

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INFORMATYKI I TELEKOMUNIKACJI
KIERUNEK: INFORMATYKA
Specjalność: INTERNET PRZEDMIOTÓW

PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA

*Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania*

Autor: inż. Łukasz Nowarkiewicz **Promotor pracy:** dr inż. Mikołaj Sobczak

Streszczenie [pl]

Celem niniejszej pracy jest analiza i porównanie wizyjnych technik weryfikacji oraz kwantyfikacji procesu dozowania w stosunku do tradycyjnych metod, na przykładzie ekspresu do herbaty. W przypadku maszyn, które dysponują ograniczonym miejscem, montaż licznych czujników i prowadzenie przewodów często stanowi duże wyzwanie. Techniki wizyjne oferują szerokie możliwości, lecz zazwyczaj wymagają znacznych zasobów obliczeniowych. Niniejsza praca ma na celu przeprowadzenie badania i porównania tych metod pod kątem ekonomicznym, technicznym i przede wszystkim skuteczności.

Streszczenie [ang]

The aim of this study is to analyze and compare visual techniques for verification and quantification of the dosing process with traditional methods, using the example of a tea maker. In the case of machines where space is limited, the installation of numerous sensors and the routing of wires often presents a challenge. Visual techniques offer a wide range of possibilities, but usually require substantial computational resources. The purpose of this work is to conduct a study and comparison of these methods in terms of economics, technical aspects and above all, effectiveness.

Spis treści:

1. Wstęp	5
2. Cel i zakres prac	9
3. Przegląd literatury i rozwiązań dostępnych na rynku	10
3.1. Technologie wykorzystywane w maszynach vendingowych	10
3.2. Technologie dostępne na rynku	14
3.3. Przegląd literatury w zakresie pomiarów oraz systemów wizyjnych	18
4. Opis środowiska testowego	20
4.1 Przygotowanie stanowisko pomiarowego - maszyny będącej przedmiotem badań	21
4.2 Sprawdzenie ograniczeń sprzętowych	25
4.3 Wybór optymalnego środowiska sprzętowego	28
4.4 Prototyp aplikacji do detekcji	30
4.5 Wybór optymalnych ustawień zapisu kamery	32
4.6 Oprogramowanie do automatyzacji testów	35
4.6.1. Automatyzacja załączania elementów maszyny	36
4.6.2 Metody zapisu oraz archiwizacji danych	38
4.6.3. Program do łatwego przesyłania plików pomiędzy komputerami	40
5. Eksperymenty	42
5.1. Eksperymenty z dozowaniem cieczy	42
5.1.1. Dozowanie herbaty	43
5.1.2. Dozowanie syropu	47
5.1.3. Dozowanie mleka	51
5.2 Eksperymenty z dozowaniem granulatów	55
5.2.1. Dozowanie suszonych owoców	55
5.2.2. Dozowanie cukru	58
5.3. Dodatkowe możliwości systemu wizyjnego	61
5.3.1 Weryfikacja barwy herbaty	61
5.3.2. Detekcja obecności kubka	63
5.3.3. Oszacowanie pojemności kubka	66

6. Analiza i interpretacja wyników badań własnych	69
6.1. Wyniki dozowania cieczy	69
6.1.1. Wyniki dozowania herbaty	69
6.1.2. Wyniki dozowania syropu	72
6.1.3. Wyniki dozowania mleka	76
6.2. Wyniki dozowania substancji sypkich	81
6.2.1. Wyniki dozowania suszonych owoców	81
6.2.2. Wyniki dozowania cukru	83
6.3. Wyniki alternatywnych metod detekcji	86
6.3.1. Weryfikacja barwy herbaty	86
6.3.2. Detekcja obecności kubka	87
6.3.3. Oszacowanie objętości kubka	87
6.4. Podsumowanie wyników	87
7. Analiza wyników, wnioski i dalsze prace	89
7.1. Wyniki oraz konkluzje	89
7.2. Napotkane problemy	89
7.3. Przyszłe prace	89
8. Bibliografia	91
Spis tabel	92
Spis rysunków	92

1. Wstęp

Pomiar parametrów procesowych w różnego rodzaju maszynach gospodarstwa domowego oraz maszynach vendingowych jest podstawą uzyskania powtarzalności przygotowywanych przez nie produktów, a co za tym idzie, utrzymania odpowiedniej ich jakości. Jednak ze względu na kontakt niektórych części tych maszyn z produktami spożywczymi proces weryfikacji zachodzących procesów nie jest łatwy, ponieważ prowadzi do zabrudzeń czujników. Dodatkowo, nie sprzyjają temu wytrącające się osady. W odróżnieniu od procesów przemysłowych, gdzie powołana jest odpowiednia kadra nadzorująca procesy produkcyjne i naprawcze, maszyny vendingowe są obsługiwane przez niewykwalifikowany personel lub przez zwykłego konsumenta. Jest on w stanie wykonać jedynie podstawowe czynności konserwacyjne. W przypadku awarii dowolnego z czujników konieczne jest wezwanie serwisu, który fizycznie musi przyjechać do maszyny, lub konieczne jest oddanie sprzętu do profesjonalnej naprawy.

