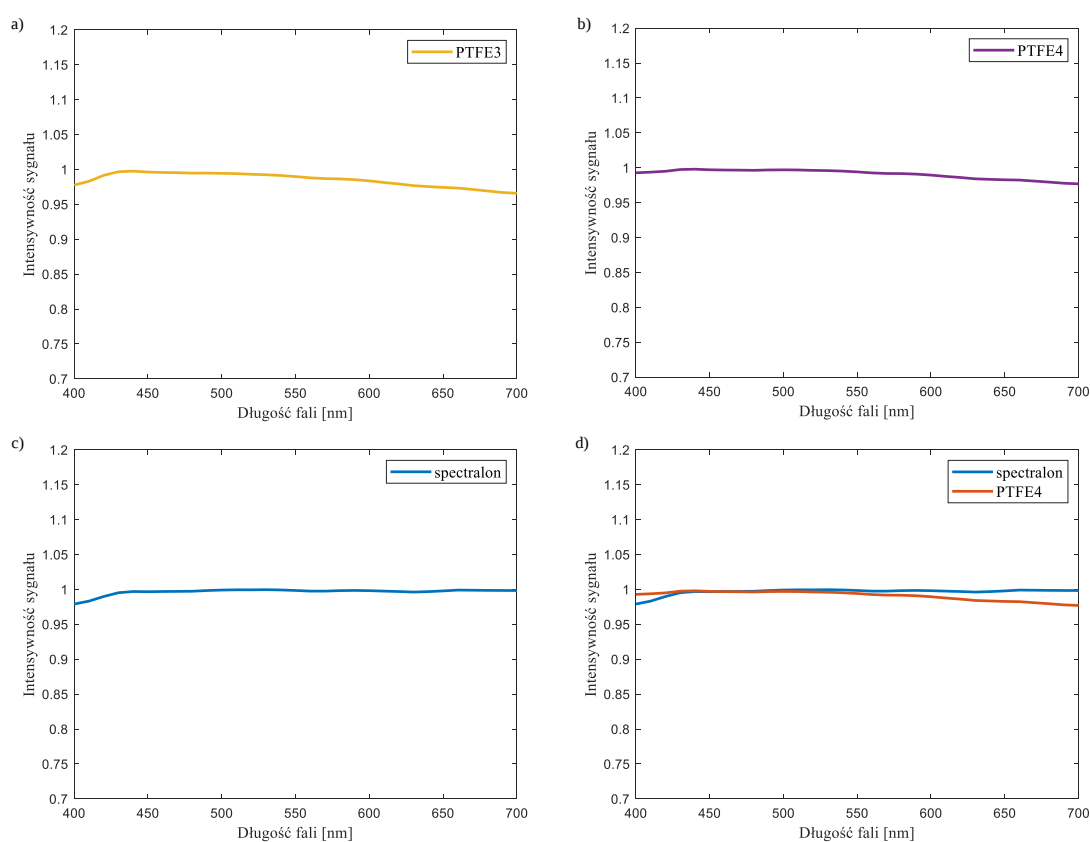
Kamera hiperspektralna Specim FX10 pozwala na pomiar widm w zakresie 400 do 1000 nm, rozdzielczość spektralna 2,7 nm umożliwia pomiar i analizę 224 kanałów spektralnych. Działa w trybie skanującym typowym dla kamer liniowych. Zakres spektralny pozwala nie tylko na rejestrację widm próbek w zakresie widzialnym, ale także częściowo w zakresie bliskiej podczerwieni – NIR. Urządzenie można zamówić w zestawie, w skład którego wchodzi kamera hiperspektralna, statyw wraz z ruchomym stołem pomiarowym oraz dedykowane oświetlenie. Kamerę Specim FX10 można dość łatwo implementować w środowisku przemysłowym, gdyż posiada ona uniwersalne

uchwyty montażowe, a jej specyfika pozwala na dobór oświetlenia w zależności od rodzaju skanowanych powierzchni i oczekiwanej szybkości liniowej skanowanego obszaru. Producent zapewnia możliwość swobodnego wyboru pasm do pomiaru i analizy, dostępne jest też grupowanie wartości rozdzielczości spektralnej i przestrzennej, co pozwala na uzyskanie wyższej wydajności, ale kosztem mniejszej dokładności próbkowania. W zrealizowanej konfiguracji został zastosowany wymienny obiektyw o polu widzenia FOV (ang. Field of View) 38°. Dla tego typu kamery, z interfejsów niezbędnych, pozwalających na transfer danych z urządzenia do stacji roboczej, dostępne są GigE i CameraLink. Ze względu na zastosowanie kamery w warunkach przemysłowych, gdzie duża liczba klatek na sekundę i dokładność w taktowaniu przesyłania danych należą do krytycznych parametrów, wybrany został interfejs CameraLink. Standard ten został zaprojektowany, aby rozwiązać pojawiające się problemy w szybko rozwijającej się dziedzinie systemów wizyjnych w przemyśle (ang. Machine vision). Zaletą CameraLink jest nie tylko duża przepustowość danych, ale także stabilność pracy układu. Ważne jest również zastosowanie okablowania przemysłowego bardziej odpornego na zakłócenia zewnętrzne, co jest szczególnie istotne ze względu na otoczenie o dużym zagęszczeniu urządzeń generujących zakłócenia elektromagnetyczne. W konfiguracji został również użyty Frame Grabber niezbędny do przetwarzania obrazu; z kilku dostępnych opcji, kompatybilnych z wybraną kamerą Specim, zastosowany został Frame Grabber Dalsa Xtium-CL-MX4 firmy Teledyne DALSA, zgodnie z rekomendacją dystrybutora sprzętu Specim. W podstawowej konfiguracji do oświetlenia obrazowanych próbek wykorzystano dwa trzypunktowe rzędy oświetlenia halogenowego z możliwością regulacji kąta i wysokości, a także z dodatkowym chłodzeniem wentylatorami. Każdy z sześciu halogenów posiada moc 20 W, temperaturę barwową 2800 K, strumień świetlny 205 lm i kąt rozpraszania światła wynoszący 36°.



Rys. 53 Spectralon®, wzorzec bieli o wymiarach 200 × 25 × 10 mm.

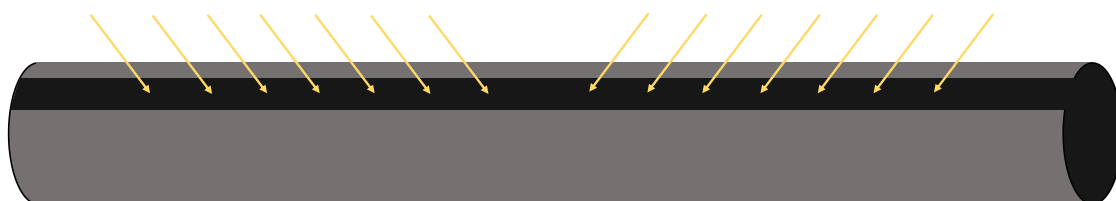
Jako dedykowany wzorzec bieli służy Spectralon®, biała płytka referencyjna, charakteryzująca się współczynnikiem odbicia promieniowania powyżej 99 % w zakresie spektralnym 400 – 1500 nm oraz współczynnikiem odbicia powyżej 95 % w zakresie 250-2500 nm [88]. Spectralon® to z chemicznego punktu widzenia politetrafluoroetylen (PTFE), niemniej fizyczna struktura jest mikroporowata i spieniona. Materiały o zbliżonym składzie chemicznym mogą wykazywać różne właściwości optyczne z powodu innej struktury fizycznej. Wykorzystanie spectralonu, jako wzorca bieli jest dość powszechne, natomiast jest to surowiec dość kosztowny.



Rys. 54 Wykresy widm spektralnych zmierzonych spektrofotometrem Exact firmy X-Rite, a) taśma PTFE o wymiarach $200 \times 10 \times 0,2$ mm, 3 warstwy, b) taśma PTFE o wymiarach $200 \times 10 \times 0,2$ mm, 4 warstwy c) Spectralon® o wymiarach $200 \times 25 \times 10$ mm, d) porównanie spectralonu o wymiarach $200 \times 25 \times 10$ mm i taśmy PTFE o wymiarach $200 \times 10 \times 0,2$ mm w 4 warstwach.

W zastosowaniach przemysłowych, gdzie akceptowalny poziom refleksyjności i rozpraszania wzorca bieli używanego do rutynowych rekaliibracji jest niższy, zastosowanie PTFE o strukturze o wyższej gęstości i innych alternatywnych rozwiązań

jest również możliwe [89]. Na rysunku 54 widać porównanie reflektancji spectralonu i taśmy PTFE wykonanej z materiału o nazwie handlowej teflon, stosowanej do uszczelnień w hydraulice. Pomiary wykazały, że w paśmie VIS dla nałożonych na siebie 4 warstw taśmy o łącznej grubości 0,8 mm otrzymujemy wyniki reflektancji zbliżone do tych charakterystycznych dla spectralonu. Dane spektralne dla wzorca czerni są pozyskiwane poprzez akwizycję obrazu hiperspektralnego przy zamkniętej przesłonie obiektywu, czyli bez dostępu światła. Alternatywnie jako wzorzec czerni mogą zostać zeskanowane powierzchnie o możliwie wysokim współczynniku pochłaniania fal elektromagnetycznych z badanego zakresu. Jednym z testowanych w ramach badań rozwiązań jest cylindryczna rurka metalowa, pomalowana czarną matową farbą zarówno na wewnętrznej, jak i na zewnętrznej powierzchni. Wzorzec został zaprojektowany w trakcie prac wdrożeniowych i przygotowany w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o. Wzdłuż rurki wykonano nacięcie umożliwiające akwizycję linii obrazu z wnętrza. Takie rozwiązanie sprawia, że promienie światła wpadające do szczeliny w wyniku wielokrotnego odbicia się od wewnętrznych ścianek rurki niemal całkowicie się wygaszają.



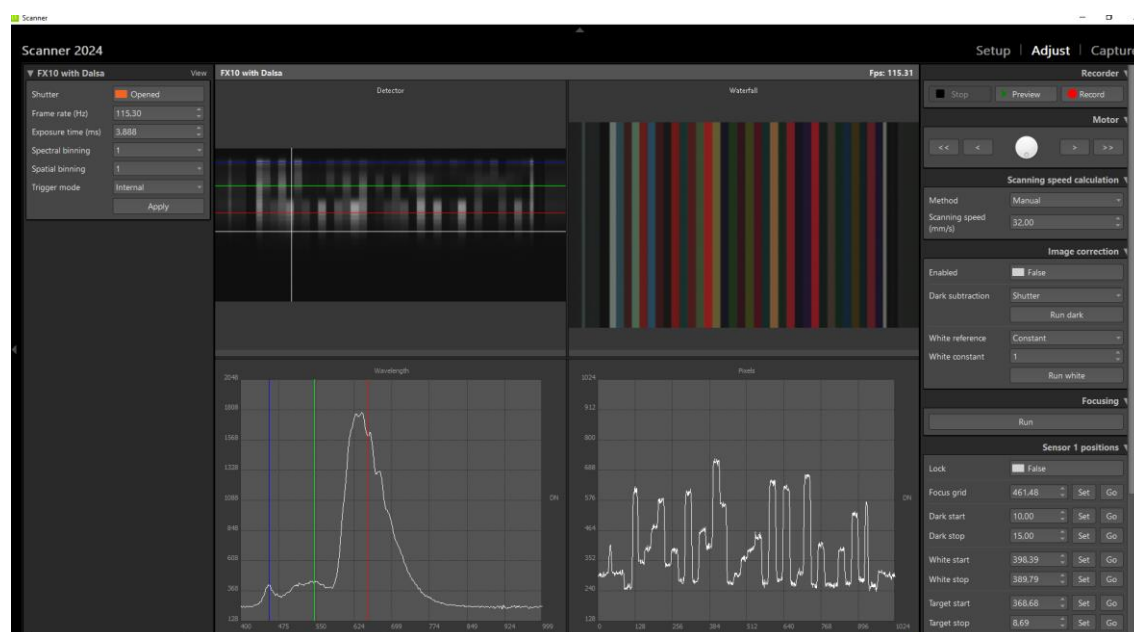
Rys. 55 Cylindryczny wzorzec czerni przygotowany w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o.

Stacja robocza została skonfigurowana zarówno z uwzględnieniem procesu akwizycji obrazów hiperspektralnych, jak i analizy pozyskanych danych z oczekiwaną wydajnością. Bazę stanowi komputer Dell Precision 7960 Tower XCTO z procesorem Intel Xeon w5-3423, kartą graficzną NVIDIA T400, 4 GB pamięci GDDR6, 3 adapterami mDP do DP, 7960T, pamięcią 16 GB DDR5, 4800MHz, w modułach RDIMM z funkcją ECC i dyskiem SSD M.2 PCIe NVMe Class 40. Istotne uzupełnienie konfiguracji stanowią dwie dodatkowe karty graficzne NVIDIA® Tesla™ T4 16 GB, Passive, Single Wide, Full Height GPU dedykowane do wydajnych obliczeń na GPU i uczenia

maszynowego (ang. Machine Learning). Całość działa w oparciu o 64 bitowy system operacyjny Windows 10 Pro firmy Microsoft Corporation.

13.1 Akwizycja obrazów hiperspektralnych

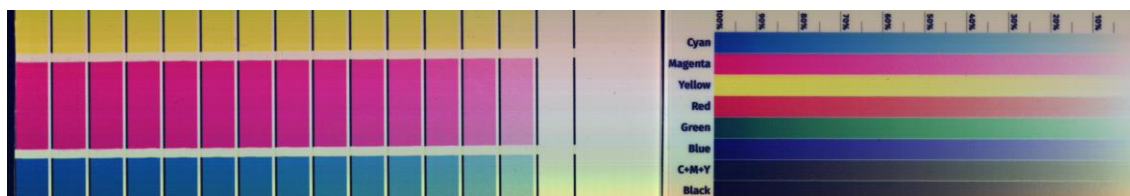
Do akwizycji obrazów hiperspektralnych wykorzystywane jest oprogramowanie Lumo – Scanner 2024.72, które oprócz istotnych parametrów obrazu, pozwala kontrolować również prędkość przesuwu ruchomego stołu roboczego ze skanowaną próbką. Ważnymi elementami konfiguracji w programie do akwizycji obrazów są również liczba klatek na sekundę, czas ekspozycji i ustawienia grupowania dla parametrów rozdzielczości spektralnej i rozdzielczości przestrzennej, ang. spectral binning, spatial binning. Ustawienia binningu przestrzennego pozwalają agregować dane poprzez uśrednianie sąsiadujących pikseli w ramach każdej pobieranej przez kamerę linii pikseli. Binnig spektralny definiuje liczbę zapisywanych kanałów spektralnych. Zarówno binnig przestrzenny, jak i binnig spektralny można ustawić niezależnie, wybierając z listy rozwijanej w programie Lumo – Scanner odpowiednio: 1, 2, 4 lub 8.



Rys. 56 Okno do regulacji ustawień parametrów programu Lumo – Scanner 2024.72 w trakcie akwizycji obrazu hiperspektralnego kamerą Specim FX10 w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o.

Konsekwencją zmiany ustawień binningu, oprócz zmiany rozdzielczości spektralnej i przestrzennej, jest też istotna różnica w wielkości zapisywanych obrazów

hiperspektralnych, a co za tym idzie, ilości niezbędnego miejsca na dysku z danymi. Ilość koniecznych do zapisania i przetworzenia danych jest w kontekście obrazów hiperspektralnych zagadnieniem nietrywialnym, które wymaga sporej uwagi już przy eksperymentach naukowych, zaś w środowisku przemysłowym staje się dużym wyzwaniem. Po zeskanowaniu wybranej próbki, na przykład jednej zadrukowanej wielobarwnie strony formatu A4, otrzymujemy zapisany folder z danymi. Przykładowa struktura danych to folder główny, trzy podfoldery: capture, metadata i calibrations, oraz plik PNG (ang. Portable Network Graphics) będący trójkanałową, wizualną reprezentacją obrazu hiperspektralnego, zapisaną analogicznie do plików w RGB z tym zastrzeżeniem, że R, G i B mogą reprezentować dowolnie wybrane trzy kanały spektralne dla danych długości fali z obrazowanego zakresu spektralnego. Jakość i czytelność uzyskanego na podglądzie obrazu, oprócz wyboru trójkanałowej reprezentacji, zależy od ustawienia ostrości obiektywu, czasu ekspozycji w relacji do oświetlenia i szybkości przesuwania próbki. Warto pamiętać, że niezależnie od wybranej konfiguracji zestawu do akwizycji obrazów hiperspektralnych, w tym kamery, obiektywu, oświetlaczy a także modułów do przesyłania i przetwarzania danych, staranna kalibracja kolejnych elementów podczas akwizycji obrazu zawsze będzie miała znaczący wpływ na jakość danych [90]. Wysoka jakość wizualnej reprezentacji obrazu hiperspektralnego, w tym poprawna geometria i ostrość optyczna, nie jest jeszcze gwarancją równie wysokiej jakości danych hiperspektralnych, natomiast z całą pewnością, wątpliwej jakości trójkanałowy podgląd znacząco zwiększa ryzyko uzyskania niewiarygodnych danych. Do sprawdzenia i ewentualnego skorygowania ustawień akwizycji obrazów można użyć kilku typowych testów, które pozwolą łatwo ocenić ostrość, geometrię czy równomierność oświetlenia.



Rys. 57 Trójkanałowa reprezentacja obrazu hiperspektralnego wykonanego kamerą Specim FX10 z obiektywem Xenoplan 2.8/50-902 dla zakresu 400-1000 nm, przykładowa grafika testowa pozwalająca potwierdzić ustawienia ostrości, jakość przejść tonalnych i dodatkowo brak efektu lustrzanego odbicia na podstawie tekstu opisującego elementy graficzne.

Elementy graficzne o znanych wymiarach i geometrii, jak koła czy kwadraty, wydrukowane kolejno linie o narastającej grubości i szachownice, pozwalają skutecznie wyregulować ostrość i geometrię obrazu [91]. Symulacje graficzne przejść tonalnych, co kilka procent lub płynnie od zera do stu procent to również przykłady takich pomocniczych próbek. Warto zastosować też elementy, które pozwolą nam uniknąć błędu w postaci lustrzanego odbicia, który w zależności od rodzaju obrazowanych próbek może, lecz nie musi być kłopotliwy. Warto mieć świadomość również tej cechy obrazu hiperspektralnego. Grafika testowa przedstawiona na rysunku 57 to reprezentacja obrazu hiperspektralnego próbki drukowanej, o wymiarach 350 mm × 58 mm.

Tabela 2 Wielkości przykładowego obrazu hiperspektralnego w relacji do rozdzielczości przestrzennej oraz rozdzielczości spektralnej dla próbki o wymiarach 350 mm × 58 mm.