W celu zapobieżenia takim wydarzeniom, wiele maszyn mierzy jedną wielkość fizyczną na kilka sposobów, za pomocą kilku różnych czujników. Awaria dowolnego z nich może zostać wykryta i uznana za usterkę, ale nie wpływa ona na ciągłość pracy maszyny. Jednak zwiększenie liczby czujników znacząco wpływa na koszt takiego urządzenia. Zamontowanie kolejnego czujnika każdorazowo wymaga doprowadzenia do niego przewodów, zajmuje kolejne wyprowadzenia mikrokontrolera, należy uwzględnić go również podczas pisania oprogramowania maszyny. W dodatku najczęściej używane czujniki są bardzo proste, wykrywające podstawowe wielkości fizyczne, takie jak masa, przepływ, ciśnienie, temperatura, natężenie pola magnetycznego, czy czujniki wykrywające położenie - krańcowe, czy fotokomórki.

Zebrane dzięki tym sensorom informacje mogą w niewystarczający sposób monitorować i analizować zachodzące poszczególne procesy w maszynie. Waga wykrywająca kubek może fałszywie pokazać, że jest on obecny, jeżeli ktoś postawi w miejscu przygotowania dowolny inny przedmiot. Innym przykładem jest turbinka weryfikująca przepływ wody. Może ona rejestrować mniejsze wartości, jeżeli zostanie zakamieniona, a fotokomórka może zwracać wartości odpowiadające przelatującym składnikom, w momencie kiedy zostanie zabrudzona.

W związku z powyższym, wyzwaniem staje się kompromis jak dużą liczbę czujników użyć, a jaką dokładność i niezawodność chcemy uzyskać. Nie w każdym urządzeniu możemy dowolnie zwiększać liczbę sensorów, często przez ograniczone wymiary maszyny, lub ograniczenia rynkowe, takie jak preferowana cena sprzedaży. Jednakże, możliwe jest za pomocą jednego systemu wizyjnego zastąpienie przynajmniej części czujników klasycznych, lub dodanie do nich redundancji. Rozważenie w jakim stopniu jest to możliwe, jaką dokładność oraz jakie dodatkowe funkcje może zaoferować taki system, a jakie są niemożliwe do zrealizowania za pomocą klasycznych czujników, jest przedmiotem niniejszej pracy.

Zawarty w tytule niniejszej pracy ekspres do herbaty nie jest maszyną dostępną komercyjnie. Jest autorskim urządzeniem, nad którym autor pracuje już od kilku lat. Na rysunku 1.1 przedstawiono projekt CAD urządzenia oraz na rysunku 1.2 zdjęcie fizycznej maszyny.