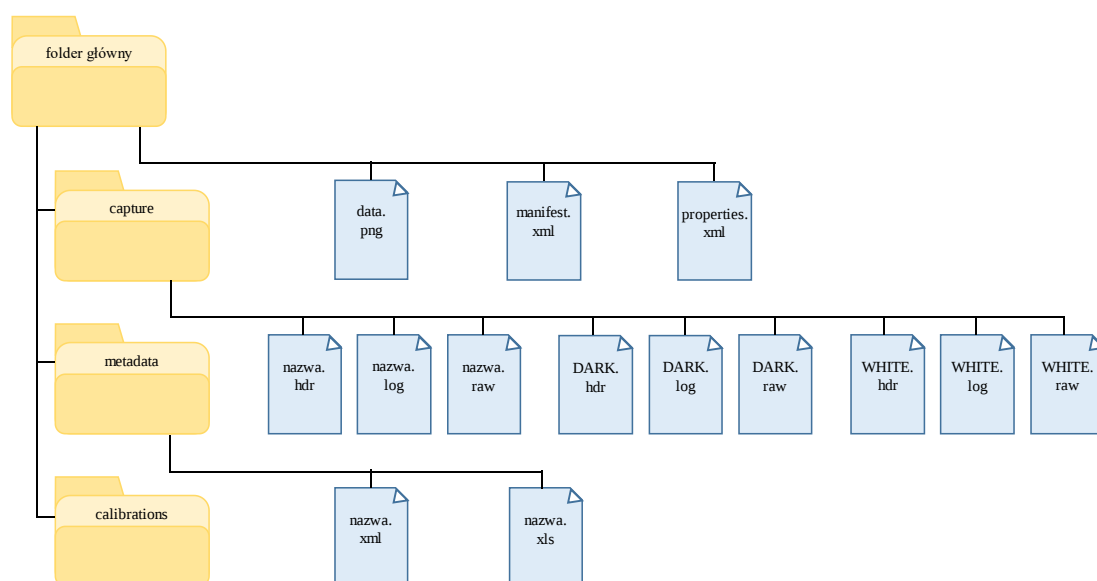
Binning spektralny	Binning przestrzenny	Liczba kanałów spektralnych	Liczba zeskanowanych linii	Liczba pikseli w linii	Wielkość obrazu w MiB
1	1	448	6217	1024	5626,75
2	1	224	6215	1024	2817,94
1	2	448	2763	512	1299,54
2	2	224	2762	512	650,82
8	1	56	5525	1024	634,88
1	4	448	1380	256	346,65
4	1	112	5526	1024	346,65
4	2	112	2763	512	326,85
2	4	224	1382	256	173,95
8	2	56	2762	512	164,78
1	8	448	689	128	97,67
4	4	112	1381	256	87,33
2	8	224	689	128	48,98
8	4	56	1382	256	44,07
8	4	56	1381	256	43,78
8	8	56	690	128	12,49

Próbka ta posłużyła również, jako przykład do przeanalizowania wpływu parametrów rozdzielczości spektralnej i rozdzielczości przestrzennej na wielkość obrazów hiperspektralnych. Kompletny obraz tej próbki po akwizycji dla maksymalnej rozdzielczości spektralnej i przestrzennej zawiera około 5,5 GB danych, dlatego tak

ważnym elementem jest racjonalne zarządzanie ustawieniami już na etapie akwizycji obrazów hiperspektralnych, a później konsekwentnie w kolejnych etapach obróbki i analizy danych. Analiza wielkości obrazów hiperspektralnych w tabeli nr 1 została przygotowana w środowisku PowerShell (64 bit), a wyniki zostały zaprezentowane w jednostkach MiB, gdzie 1 MiB to 1048 576 bajtów.

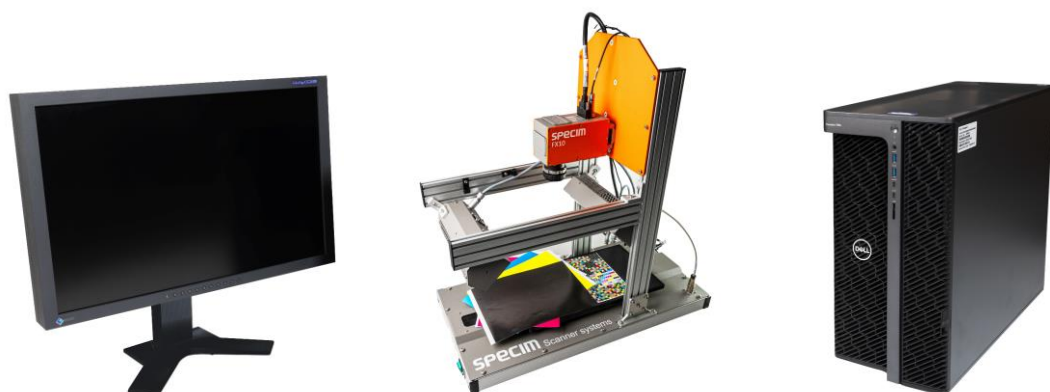
W przypadku analizy obrazów z zakresu widzialnego zwykle wybieramy kanały o długościach fal odpowiadających czerwieni, zieleni i niebieskiemu, by podgląd był czytelny i zbliżony wizualnie do próbki widzianej w świetle dziennym.

Rysunek 58 przedstawia składowe kompletnego obrazu hiperspektralnego. Podfolder 'capture' zawiera 9 plików: 3 pliki typu RAW (ang. raw – surowy) z surowymi danymi spektralnymi zeskanowanej próbki, danymi wzorca bieli i danymi wzorca czerni, 3 pliki typu hdr również po jednym dla próbki, wzorca bieli i wzorca czerni, oraz analogicznie 3 pliki tekstowe z opisem ilości zapisanych ramek obrazu i rejestrem ewentualnych utraconych, niezapisanych prawidłowo ramek, jeśli taki incydent ma miejsce.



Rys. 58 Schemat struktury danych obrazu hiperspektralnego wykonanego kamerą Specim FX10.

Plik hdr (ang. header), czyli plik nagłówkowy zawiera istotne dane o parametrach obrazu hiperspektralnego, informacje o próbce i analogicznie o wzorcu czerni oraz wzorcu bieli. Są to: rodzaj sensora, data akwizycji, nazwa oprogramowania, szerokość obrazu w pikselach, liczba zeskanowanych linii i liczba zarejestrowanych kanałów spektralnych.



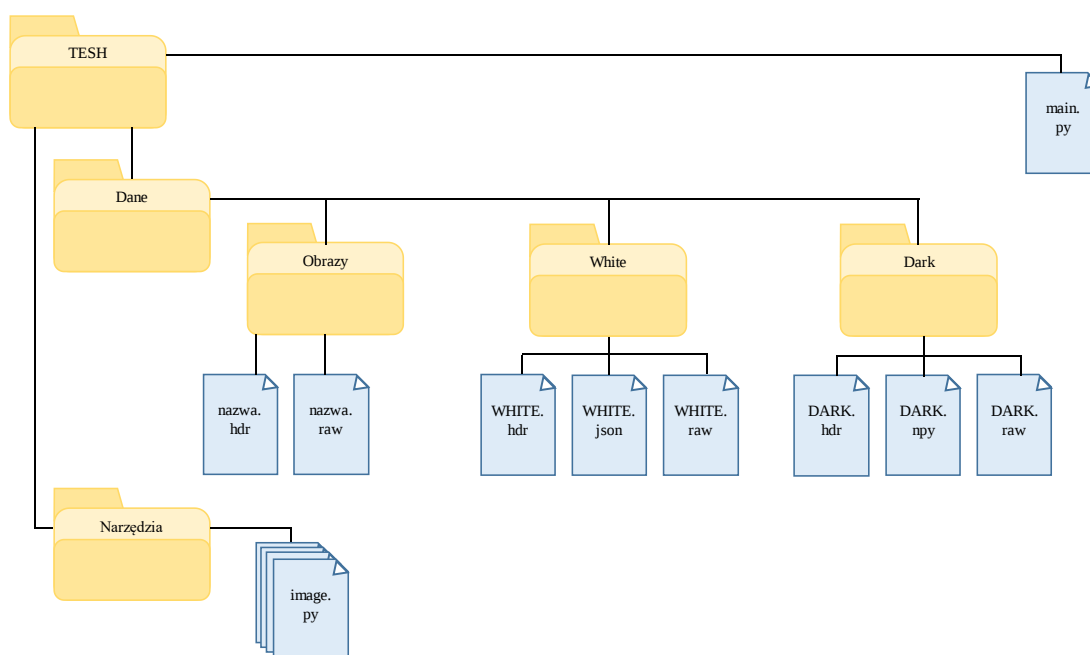
Rys. 59 Wdrożone stanowisko pomiarowe do kontroli jakości produktów poligraficznych z kamerą hiperspektralną FX10 firmy Specim, ruchomym stołem pomiarowym, dedykowanym oświetleniem halogenowym i stacją roboczą wysokiej mocy obliczeniowej w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o.

13.2 Program do analizy danych hiperspektralnych TESH

Prototypowe oprogramowanie do analizy obrazów hiperspektralnych zostało przygotowane w środowisku Python. Program jest zbudowany w oparciu o prosty interfejs tekstowy, natomiast wybór fragmentów obrazu do analizy odbywa się na trójkanałowej reprezentacji graficznej próbki generowanej każdorazowo przez algorytm. Istotną cechą rozwiązania jest arbitralny wybór fragmentów obrazu hiperspektralnego na jego graficznej reprezentacji. Metody oparte o algorytmy maskowania obrazu i separacji tła okazały się niewystarczająco efektywne, zwłaszcza w przypadku konieczności odróżniania subtelnych różnic tonalnych na wydrukach wielobarwnych, wielotonalnych. Na różnice tonalne samej próbki nakładają się dodatkowo różnice intensywności sąsiadujących pikseli, propagowane przez niejednorodność struktury zadrukowanego podłoża. Wielkość pobieranych do analizy fragmentów obrazu jest definiowana wybraną, nieparzystą liczbą pikseli. Przykładowy, ręczny wybór fragmentu obrazu zdefiniowany liczbą 11 pobiera kwadratowy fragment obrazu wielkości 11×11 pikseli, czyli 121 pikseli obrazu hiperspektralnego do analizy. Kliknięciem na graficznej reprezentacji obrazu hiperspektralnego oznaczamy środkowy piksel wybranego fragmentu. Metoda ręcznego wybierania fragmentów obrazu nadaje się do prostych testów, natomiast nie jest optymalna dla większej ilości próbek, ponieważ wybór każdego fragmentu wymaga kolejnego kliknięcia. Jako alternatywa zaprogramowane zostały dwa zautomatyzowane podejścia. Wybór kilku, na przykład 10 próbek tej samej wielkości i w takich samych

odległościach od siebie, jest realizowany poprzez 2 kliknięcia dla skrajnych punktów w orientacji pionowej, poziomej bądź ukośnej. Druga zautomatyzowana metoda pozwala wybrać próbki na planie umownej szachownicy, zaznaczając jej narożne pola, tym sposobem możemy zaznaczyć i pobrać kilkadziesiąt, kilkaset i więcej próbek klikając czterokrotnie. Analityczny moduł programu pozwala na wyliczenie wartości L^* , a^* i b^* dla uśrednionych widm wybranych wcześniej fragmentów obrazu, daje także możliwość wygenerowania PCA.

Pierwszym krokiem, który należy wykonać, by uruchomić program jest umieszczenie niezbędnych plików z obrazu przeznaczonego do analizy, we właściwych lokalizacjach programu TESH. Z wszystkich plików z danego obrazu hiperspektralnego należy pobrać pliki RAW oraz hdr i umieścić je we właściwych folderach programu. W folderze obrazy należy umieścić pliki: nazwa.hdr i nazwa.raw. W folderze white pliki: white.hdr i white.raw. W folderze dark pliki: dark.hdr i dark.raw.



Rys. 60 Schemat struktury folderów i plików w prototypie programu TESH.

Po umieszczeniu odpowiednich plików obrazu hiperspektralnego we właściwych, zgodnych ze strukturą programu TESH folderach, możemy rozpocząć analizę. Uruchomienie programu odbywa się poprzez dwukrotne kliknięcie pliku z rozszerzeniem exe. Użytkownik rozpoczyna komunikację w interfejsie tekstowym (ang. CLI – Command Line Interface) przygotowanym w języku polskim i opcjonalnie w języku angielskim. Wykonując polecenia wyświetlane w oknie tekstowym i odpowiadając na

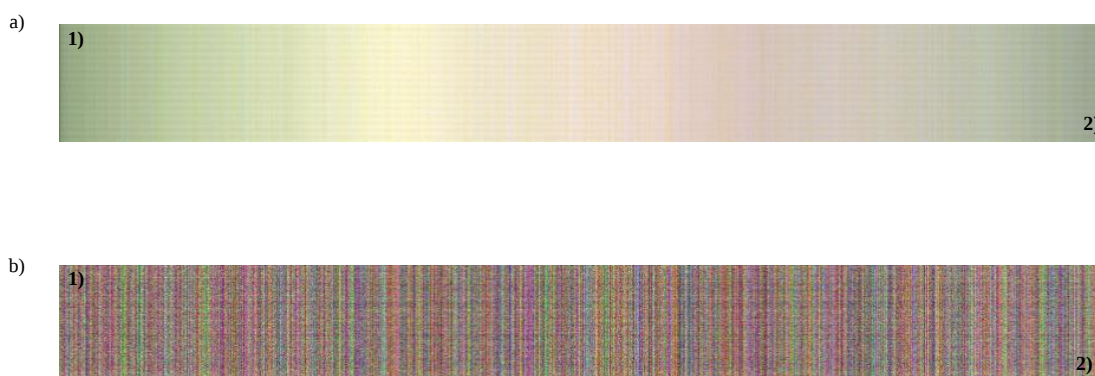
kolejne pytania, dokonujemy wyboru parametrów przygotowania danych i wyboru fragmentów obrazu do analizy.

```
-----
| TESH  An Efficient Python Toolkit for Extraction of Multiple Samples from Large RAW Hyperspectral Images |
| Version: 1.0.0 |
| Author: Mikolaj Wieczorkowski, Pawel Dzik, Bartlomiej Sniezynski |
| Date: 2025-05-01 |
| No Software Warranty. |
| The software is provided 'as-is,' without any warranties of any kind, |
| either express or implied, including but not limited to implied warranties |
| of merchantability or fitness for a particular purpose. |
| The authors are not liable for any damages arising from the use or inability to use the software. |
|-----
Upewnij sie, ze obrazy znajduja sie w odpowiednich folderach na pulpicie
Wcisnij dowolny przycisk by kontynuowac
Czy chcesz uruchomic program z opcja debug (dodatkowe komunikaty)? [Y/n]: n
Zostana uzyte ustawienia bialej referencji z poprzednich uruchomien
Zostana uzyte ustawienia czarnej referencji z poprzednich uruchomien
width : 1024
height : 293
number of bands : 448
starting wavelength : 400.0
ending wavelength : 998.66

Wprowadz wielkosc kwadracika pomiarowego, liczba nieparzysta (np. 5, 7, 11):
```

Rys. 61 Interfejs tekstowy programu TESH wykonanego w ramach wdrożenia stanowiska do kontroli jakości produktów poligraficznych w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o.

Podczas pierwszej analizy danego obrazu hiperspektralnego określamy na graficznym podglądzie obszary referencyjne dla bieli i czerni. Wybór obszaru dokonywany jest poprzez dwa kliknięcia w graficzną reprezentację referencji w programie.



Rys. 62 Reprezentacja graficzna obszarów referencyjnych dla obrazów hiperspektralnych w programie TESH, a) wzorca bieli, b) wzorca czerni. 1) i 2) to przykładowe miejsca wzorców, w które należy kliknąć, by zdefiniować obszar uwzględniany następnie w obliczeniach.

W kolejnych krokach zostają zdefiniowane parametry przed wyborem fragmentów obrazów hiperspektralnych do analizy. Komunikat z interfejsu tekstowego:

'Wprowadz wielkosc kwadracika pomiarowego, liczba nieparzysta (np. 5, 7, 11)

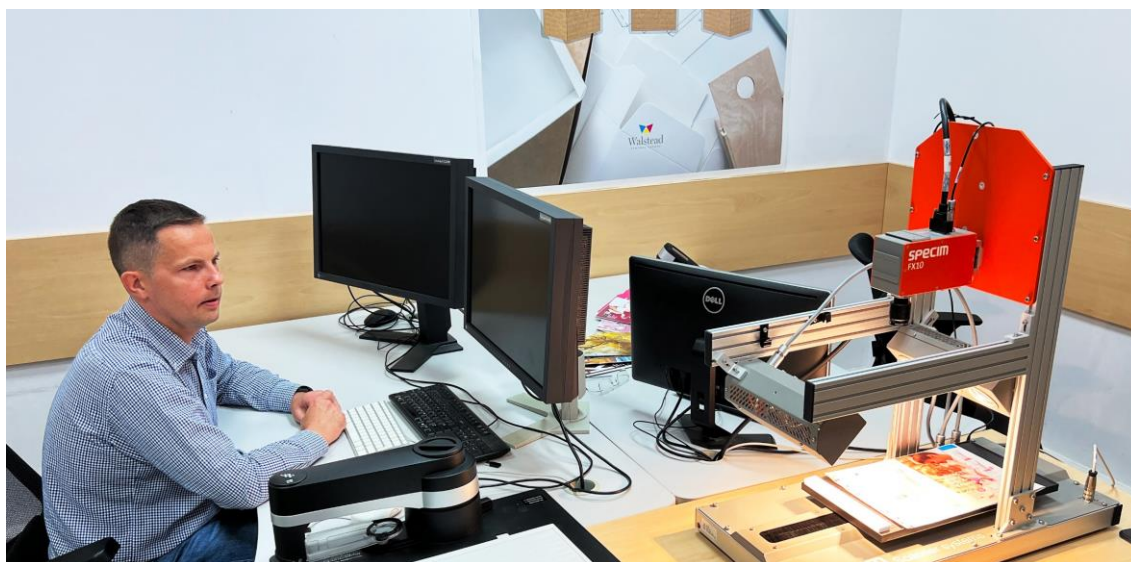
Pozwala zdefiniować wielkość pojedynczego fragmentu obrazu o kwadratowym kształcie i boku o długości w zadanej, nieparzystej liczbie pikseli. W kolejnych komunikatach użytkownik ma możliwość zdefiniować zakres spektralny, który planuje analizować:

'Podaj zakres spektralny w postaci min-max, np. 500-600. Jesli chcesz zachowac pelny zakres z kamery, przyciśnij Enter.\nUwaga, dostepnosc pewnych opcji zalezy od wybrania zakresu

Można także zmienić rozdzielczość spektralną:

'Jesli chcesz zmienic rozdzielczosc spektralna wybierz 1;5;10;20, wcisnij Enter by zachowac domyslne rozdzielczosc kamery nNiektore opcje moga byc niedostepne bez zmiany rozdzielczosci spektralnej

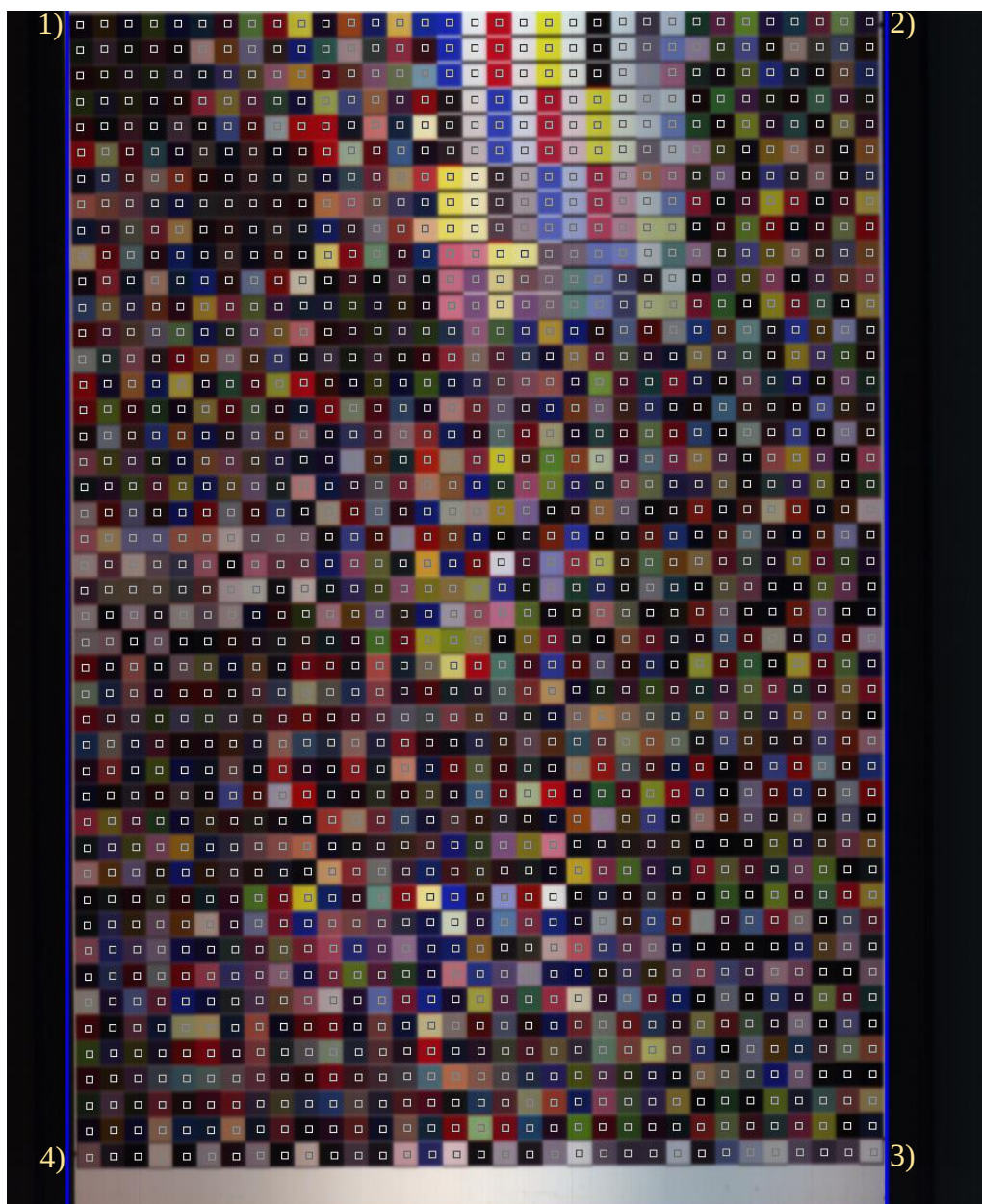
Rozdzielczość spektralną w aktualnej wersji programu można wybierać pomiędzy 1 nm, 5 nm, 10 nm i 20 nm.