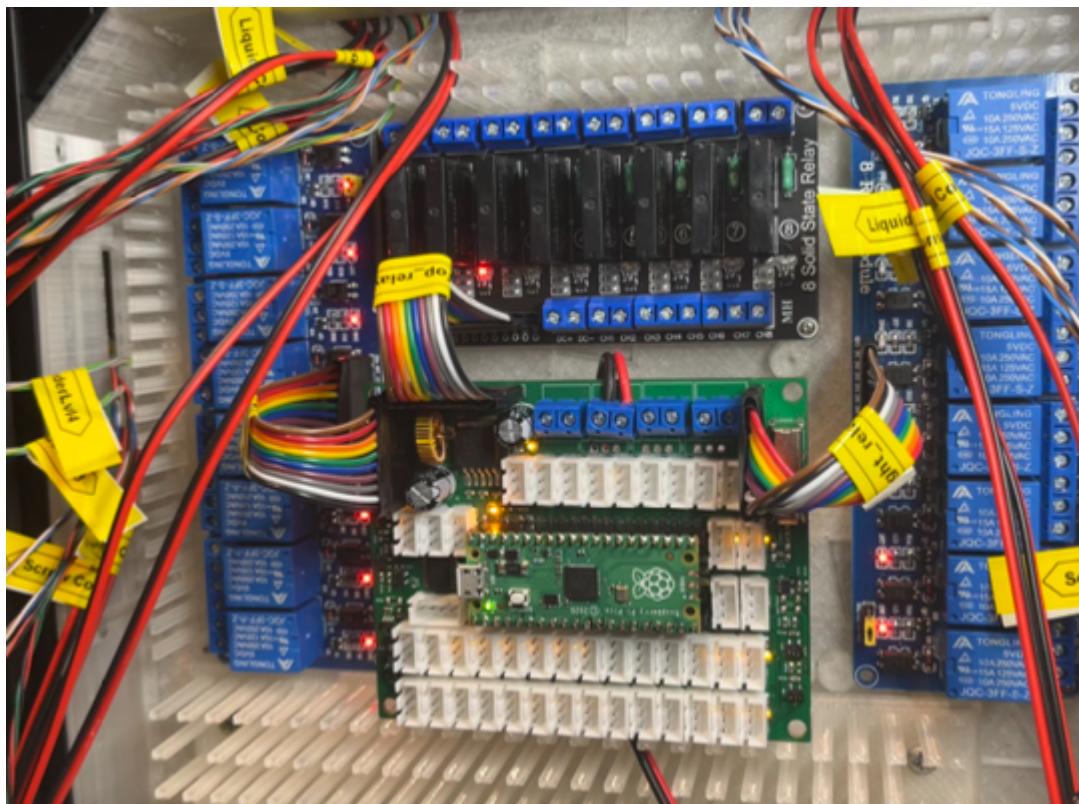


Rys. 1.1 Projekt CAD ekspresu do herbaty



Rys. 1.2 Fizyczna maszyna - ekspres do herbaty

Płytką sterującą do tego ekspresu, pokazana na rysunku 1.3. była przedmiotem pracy dyplomowej inżynierskiej autora. W trakcie prac autor natrafił na wiele problemów związanych z pracą maszyny - dozowaniem, jego brakiem powtarzalności, brakiem dokładności oraz zacinaniem się dozowników. Jednak największym problemem okazały się problemy z funkcjonowaniem wielu czujników. Zamontowane czujniki odbiciowe podczerwieni, czujniki pojemnościowe oraz turbinki mierzące przepływ nie zwracały miarodajnych wartości o przebiegu procesu. Autor postanowił wykorzystać swoje doświadczenie w pracy z maszynami CNC, a przede wszystkim z automatem do montażu płyt drukowanych. Maszyna Pick&Place jest kontrolowana przez oprogramowanie OpenPnP, które używa biblioteki OpenCV. Całe funkcjonowanie maszyny, z powodzeniem opiera się o system wizyjny. To doświadczenie zapoczątkowało koncepcję wykorzystania systemu wizyjnego w ekspresie do herbaty.



Rys. 1.3. Płytką sterującą ekspresem do herbaty

Słowa kluczowe:

Techniki wizyjne, weryfikacja i kwantyfikacja procesu dozowania, klasyczne metody pomiarowe, czujniki przepływu, detekcja krawędzi, przetwarzanie obrazu, systemy wizyjne, OpenCV, segmentacja obrazu, sztuczna inteligencja i sieci neuronowe, zliczanie obiektów, analiza obrazu wideo, pomiar przepływu i objętości, rozpoznawanie

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

i pomiar geometrii obiektów, automatyzacja procesów przemysłowych, wagi,
przepływowomierze, czujniki pojemnościowe, czujniki indukcyjne, sensory optyczne.

2. Cel i zakres prac

Celem niniejszej pracy jest porównanie dokładności wizyjnych metod pomiarowych w odniesieniu do metod referencyjnych, klasycznych, z wykorzystaniem środowiska testowego jakim jest ekspres do herbaty. Praca ma na celu ocenę, czy techniki wizyjne mogą efektywnie zastąpić lub uzupełnić klasyczne techniki pomiarowe, oraz podsumowaniem jakie dodatkowe korzyści, w postaci dodatkowych funkcji może przynieść obecność systemu wizyjnego.

Porównanie obejmuje dozowanie najważniejszych z perspektywy ekspresu do herbaty składników, czyli analizę dokładności dozowania cieczy - herbaty, mleka oraz syropu malinowego - cieczy o różnej gęstości i lepkości. Dozowanie granulatów w postaci suszonych owoców - porównanie wagi mierząc klasycznie oraz zliczając ziarna za pomocą wizji. Kolejno dokonano pomiaru barwy herbaty jako weryfikacja intensywności przygotowanego naparu. Na końcu sprawdzono dodatkowe funkcjonalności oferowane przez systemy wizyjne, takie jak wykrywanie obecności kubka, szacowanie jego wielkości, weryfikacja pracy dozowników, czy zdalna diagnostyka maszyny.

Zakres pracy obejmuje szczegółowo:

- Przygotowanie środowiska testowego
 - Przygotowanie maszyny do dozowania składników będących przedmiotem eksperymentów
 - Przygotowanie oprogramowania do automatyzacji rejestracji przebiegu eksperymentów
 - Przygotowania pełnego stanowiska pomiarowego
 - Weryfikacja ograniczeń sprzętowych urządzenia docelowego
- Zaplanowanie i przeprowadzenie serii eksperymentów
 - Przygotowanie planu eksperymentów
 - Rejestracja poszczególnych eksperymentów
- Podsumowanie wyników badań własnych i sformułowanie wniosków

Struktura pracy jest następująca:

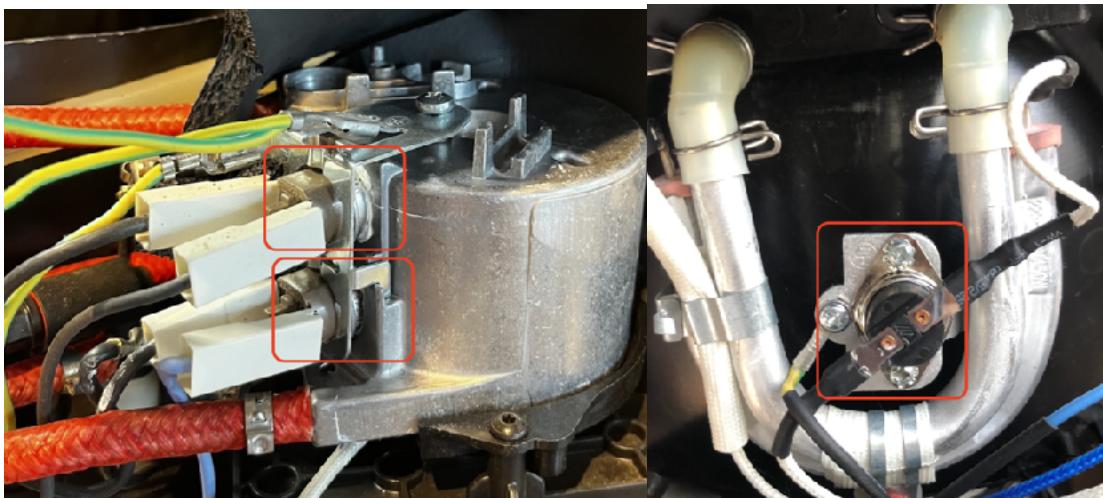
- W rozdziale 3 przedstawiono rozwiązania dostępne na rynku oraz przegląd literatury dziedzinowej
- W rozdziale 4 opisano środowisko testowe
- W rozdziale 5 przedstawiono plan eksperymentów oraz zapisano wyniki
- W rozdziale 6 opracowano i podsumowano uzyskane wyniki
- W rozdziale 7 sformułowano wnioski
- W rozdziale 8 przedstawiona jest bibliografia

3. Przegląd literatury i rozwiązań dostępnych na rynku

3.1. Technologie wykorzystywane w maszynach vendingowych

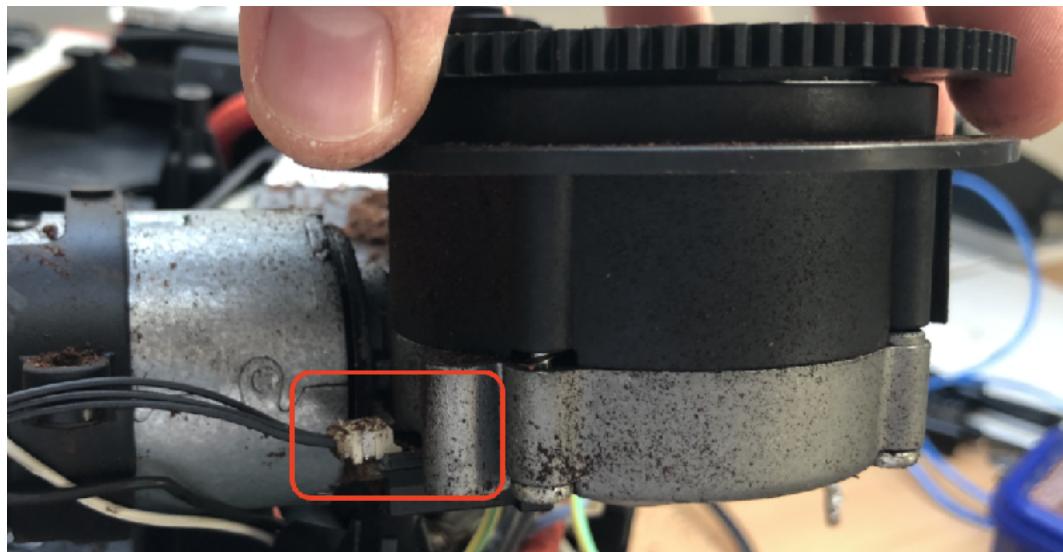
Podobne maszyny do ekspresu do herbaty, takie jak ekspresy do kawy, maszyny vendingowe czy automaty do napojów gorących, korzystają z dosyć typowych, powtarzających się rozwiązań. W takich sprzętach preferowane są rozwiązania proste i sprawdzone, często za sprawą niskiej ceny pojedynczych czujników, co przekłada się na niższą cenę całego urządzenia, ale również im coś jest prostsze, tym mniejsze szanse, że ulegnie to uszkodzeniu. Niektóre trudne lub zbyt kosztowne do zmierzenia procesy pracują nawet w pętlach otwartego sprzężenia zwrotnego - praca dozowników nie jest w żaden sposób weryfikowana. Dlatego też w tego typu sprzętach można znaleźć najprostsze czujniki - temperatury w formie termistorów, przepływu w formie turbinek, obecności, na przykład kubka, fusów, w formie fotokomórek, poziomu cieczy zrobione z kilku czujników pojemnościowych, kilku płynakowych lub pojedynczego czujnika ultradźwiękowego odległości. Dostarczają one ograniczonych informacji i często nie są uodpornione na wyjątkowe okoliczności. Przykładowo, jeżeli w automacie do napojów fotokomórka mierząca przelatujące składniki zostanie zabrudzona, kakao w proszku ulegnie zamoczeniu i utknie w pojemniku - czujnik obecności wskazuje, że kakao jest obecne i można przygotować napój. Fotokomórka zwróci wartości odpowiadające przelatującym składnikom, w efekcie maszyna poda przygotowany napój, który będzie jedynie kubkiem z wrzątkiem. Jeżeli w tym samym przypadku dodać system wizyjny - brak oczekiwanej efektu w postaci napoju w brązowym kolorze byłby szybko wykryty, aw efekcie użytkownik nie miałby powodów do niezadowolenia.

W tym rozdziale przedstawiono kilka przykładów urządzeń oraz czujników używanych w wymienionych maszynach. Niestety na próżno szukać opisu działania takich maszyn w literaturze. Zdecydowana większość rozwiązań jest wynikiem prac rozwojowych nad urządzeniami ich producentów, przez co ekonomicznie nie jest uzasadnione się nimi dzielić. Opisane w tym rozdziale rozwiązania pochodzą głównie z doświadczenia autora pracy, wykonanej przez niego inżynierii wstępnej wielu maszyn dostępnych na rynku. Za pierwszy przykład niech posłużą urządzenia grzejne - grzałki przepływowe do wody. Przedstawione na rys. 3.1.1 - nie ma na nich zamontowanych żadnych czujników, które zwracały by informację o temperaturze do płyt sterujących urządzeniami. Oba przykładowe sprzęty wykorzystują termostaty bimetaliczne - skalibrowane na konkretną temperaturę, na etapie produkcji.



Rys. 3.1.1. Termostaty bimetaliczne w ekspresach do kawy. Opracowanie własne.

Inny przykład, przedstawiony na rysunku 3.1.2 młynek do kawy. Do weryfikacji prędkości obrotowej silnika używa się czujnika natężenia pola magnetycznego halla.

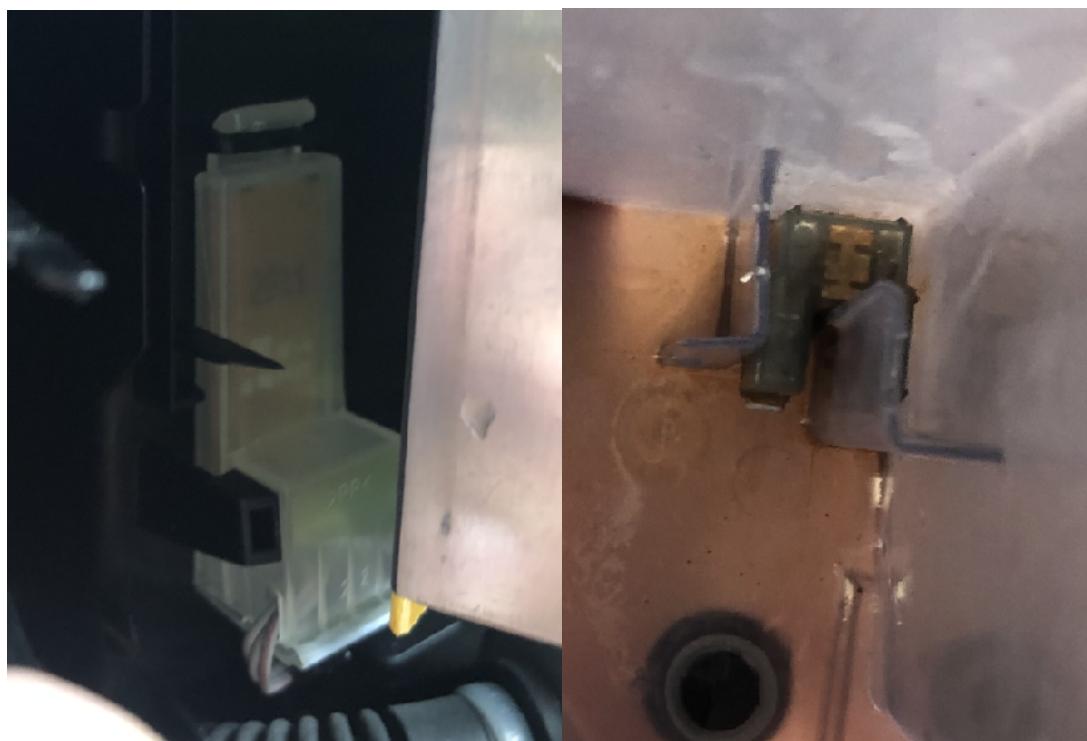


Rys. 3.1.2. Czujnik Halla weryfikujący pracę młynka. Opracowanie własne

Do detekcji wody w zbiorniku używa się głównie dwóch rozwiązań. Pierwsze, przedstawione na rysunku 3.1.3. za pomocą czujnika sprawdza się pojemność ośrodka - różną dla powietrza i wody. Drugie, przedstawione na rysunku 3.1.4. składa się z dwóch elementów. Wewnątrz zbiornika umieszczony jest magnes w niewielkim pływaku, który może swobodnie poruszać się w kierunku góra - dół w zależności od poziomu cieczy. Na zewnątrz pojemnika, w niewielkiej odległości jest przymocowany czujnik halla. Gdy poziom wody spadnie, pływak zbliży się do czujnika i informacja o tym zostanie przekazana do układu sterującego ekspresem.



Rys. 3.1.3. Czujnik pojemnościowy używany do detekcji wody w zbiorniku.
Opracowanie własne.



Rys. 3.1.4. Po lewej czujnik natężenia pola magnetycznego halla, po prawej pływak, z przyczepionym magnesem wewnętrz zbiornika z wodą. Opracowanie własne.