Fot. 1 Doktorant podczas pracy przy wdrożonym stanowisku do badania jakości produktów poligraficznych, w obszarze produkcyjnym zakładu zlokalizowanego w Krakowie przy ul. Obrońców Modlina 11 w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o.

Istnieje również możliwość pozostania przy ustawieniach domyślnych, wynikających z konfiguracji samej kamery i oprogramowania do akwizycji obrazów hiperspektralnych.

Jeśli zostanie wybrana inna niż domyślna rozdzielczość spektralna, interpolacja jest dokonywana metodą Sprague-Karup'a [36]. W kolejnych krokach użytkownik decyduje, w jaki sposób mają zostać przetworzone i zaprezentowane dane z wybranych fragmentów obrazu hiperspektralnego.



Rys. 63 Wybór 1485 próbek obrazu hiperspektralnego tablicy testowej, symulującej 1485 różnych składowych CMYK, wydrukowanej z profilem ISO_Coated_v2_eci.icc poprzez cztery kliknięcia w narożne pola 1), 2), 3) i 4), zgodnie z kolejnością zaznaczoną na rysunku w zautomatyzowanym podejściu typu „szachownica”, w autorskim programie do analizy obrazów hiperspektralnych TESH.

Każda próbka to 49 pikseli dla 224 kanałów spektralnych w zakresie 400-700 nm.

Dane w ramach poszczególnych wybranych fragmentów obrazów mogą zostać uśrednione oddzielnie dla każdego fragmentu lub zostać zaprezentowane w postaci osobnych wartości dla każdego piksela.

'Wpisz wybrana strategie automatycznego pobierania probek. (Dostępne strategie {1-pair, 2 -cheesboard}):

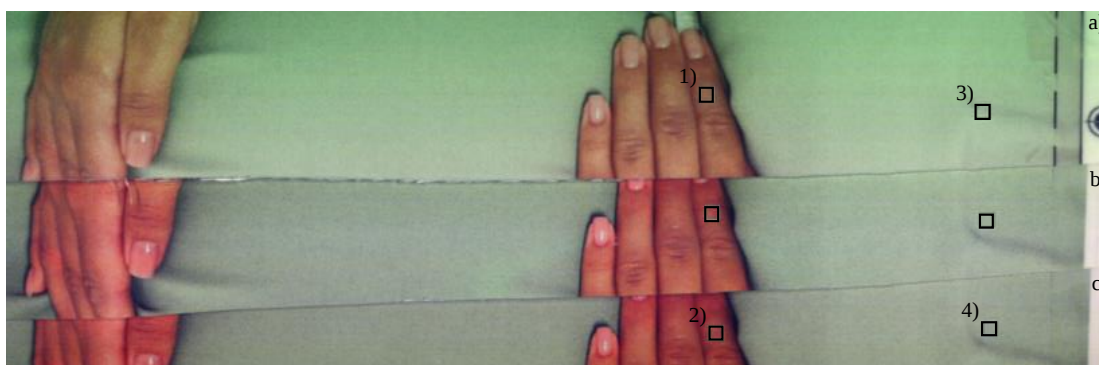
Następnym etapem jest decyzja o wyborze ręcznym fragmentów obrazów do dalszej analizy, lub wybór jednej ze strategii wyboru zautomatyzowanego. Są to „pary” dające możliwość wyboru rzędu próbek ułożonych w takich samych odległościach względem siebie, lub analogicznie w formie tak zwanej „szachownicy”. Na kolejnych etapach należy jeszcze powziąć decyzję o korekcji do białej i czarnej referencji lub z niej zrezygnować.

'Czy chcesz dokonac korekcji obrazu ze wzgledu na biala i czarna referencje oraz oswietlenie? [Y/n]: '

Teraz możemy wybrać, czy chcemy wykonać analizę PCA, wyliczyć parametry XYZ zgodnie z zaleceniami CIE oraz wartości $L^* a^* b^*$, jeśli wybraliśmy wcześniej parametry odpowiednie do tego rodzaju obliczeń.

'Czy chcesz dokonac analizy PCA? [Y/n]:'

Jeśli wybraliśmy wąski zakres spektralny do analizy, na przykład 400-500 nm, to poprawne wyliczenia $L^* a^* b^*$ nie będą możliwe.



Rys. 64 Wybór 6 próbek obrazu hiperspektralnego pobranego w ramach jednego skanu dla: a) wzoru koloru, b) pierwszej próbki z druku, c) drugiej próbki z druku, poprzez kliknięcia w pola 1), 2), 3) i 4), zgodnie z kolejnością zaznaczoną na rysunku w zautomatyzowanym podejściu typu „pary”, w autorskim programie do analizy obrazów hiperspektralnych TESH. Każda próbka to 225 pikseli dla 112 kanałów spektralnych w zakresie 400-700 nm.

14. Wnioski

W dysertacji dowiodłem, że obrazowanie hiperspektralne jest skutecznym narzędziem kontroli jakości zadrukowanych powierzchni zarówno z wykorzystaniem tradycyjnych modeli kolorów, jak również w nowo proponowanym podejściu w oparciu o bezpośrednią analizę widm spektralnych. Wykazałem również, że podejście opracowane na potrzeby oceny kolorów znajdujących się na produktach poligraficznych będzie miało szersze zastosowanie wszędzie tam, gdzie kolory należą do istotnych wskaźników jakości. Szereg testów z wykorzystaniem obrazowania nie tylko w zakresie VIS, ale także NIR pozwolił rozszerzyć możliwości klasyfikacji próbek, zwiększając równocześnie skuteczność i elastyczność wprowadzonych podejść badawczych. Wizualizacja przebiegu procesu druku w postaci elips, w oparciu o analizę statystyczną widm, pozwoliła wykazać większą dokładność i efektywność zaproponowanego podejścia w porównaniu do dotychczas stosowanych metod.

W aspektach wdrożeniowych, stosowne testy potwierdziły właściwy dobór platformy sprzętowej oraz możliwość jej dalszego skalowania odpowiednio do specyfiki środowiska przemysłowego. Zastosowanie systemu eksperckiego, zbudowanego w oparciu o PCA i SIMCA, otworzyło nowe możliwości monitorowania zmian procesowych podczas druku. Strategia analizowania uporządkowanych, kilkupikselowych fragmentów obrazów hiperspektralnych, traktowanych jako reprezentatywne próbki badanych powierzchni, pozwoliła w sposób istotny zoptymalizować ilość danych i czas poszczególnych iteracji badawczych. Zautomatyzowana metoda precyzyjnego pobierania próbek z obszernych danych hiperspektralnych w sposób arbitralny, pozwala uniknąć ryzyka istotnych błędów przy analizie statystycznej wydruków wielokolorowych o dużej i złożonej graficznie powierzchni. Potwierdzone testami, możliwości zrównoleglenia obliczeń pozwalają na uzyskanie oczekiwanej wydajności działania systemu i realizację pojedynczych analiz jakościowych w czasie rzeczywistym.

15. Plany badawcze

Niewątpliwie, przedmiotem dalszych pogłębionych badań z zastosowaniem uczenia maszynowego na dużych zbiorach próbek produkcyjnych, będzie zagadnienie automatycznego wyboru najbardziej reprezentatywnych próbek w postaci fragmentów obrazów. Udoskonalenie strategii wyboru próbek, zarówno pod względem ilościowym jak i jakościowym, w sposób istotny wpłynie na dalszą optymalizację ilości koniecznych do przetworzenia danych w postaci widm spektralnych. Zastosowane we wdrożonym w firmie Walstead Kraków Sp. z o.o. rozwiązaniu systemy eksperckie będą nadal doskonalone i rozwijane. Kwestia optymalizacji przepływu danych w postaci dużych obrazów hiperspektralnych na etapie akwizycji obrazu, także ze względów praktycznych, pozostanie w kręgu moich zainteresowań badawczych.

Lepsza kontrola akwizycji, przepływu i analizy dużych zbiorów widm spektralnych pozwoli rozszerzyć badania o sprawdzenie możliwości skanowania i monitorowania w sposób ciągły zadrukowanej wstęgi papieru.