W wielu ekspresach do kawy nie mierzy się w ogóle przepływu wody. Jeżeli woda w zbiorniku jest wykrywana - zakłada się że przy uruchomieniu pompy trafi do grzałki. W niektórych modelach można jednak spotkać małe turbinki mierzące przepływ, jak na przykład przedstawiony na rysunku 3.1.5. Obracający się wirnik z magnesami generuje pole magnetyczne, które wykrywane jest przez umieszczony wewnątrz czujnik halla i w formie impulsów przekazywane do elektroniki sterującej ekspresem.



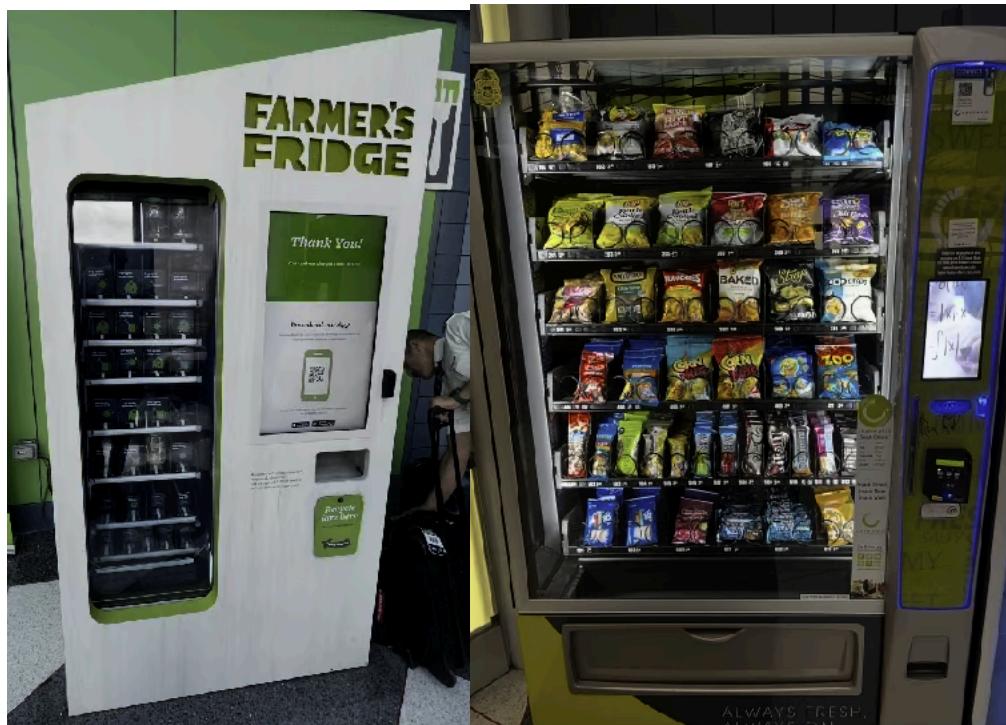
Rys. 3.1.5. Turbina używana w ekspresie do kawy. Opracowanie własne.

W przypadku maszyn vendingowych, często pracują one w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego, bez jakiegokolwiek weryfikacji pracy. Na rysunku 3.1.6. przedstawiono dozownik do granulatów. W zaznaczonych fragmentach widać szybkozłączkę, która łączy podajnik ślimakowy z silnikiem. Nie ma tutaj zamontowanych żadnych przewodów, żadnych czujników. Bazując na doświadczeniu autora, w maszynach vendingowych często jedyną weryfikacją że coś zostało nasypane do kubka jest fotokomórka tuż przy wylocie do kubka, ale już bez sprawdzenia ilości.



Rys. 3.1.6. Dozownik do granulatów w maszynie vendingowej.
Źródło - materiały firmy [Aquaspesso, serwis youtube.com](https://www.youtube.com)

W automatach vendingowych do wydawania większych produktów używa się również podajników taśmowych, jak na przykład na rysunku 3.1.7 po lewej, lub podajników spiralnych, jak na tym samym rysunku, po prawej. Oba również nie mają żadnej weryfikacji wydania właściwej ilości produktu.



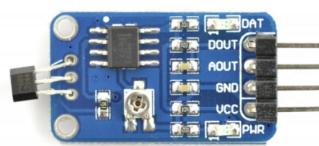
Rys. 3.1.7. Maszyny vendingowe z podajnikiem taśmowym (po lewej)
oraz podajnikiem z spiralnym (po prawej). Opracowanie własne.

3.2. Technologie dostępne na rynku

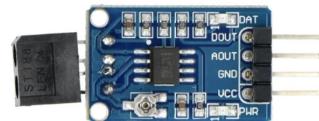
Obecnie w ofercie dostawców komponentów elektronicznych możemy znaleźć wiele gotowych czujników różnych wielkości fizycznych. Szeroką ofertę sensorów ma na przykład w swojej ofercie sklep internetowy Botland. Możemy tam znaleźć, przedstawiony na rysunku 3.2.1. czujnik przepływu cieczy, zwracający wartości cyfrowe z czujnika halla z każdym obrotem turbiny, sam czujnik halla, przedstawiony na rysunku 3.2.2., który można wykorzystać na przykład jako czujnik obrotu w dozowniku śrubowym, czy czujnik odległości mierzący dystans za pomocą nadajnika i odbiornika podczerwieni, pokazany na rysunku 3.2.3.



Rys. 3.2.1 Czujnik
przepływu cieczy. Źródło -
botland.com



Rys. 3.2.2 Czujnik halla.
Źródło botland.com



Rys. 3.2.3 Czujnik
odległości podczerwieni.
Źródło botland.com

Jeżeli w maszynie potrzebna jest weryfikacja wagi - przydatna będzie belka tensometryczna. Przykładowe urządzenie przedstawiono na rysunku 3.2.4. Do pomiaru przelatujących przedmiotów przydatny może być również czujnik szczelinowy pokazany na rysunku 3.2.5. Jeżeli istotna jest barwa produktu, można do jej wykrycia użyć czujnika analizującego spektrum światła, przykładowy produkt na rysunku 3.2.6.



Rys. 3.2.4 Belka
tensometryczna. Źródło
botland.com

Rys. 3.2.5 Czujnik
szczelinowy. Źródło
botland.com

Rys. 3.2.6 Czujnik
spektrum światła. Źródło
botland.com

Zaprezentowane do tej pory czujniki są do zastosowań hobbystycznych. Oferowane przez nie dokładności często bardzo niskie. Dodatkowo w większości nie posiadają one obudów i zamontowanie ich w maszynie wymaga dodatkowej pracy. Jeżeli zależy nam na dokładności i precyzji możemy użyć czujników renomowanych firm, do zastosowań przemysłowych. Do dokładnego pomiaru kąta obrotu i prędkości możemy wykorzystać na przykład pojemnościowy enkoder przelotowy. Przykładowe takie urządzenie przedstawiono na rysunku 3.2.7. Jeżeli chcielibyśmy zmierzyć temperaturę w odległym zbiorniku - jak ciecz w kubku - możemy wykorzystać przedstawiony na rysunku 3.2.8 czujnik pirometryczny. Do wykrywania przelatujących obiektów można wykorzystać przedstawiony na rysunku 3.2.9 czujnik fotoelektryczny dyfuzyjny. Przedstawione czujniki przystosowane są do pracy w trudnych warunkach. Oferują bardzo dużą powtarzalność i precyzję pomiarów. Niestety często jednak w parze z tym idzie wysoka cena takich urządzeń.



Rys. 3.2.7. Absolutny enkoder przelotowy firmy Netzer. Źródło netzerprecision.com



Rys. 3.2.8. Czujnik pirometryczny firmy Optris. Źródło optris.com



Rys. 3.2.9. Czujnik fotoelektryczny dyfuzyjny firmy QWIFM. Źródło qwdhc.com

Poza wykorzystaniem konkretnych produktów komercyjnie dostępnych, warto też wzorować się na przykładowych stanowiskach demonstracyjnych firmy, którym zależy na jak najlepszym przedstawieniu oferowanych przez nich technologii. Często takie stanowiska są dość dobrze dopracowane, tak żeby pokazać możliwe najlepsze do osiągnięcia wyniki. Mogą być to dobre punkty odniesienia jakie problemy należy rozwiązać, jak można spróbować zbudować konkretne urządzenia czy systemy. Przykładowo na rysunku 3.2.10 przedstawiono system wizyjny do weryfikacji jakości wykonania modelu. Można tutaj wyodrębnić kamerę z dołączonym obiektywem makro, bardzo jasną lampa doświetlającą obszar pod kamerą oraz stół w jasnej barwie. Dzięki temu możliwe jest dokładna rejestracja detalu. Na rysunku 3.2.11 przedstawiono przykładowe stanowisko, gdzie przedstawiono czujnik pojemnościowo-radarowy umożliwiający wykrywanie poziomu dowolnych cieczy, granulatów, substancji sproszkowanych lub ciał plastycznych jak dżemy. Montowany do ściany zbiornika. Jeden czujnik do zastosowania ze wszystkimi tymi substancjami. Nieczuły na drobne zabrudzenia skutecznie weryfikuje czy mierzona substancja znajduje się w pobliżu jego końcówki czy nie.