16. Podziękowania

W sposób szczególny pragnę podziękować prof. dr. hab. Michałowi Daszykowskiemu. Jego nieoceniona cierpliwość i determinacja podczas realizacji kolejnych celów naukowych, była dla mnie inspirująca; wzmocniła w istotnym stopniu nie tylko moje kompetencje badawcze, ale także charakter i wytrwałość.

Ogromne podziękowania kieruję do pani Prezes Katarzyny Rybickiej, bo to dzięki Jej pełnemu wiary we mnie wsparciu, rozpoczęcie projektu i realizacja wdrożenia mogły się urzeczywistnić.

Serdecznie dziękuję dr. hab. Bartłomiejowi Śnieżyńskiemu, prof. AGH za konsultacje eksperckie, które pomogły mi w realizacji wdrożenia.

Dziękuję Mikołajowi Wieczorkowskiemu, za pomoc w szukaniu najlepszych rozwiązań podczas realizacji wdrażanego programu TESH i skuteczne zaprogramowanie w Pythonie wszystkich moich pomysłów.

Swoją wdzięczność wyrazić chciałbym również wobec:

Dr hab. Ivany Stanimirowej-Daszykowskiej, prof. UŚ – za cenne rady i wartościowe dyskusje,

Dr. Łukasza Pieszcza – za bardzo praktyczną pomoc podczas nauki obsługi aparatury badawczej i nieustanną życzliwość,

Joanny Janiszewskiej – za wszystko, czego nauczyła mnie o zarządzaniu barwą,

Andrzeja Martyniaka – za cenne, krytyczne uwagi dotyczące kwestii redakcyjnych.

Na koniec chciałbym podziękować mojej żonie Beacie, synowi Piotrowi i córce Emilii za wsparcie i wyrozumiałość w tym pełnym satysfakcji, ale bardzo wymagającym dla mnie czasie pracy nad doktoratem.

17. Źródła finansowania

Przedstawione w dysertacji badania, oraz zaprezentowane i opisane wdrożenie były finansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach V edycji programu „Doktorat Wdrożeniowy”, projekt DWD/5/0244/2021. Tytuł projektu: Badanie jakości produktów poligraficznych przy użyciu kamer hiperspektralnych ze szczególnym uwzględnieniem barwy.

Dodatkowe finansowanie zapewnił Uniwersytet Śląski w Katowicach poprzez dostęp do infrastruktury badawczej, realizację programu Szkoły Doktorskiej, w tym konkursy dla doktorantów oraz finansowanie tutoringów eksperckich zarówno z ekspertem z Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, jak i z ekspertem zewnętrznym z Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Zestaw urządzeń niezbędnych do realizacji wdrożenia stanowiska do badania jakości produktów poligraficznych przy użyciu kamery hiperspektralnej, dostęp do infrastruktury przemysłowej, infrastruktury informatycznej oraz niezbędne próbki do badań zostały sfinansowane przez firmę Walstead Kraków Sp. z o.o.

Bibliografia

- [1] International Organization for Standardization, ISO 12647-2:2013. Graphic technology – Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints, Geneva, Switzerland, 2013.
- [2] P. Dzik, Ł. Pieszczyk, M. Daszykowski, Toward more efficient and effective color quality control for the large-scale offset printing process, *J. Chemom.* 38 (2024) e3543. <https://doi.org/10.1002/cem.3543>.
- [3] A. Zausznica, *Nauka o barwie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013.
- [4] S. Jakuciewicz, Kolor czy barwa – jak to w końcu jest?, *Świat Druku* 6 (2023).
- [5] S. Klein, P. Elter, The Tartan Ribbon or Further Experiments of Maxwell's Disappointment/Sutton's Accident, *Heritage* 6 (2023) 968–978. <https://doi.org/10.3390/heritage6020054>.
- [6] V. De Seauve, M. A. Languille, M. Kociak, S. Belin, J. Ablett, C. Andraud, O. Stéphan, J. Rueff, E. Fonda, B. Lavédrine, Spectroscopies and electron microscopies unravel the origin of the first colour photographs, *Angew. Chem. Int. Ed.* 59 (2020) 9113–9119. <https://doi.org/10.1002/anie.202001241>.
- [7] G. Wyszecki, W.S. Stiles, *Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae*, Wiley classics library ed, John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [8] D.C. Harris, *Quantitative chemical analysis*, 7th ed., Freeman, New York, 2007.
- [9] J. Blackley, Car Color and Resale Value: What the Color of Your Car Says About Its Worth, *iSeeCars.com* (2023). <https://www.iseecars.com/car-color-study> (accessed May 22, 2025).
- [10] D. A. de Paula Vieira, M. Caliari, E. R. Barboza de Souza, M. S. Soares Júnior, Methods for pigments extraction and determination of color in tomato for processing cultivars, *Food Sci. Technol.* 40 (2020) 11–17. <https://doi.org/10.1590/fst.42217>.
- [11] A. Amr, W. Raie, Tomato Components and Quality Parameters: a review, *Jordan J. Agric. Sci.* 18 (2022) 199–220. <https://doi.org/10.35516/jjas.v18i3.444>.
- [12] E. Aghdamifar, V. Rasooli Sharabiani, E. Taghinezhad, A. Rezvanivand Fanaei, M. Szymanek, Non-destructive method for identification and classification of varieties and quality of coffee beans based on soft computing models using VIS/NIR spectroscopy, *Eur. Food Res. Technol.* 249 (2023) 1599–1612. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04240-x>.

- [13] X. Luo, A. Zaitoon, L. T. Lim, A review on colorimetric indicators for monitoring product freshness in intelligent food packaging: Indicator dyes, preparation methods, and applications, *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 21 (2022) 2489–2519. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12942>.
- [14] Özge Dilgen, D. Hasirci, Effect of retail lighting on product color perception and user satisfaction, *Sanat Ve Tasarim Derg.* 12 (2022) 617–630. <https://doi.org/10.20488/sanattasarim.1221936>.
- [15] W. Chen, X. Wu, Z. Liu, Y. Liu, Q. Liu, M.R. Pointer, J. Liang, T.Q. Khanh, The impact of illuminance level, correlated colour temperature and viewing background on the purchase intention for bread and cakes, *Food Qual. Prefer.* 98 (2022) 104537. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104537>.
- [16] S. Moon, Y. Chae, Quantitative analysis of the color accuracy and reproducibility in digital textile printing: Discrepancies within color reproduction media, *Text. Res. J.* 95 (2025) 1053–1069. <https://doi.org/10.1177/00405175241288229>.
- [17] A. K. Samanta, Advanced Methods and Tools for Color Measuring and Matching: for Quality Check of Colored Products of Textiles and Apparel Industry, in: A. K. Samanta (Ed.), *Adv. Color.*, IntechOpen, 2024. <https://doi.org/10.5772/intechopen.114181>.
- [18] Y. Chae, A spectral reflectance-based approach for formulating color mixing recipes for single- and multi-layered woven structures, *Sci. Rep.* 12 (2022) 15213. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19578-7>.
- [19] B. Sreedha, P. R. Nair, R. Maity, Non-invasive early diagnosis of jaundice with computer vision, *Procedia Comput. Sci.* 218 (2023) 1321–1334. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.111>.
- [20] J.N. Kather, A. Weidner, U. Attenberger, Y. Bukschat, C.-A. Weis, M. Weis, L.R. Schad, F.G. Zöllner, Color-coded visualization of magnetic resonance imaging multiparametric maps, *Sci. Rep.* 7 (2017). <https://doi.org/10.1038/srep41107>.
- [21] G. Lu, B. Fei, Medical hyperspectral imaging: a review, *J. Biomed. Opt.* 19 (2014) 010901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.1.010901>.
- [22] J. Mutanen, T. Jaaskelainen, J. P. S. Parkkinen, Luminescent security properties of banknotes, In: *Proceedings of the PICS Conference, IS&T*, 2003. https://www.researchgate.net/publication/220865303_Luminescent_Security_Properties_Of_Banknotes (accessed June 4, 2025).

- [23] Europol, Criminal group forging over 12 000 official documents halted in Poland, Europol (2024). <https://www.europol.europa.eu> (accessed June 4, 2025).
- [24] A. L. Friedberg, European bank reports on euro note counterfeiting, CoinWorld (2024). <https://www.coinworld.com/news/paper-money/european-bank-reports-on-euro-note-counterfeiting> (accessed June 4, 2025).
- [25] Narodowy Bank Polski, Charakterystyka banknotu o nominale 500 zł, Nar. Bank Pol. (2025). <https://nbp.pl/banknoty-i-monety/banknoty-obiegowe/500-zl/> (accessed June 4, 2025).
- [26] S. J. Murdoch, Software detection of currency, Steven J Murdoch (2025). <https://murdoch.is/projects/currency/> (accessed June 26, 2025).
- [27] S. Mansour, Ink protection of security documents, Nowa Kodyfikacja Prawa Karnego 49 (2019) 77–101. <https://doi.org/10.19195/2084-5065.49.7>.
- [28] P. C. Mahalanobis, Reprint of: On the Generalised Distance in Statistics, Sankhya 80 (2018) 1–7. <https://doi.org/10.1007/s13171-019-00164-5>.
- [29] R. Rendsvig, J. Symons, Y. Wang, Epistemic Logic, Stanf. Encycl. Philos. (2023). <https://plato.stanford.edu/entries/logic-epistemic/#Intr> (accessed August 9, 2025).
- [30] R. A. Fisher, The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems, Ann. Eugen. 7 (1936) 179–188. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1936.tb02137.x>.
- [31] R. G. Brereton, G. R. Lloyd, Partial least squares discriminant analysis: taking the magic away, J. Chemom. 28 (2014) 213–225. <https://doi.org/10.1002/cem.2609>.
- [32] L. Breiman, Classification and regression trees, Wadsworth & Brooks/Cole, Pacific Grove, Calif, 1984.
- [33] J. Yen, Fuzzy logic-a modern perspective, IEEE Trans. Knowl. Data Eng. 11 (1999) 153–165. <https://doi.org/10.1109/69.755624>.
- [34] P. Filzmoser, S. Serneels, R. Maronna, P.J. Van Espen, Robust Multivariate Methods in Chemometrics, in: S.D. Brown, R. Tauler, B. Walczak (Eds.), Comprehensive Chemometrics, Elsevier, 2009, pp. 681–722. <https://doi.org/10.1016/B978-044452701-1.00113-7>.
- [35] P. W. Atkins, J. de Paula, Atkins' physical chemistry, 10th ed., Oxford University Press, Oxford, 2014.
- [36] S. Westland, C. Ripamonti, V. Cheung, Computational colour science using MATLAB, Wiley, Chichester, 2012.

- [37] International Organization for Standardization, ISO 13655:2017 Graphic technology – Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images, ISO, Geneva, 2017.
- [38] Commission Internationale de l’Eclairage (CIE), Recommended Practice for Tabulating Spectral Data for Use in Colour Computations, CIE, 2005.
- [39] W. S. Mokrzycki, M. Tatol, Colour difference dE – a survey, *Mach. Graph. Vis.* 20 (2011) 383–411.
- [40] X-Rite, PantoneLIVE Design, X-Rite (2025).
<https://www.xrite.com/categories/digital-color-standards/pantone-live-design> (accessed March 1, 2025).
- [41] Commission Internationale de l’Eclairage, CIE Standard illuminant D50, CIE (2025). <https://cie.co.at/datatable/cie-standard-illuminant-d50> (accessed February 3, 2025).
- [42] Commission Internationale de l’Eclairage, CIE Standard illuminant D65, CIE (2025). <https://cie.co.at/datatable/cie-standard-illuminant-d65> (accessed February 3, 2025).
- [43] A. Sharma, E. Leung, R. Adams, Evaluation of intermodel agreement using ISO 13655 M0, M1, and M2 measurement modes in commercial spectrophotometers, *Color Res. Appl.* 42 (2017) 27–37. <https://doi.org/10.1002/col.22045>.
- [44] S. Gustavson, Dot gain in colour halftones, Linköping University, Linköping, 1997.
- [45] International Organization for Standardization, ISO 3664:2000. Viewing conditions – Graphic technology and photography, ISO, Geneva, Switzerland, 2000.
- [46] C. Aydemir, Y. Semiha, S. A. Özsoy, Effects of Ink Consumption on Print Quality on Coated Cellulose-Based Paper Surfaces, *Cellul. Chem. Technol.* 54 (2020) 89–94. <https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2020.54.10>.
- [47] Heidelberg, Poradnik. Barwa i Jakość, (2021).
https://www.heidelberg.com/pl/media/local_media/publications/Poradnik_Barwa_i_Jakosc_2021_www.pdf (accessed May 3, 2025).
- [48] R. A. Fisher, W. A. Mackenzie, Studies in crop variation. II. The manurial response of different potato varieties, *J. Agric. Sci.* 13 (1923) 311–320.
<https://doi.org/10.1017/S0021859600003592>.

- [49] H. Hotelling, Analysis of a complex of statistical variables into principal components, *J. Educ. Psychol.* 24 (1933) 417–441.
<https://doi.org/10.1037/h0071325>.
- [50] M. Daszykowski, B. Walczak, *Analiza czynników głównych i inne metody eksploracji danych*, Uniwersytet Śląski, Katowice, 2008.
- [51] S. Wold, K. Esbensen, P. Geladi, Principal component analysis, *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 2 (1987) 37–52. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(87\)80084-9](https://doi.org/10.1016/0169-7439(87)80084-9).
- [52] C. Spearman, “General intelligence”, objectively determined and measured, *Am. J. Psychol.* 15 (1904) 201. <https://doi.org/10.2307/1412107>.
- [53] S. Wold, M. Sjöström, SIMCA: A method for analyzing chemical data in terms of similarity and analogy, in: *Chemom. Theory Appl.* Ed. BR Kowalski, American Chemical Society, Washington, DC, 1977: pp. 243–282.
<https://doi.org/10.1021/bk-1977-0052.ch012>.
- [54] M. Forina, P. Oliveri, S. Lanteri, M. Casale, Class-modeling techniques, classic and new, for old and new problems, *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 93 (2008) 132–148. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2008.05.003>.
- [55] M. Daszykowski, K. Kaczmarek, I. Stanimirova, Y. Vander Heyden, B. Walczak, Robust SIMCA-bounding influence of outliers, *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 87 (2007) 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2006.10.003>.
- [56] M. Daszykowski, J. Orzel, M.S. Wrobel, H. Czarnik-Matusewicz, B. Walczak, Improvement of classification using robust soft classification rules for near-infrared reflectance spectral data, *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 109 (2011) 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2011.08.004>.
- [57] I Stanimirova, M Daszykowski, B Walczak, Dealing with missing values and outliers in principal component analysis, *Talanta* 72 (2007) 172–178.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.10.011>.
- [58] I. Stanimirova, B. Walczak, Classification of data with missing elements and outliers, *Talanta* 76 (2008) 602–609. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.03.049>.
- [59] M.P. Derde, D.L. Massart, Comparison of the performance of the class modelling techniques UNEQ, SIMCA, and PRIMA, *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 3 (1988) 205–217. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(88\)80013-3](https://doi.org/10.1016/0169-7439(88)80013-3).
- [60] E. Hecht, *Optyka*, Wydanie I-3 (dodruk), PWN, Warszawa, 2020.
- [61] K. H. Esbensen, *Introduction to the theory and practice of sampling*, IMP Open, Chichester, 2020.

- [62] A. Niederliński, Regułowo-modelowe systemy ekspertowe rmse, Gliwice, 2013.
<http://www.rmse.pl>
- [63] A. Niederliński, Systemy ekspertowe dla automatyzacji zarządzania, Gliwice, 2017.
- [64] K. Blachowski, Wpływ struktury rastrowej reprodukcji triadowej na obszar barw odtwarzalnych procesu reprodukcji, *Przegląd Pap.* 66 (2010) 735–742.
- [65] A. Verikas, J. Lundström, M. Bacauskiene, A. Gelzinis, Advances in computational intelligence-based print quality assessment and control in offset colour printing, *Expert Syst. Appl.* 38 (2011) 13441–13447.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.035>.
- [66] T.W. Vanderah, D. J. Gould, Nolte's the Human Brain: An Introduction to Its Functional Anatomy, 8th ed., Elsevier, Philadelphia, PA, 2021.
- [67] Recommended system for mesopic photometry based on visual performance: technical report, CIE Central Bureau, Vienna, 2010.
- [68] A. J. Zele, D. Cao, Vision under mesopic and scotopic illumination, *Front. Psychol.* 5 (2015). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01594>.
- [69] S. Anstis, The Purkinje rod-cone shift as a function of luminance and retinal eccentricity, *Vision Res.* 42 (2002) 2485–2491. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(02\)00267-5](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(02)00267-5).
- [70] M. Smith, Mechanisms and genetics of neurodevelopmental cognitive disorders, Academic Press, London, United Kingdom ; San Diego, CA, United States, 2021.
- [71] C. Riener, New Approaches and Debates on Top-Down Perceptual Processing, *Teach. Psychol.* 46 (2019) 267–272. <https://doi.org/10.1177/0098628319853943>.
- [72] S. A. Henley, M. D. Fairchild, Quantifying Mixed Adaptation in Cross-Media Color Reproduction, *Color Imaging Conf.* 8 (2000) 305–310.
<https://doi.org/10.2352/CIC.2000.8.1.art00055>.
- [73] T. W. Cronin, N. J. Marshall, A retina with at least ten spectral types of photoreceptors in a mantis shrimp, *Nature* 339 (1989) 137–140.
<https://doi.org/10.1038/339137a0>.
- [74] N. S. Hart, D. M. Hunt, Avian Visual Pigments: Characteristics, Spectral Tuning, and Evolution, *Am. Nat.* 169 (2007) S7–S26. <https://doi.org/10.1086/510141>.
- [75] G. Jordan, S.S. Deeb, J.M. Bosten, J.D. Mollon, The dimensionality of color vision in carriers of anomalous trichromacy, *J. Vis.* 10 (2010) 12.
<https://doi.org/10.1167/10.8.12>.

- [76] J. Lee, N. Jennings, V. Srivastava, R. Ng, Theory of Human Tetrachromatic Color Experience and Printing, *ACM Trans. Graph.* 43 (2024).
<https://doi.org/10.1145/3658232>.
- [77] R. Ng, Digital light field photography, PhD Thesis, Stanford University, 2006.
<https://people.eecs.berkeley.edu/~ren/thesis/renng-thesis.pdf> (accessed August 25, 2025).
- [78] V. Opoku-Yamoah, S. J. Dain, J. K. Hovis, Aging and Color Vision: A Model Using the Farnsworth-MUNSELL 100-Hue Test, *Color Res. Appl.* (2025) col.22983. <https://doi.org/10.1002/col.22983>.
- [79] S. Tamura, K. Sato, Age-related changes in visual search: manipulation of colour cues based on cone contrast and opponent modulation space, *Sci. Rep.* 10 (2020) 21328. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78303-4>.
- [80] A. Hamrol, Zarządzanie jakością z przykładami, Wyd. 2 zm, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2008.
- [81] A. Bitkowska, Zarządzanie procesowe w organizacjach: podejście klasyczne i nowe koncepcje, Wydanie I, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2021.
- [82] Procemex, *Www.Procemex.Com* (2025). <https://www.procemex.com/web-monitoring/> (accessed May 8, 2025).
- [83] W. Yangping, X. Shaowei, Z. Zhengping, S. Yue, Z. Zhenghai, Real-time defect detection method for printed images based on grayscale and gradient differences, *J. Eng. Sci. Technol. Rev.* 11 (2018) 180–188.
<https://doi.org/10.25103/jestr.111.22>.
- [84] IPQ Spectral Technical Data, BST Elexis Group (2025).
<https://www.bst.elexis.group/loesungen/print-production/ipq-spectral-technical-data> (accessed May 8, 2025).
- [85] W. A. Shewhart, *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, Martino Publishing, Mansfield Centre, CT, 2015.
- [86] M. Daszykowski, K. Kaczmarek, Y. Vander Heyden, B. Walczak, Robust statistics in data analysis — A review, *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 85 (2007) 203–219.
<https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2006.06.016>.
- [87] P. Rousseeuw, Multivariate Estimation with High Breakdown Point, in: W. Grossmann, G. Ch. Pflug, I. Vincze, W. Wertz (Eds.), *Math. Stat. Appl.*, Springer

- Netherlands, Dordrecht, 1985: pp. 283–297. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5438-0_20.
- [88] Labsphere, Spectralon® Diffuse Reflectance Material, Labsphere (2025). <https://www.labsphere.com/wp-content/uploads/2023/01/Spectralon-Diffuse-Reflectance-Material-Tech-Guide.pdf> (accessed April 8, 2025).
- [89] M. Janecek, Reflectivity Spectra for Commonly Used Reflectors, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 59 (2012) 490–497. <https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2183385>.
- [90] R. Pillay, M. Picollo, J. Y. Hardeberg, S. George, Evaluation of the Data Quality from a Round-Robin Test of Hyperspectral Imaging Systems, *Sensors* 20 (2020) 3812. <https://doi.org/10.3390/s20143812>.
- [91] M. L. Henriksen, W. N. Pedersen, P. Klarskov, M. Hinge, One step calibration of industrial hyperspectral cameras, *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 227 (2022) 104609. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2022.104609>.

Curriculum Vitae

Paweł Dziki

E-mail: pawel.d.dziki@gmail.com

Researchgate:

<https://www.researchgate.net/profile/Pawel-Dziki-2>

Google scholar:

<https://scholar.google.com/citations?user=6DjkEHEAAAAJ>

ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-4233-2834>



Wykształcenie

10.2021 – 09.2025 Uniwersytet Śląski w Katowicach, Szkoła Doktorska – doktorat wdrożeniowy; Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych, Nauki Chemiczne.

10.2004 – 06.2009 Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie, Wydział Humanistyczny, Filologia polska, Edytorstwo i komunikacja medialna, jednolite studia magisterskie.

09.1993 – 06.1998 Zespół Szkół Poligraficzno-Księgarskich im. Zenona Klemensiewicza w Krakowie, Technikum Poligraficzne, maszynowe techniki drukarskie.

Doświadczenie zawodowe

10.2018 – obecnie Specjalista ds. projektów sprzedażowych, Walstead Central Europe

Zakres obowiązków:

Przygotowywanie ofert produktów i usług dla nowych oraz obecnych klientów w ramach pracy w międzynarodowym zespole. Estymowanie kosztów, analiza zyskowności. Dobieranie oraz optymalizacja ścieżek technologicznych. Pozyskiwanie i analiza ofert outsourcingowych. Wsparcie eksperckie w negocjacjach kontraktów długoterminowych. Wdrażanie i optymalizacja narzędzi do kalkulacji.

8.2016 – 10.2018 Młodszy Kierownik ds. zarządzania barwą, LSC Communications

Zakres obowiązków:

Kontrola druku pod względem poprawności odwzorowania barwy w zakresie zgodności z normą, oraz zbieżności ze wzorem koloru. Dobór i rekomendacja odpowiednich profili ICC. Analiza danych i wprowadzanie stosownych korekt do procesu. Udział w konsultacjach z klientami w kwestiach druku i zarządzania barwą. Wsparcie eksperckie podczas wizyt klientów przy akceptacji koloru. Przygotowanie i realizacja szkoleń dla osób odpowiedzialnych za zatwierdzanie koloru podczas druku. Akceptacja koloru u podwykonawców i partnerów zewnętrznych.

10.2011 – 07.2016 Specjalista ds. zarządzania barwą, RR Donnelley

Zakres obowiązków:

Kontrola druku pod względem poprawności odwzorowania barwy w zakresie zgodności z normą oraz zbieżności ze wzorem koloru. Dobór i rekomendacja odpowiednich profili ICC. Analiza danych i wprowadzanie stosownych korekt do procesu. Wsparcie eksperckie podczas wizyt klientów przy akceptacji koloru. Akceptacja koloru u podwykonawców i partnerów zewnętrznych.

07.1999 – 09.2011 Druk, produkcja poligraficzna, RR Donnelley

Dostarczanie do kolejnych etapów produkcji półproduktu zgodnego ze standardami jakościowymi. Zapewnienie wymaganej wydajności i terminowej realizacji zleceń. Koordynowanie pracy oraz dbałość o bezpieczeństwo zespołu. Szkolenie i ocenianie podległych pracowników.

Staże, projekty i inne aktywności zawodowe

10.2020 – obecnie Przygotowanie autorskiego programu i realizacja modułu obieralnego „Zarządzanie procesowe w ujęciu praktycznym” dla studentów kierunku Zarządzanie i inżynieria produkcji, prowadzonego na Wydziale Zarządzania Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (AGH).

Zakres obowiązków:

Przygotowanie programu kursu. Prowadzenie zajęć w formie konwersatorium i w formie ćwiczeń projektowych.

08.2019 – obecnie Lider projektu, Projekt badawczo-rozwojowy współfinansowany ze środków UE w firmie Walstead Central Europe. System inteligentnego rozpoznawania obrazu ze zdjęcia w procesie weryfikacji jakościowej zrealizowanego druku do zakładanej jakości; dokładnej kontroli ilości zrealizowanej produkcji, w ramach większego grantu 2018 – 2022, Platforma zintegrowanego zarządzania, planowania i sterowania procesami logistycznymi w przedsiębiorstwie produkcyjnym z wykorzystaniem cyber-fizycznych systemów (POIR.01.01.01-00-0458/18, wartość projektu: PLN 25 289 158,34, wartość dofinansowania NCBiR: PLN 15 882 915,94).

Zakres obowiązków:

Analiza i optymalizacja koncepcji. Poszukiwanie, weryfikacja i akceptacja partnerów naukowych i technicznych. Udział w testach i wizjach lokalnych. Definiowanie i kontrola realizacji celów doraźnych i długoterminowych. Weryfikacja merytoryczna rozwiązań.

07.2020 – 01.2021 Wizyty studyjne w przedsiębiorstwach dla studentów Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (AGH), realizowane w firmie Walstead Central Europe

Zakres obowiązków:

Przygotowanie programu wizyt. Realizacja zajęć warsztatowych w formie online. Zaprojektowanie prezentacji audiowizualnych, zadań praktycznych i teoretycznych. Przygotowywanie i archiwizowanie wymaganej dokumentacji.

02.2015 – 03.2015 Udział w projekcie kreatywnym: „Broszura zapachowa”,
RR Donnelley

Zakres obowiązków: Kreacja i edycja tekstów do broszury, przygotowanie wzorów koloru, kontrola druku i akceptacja koloru.

06.2008 – 08.2008 Staż w Dziale ds. planowania obsad, RR Donnelley

Zakres obowiązków:

Zapewnienie obsad dla maszyn produkcyjnych. Monitorowanie harmonogramów pracy i bieżącego planu produkcji.

11.2006 – 02.2007 Staż w Dziale Usług Zleconych, RR Donnelley

Zakres obowiązków:

Planowanie i koordynowanie zleceń produkcyjnych realizowanych przez firmy podwykonawcze. Sprawdzanie realizacji zleceń w zakresie terminowości i jakości wykonanych prac.

04.2005 – 05.2005 Udział w projekcie Szef Zmiany, RR Donnelley

Zakres obowiązków:

Przejęcie odpowiedzialności za prowadzenie zmiany w hali maszyn drukujących. Zarządzanie pracą zespołu kilkudziesięciu specjalistów podczas trwania zmiany produkcyjnej.

Opublikowane artykuły

1. P. Dżiki, M. Daszykowski, L. Pieszczyk, Toward more efficient and effective color quality control for the large-scale offset printing process, *Journal of Chemometrics*, 38 (2024) e3543 IF = 2.4
2. P. Dżiki, K. Rybicka, M. Daszykowski, Obrazowanie hiperspektralne, czyli kontrola jakości bez kompromisów, *Świat Druku*, 6 (2023) 58-59

Wystąpienia ustne

1. P. Dżiki, K. Rybicka, M. Daszykowski, Obrazowanie hiperspektralne, czyli kontrola jakości bez kompromisów, Akademia Zarządzania Barwą, Warszawa, 21-22.11.2023 r.
2. P. Dżiki, Doktorat wdrożeniowy, czyli nauka w praktyce, Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Nauka i Biznes – Wspólne Wyzwania”, Szczecin, 30.06.2022 r.

Plakaty

1. P. Dżiki, M. Daszykowski, Improving Methods of Color Quality Control in Large-Scale Printing with Hyperspectral Imaging, Konferencja EUIndTech2025 – Technologie Przemysłowe i Materiały dla Zrównoważonej Europy 02-04 czerwca 2025 r.
2. P. Dżiki, M. Daszykowski, Kontrola jakości zadrukowanej powierzchni wielobarwnej z wykorzystaniem widm hiperspektralnych rejestrowanych w zakresie widzialnym, XIV Seminarium Naukowe „Aktualne Problemy Chemii Analitycznej”, Instytut Chemii, Katowice 17 maja 2024 r.
3. P. Dżiki, L. Pieszczyk, K. Rybicka, M. Daszykowski, Toward more efficient and effective color quality control in the large-scale printing process, *Conferentia Chemometrica 2023*, Sopron (10-13 September 2023), Hungary
4. P. Dżiki, Obrazowanie hiperspektralne jako narzędzie wspomagające zarządzanie jakością wydruków wielobarwnych, VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Nauka i Biznes – Wspólne Wyzwania”, Szczecin 30 czerwca 2022 r.
5. P. Dżiki, K. Rybicka, M. Daszykowski, Testing the quality of printed products using hyperspectral cameras and chemometrics, *European Open Science Forum*, Katowice 15 lipca 2022 r.

W przygotowaniu

P. Dziki, M. Wieczorkowski, B. Śnieżyński, M. Daszykowski, TESH: An Efficient Python Toolkit for Extraction of Multiple Samples from Large RAW Hyperspectral Images. Manuskrypt.