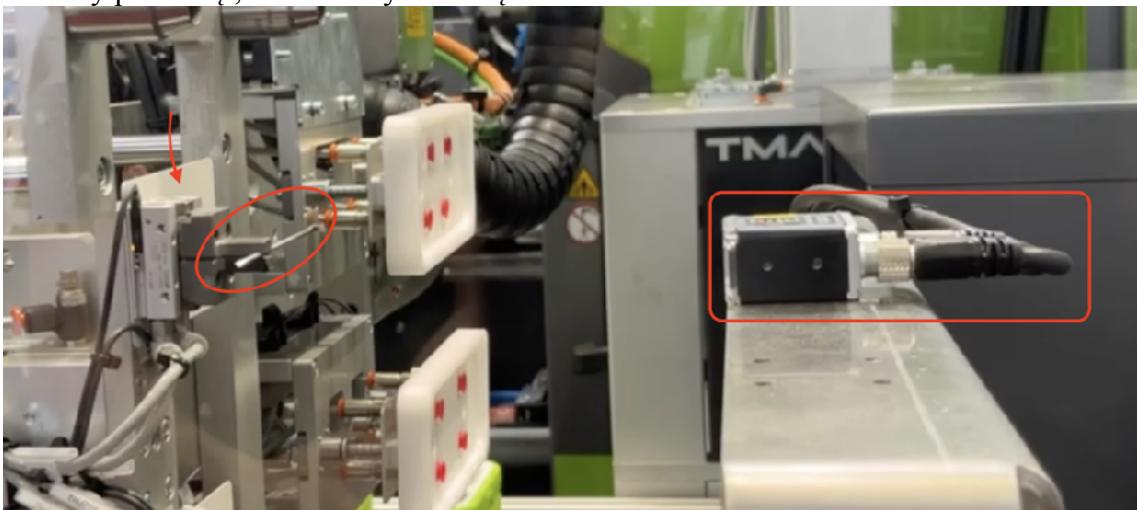


Rys. 3.2.10 Stanowisko pokazowe firmy Baumer - system wizyjny do weryfikacji detalu, podczas targów Warsaw Industry Week Expo. Opracowanie własne.



Rys. 3.2.11 Stanowisko pokazowe firmy Baumer - prezentacja działania czujników serii CleverLevel. Opracowanie własne.

Jeżeli zależy nam na skutecznej weryfikacji obecności i pozycji detalu za pomocą systemu wizyjnego, warto przeanalizować jak zostało to zrealizowane przez firmę Engel. Na rysunku 3.2.12 pokazano elementy takiego systemu. Elipsą zaznaczono detal do zweryfikowania czy został poprawnie pobrany - metalowa część śrubokręta. Przed umieszczeniem go wewnętrz maszyny do wtrysku wysokociśnieniowego należy sprawdzić jego pozycję aby uniknąć uszkodzenia formy wtryskowej. W tym celu wykorzystano kamerą wraz z naświetlaczem - zaznaczone po prawej stronie prostokątem. Aby z każdym powtórzeniem zapewnić zbliżone warunki tłem jest biały, matowy prostokąt, zaznaczony strzałką.



Rys. 3.2.12 System wizyjny zamontowany na stanowisku pokazowym firmy Engel -
Targi Kielce Plastpol 2024. Opracowanie własne.

3.3. Przegląd literatury w zakresie pomiarów oraz systemów wizyjnych

Rozpoczynając od klasycznych metod pomiarowych, takich jak pomiar przepływu, na podstawie książki “Sensor Technology Handbook” autorstwa Johna Wilsona, można zaproponować alternatywne rozwiązania do klasycznej turbiny wprawianej w ruch obrotowy przez strumień cieczy [1]. Przykładem jest termiczny anemometr, który opiera swoje działanie na zasadzie, że można skorelować prędkość przepływu z ilością ciepła usuwanego przez płyn z podgrzanego czujnika temperatury, lub miernik różnicy ciśnienia, działający na koncepcji, że spadek ciśnienia przez miernik jest proporcjonalny do kwadratu szybkości przepływu. W “Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs, and Applications 2015” opisano również inne rodzaje czujników przepływu, takie jak ultradźwiękowe – działające na zasadzie różnicy faz transmitowanej fali pomiędzy dwoma przetwornikami, czy elektromagnetyczne – działające na zasadzie prawa Faradaya [2]. W artykule “Flow Measurements” autorstwa K. D. Jensa przedstawiono laserową anemometrię dopplerowską – modyfikację metody ultradźwiękowej, gdzie falę akustyczną zastąpiono optyczną oraz Particle Image Velocimetry (PIV), gdzie śledzi się poruszające się bąbelki powietrza za pomocą bardzo szybkiej kamery, obliczając na tej podstawie prędkość przepływu [3]. Chociaż przedstawione metody klasycznego pomiaru mają długą historię wykorzystania w przemyśle, są one zazwyczaj stosunkowo drogie w produkcji, wymagają kalibracji, są duże rozmiarowo i nie działają dobrze z cieczami o różnej gęstości i lepkości. Gdy dokładność pomiaru do pojedynczych mililitrów nie jest wymagana, dobrym rozwiązaniem może być zastosowanie systemu wizyjnego. Bezpośredni pomiar przepływu za pomocą kamery nie jest możliwy, ponieważ ciągły strumień cieczy jako dwuwymiarowy obraz nie dostarcza żadnych informacji. Jednakże, informacja o obecności strumienia cieczy, w połączeniu z znaną przepływnością pompek, pozwala zgrubnie określić ilość wlanego płynu. W tym przypadku nie ma potrzeby korzystania z sieci neuronowych czy skomplikowanych metod wykrywania obiektów. Prosta segmentacja obrazu, wyizolowanie obszaru poszukiwań i detekcja krawędzi mogą być wystarczające do zlokalizowania i obrysowania prostokątem strumienia cieczy. Takie metody zostały szczegółowo opisane w “2D Computer Vision. Principles, Algorithms and Applications 2022” autorstwa Zhang Y [4].

Kolejnym aspektem jest w kwantyfikacji procesu dozowania jest określenie ilości nasypywanego granulatu. W takiej formie dozowane do herbaty są m.in. suszone owoce. Klasycznie można zmierzyć ich ilość na dwa proste sposoby: czujnik podczerwieni w formie bariery podczerwieni - pomiar przysłonięcia przez przelatujący granulat lub waga na która będzie sprawdzała masę nasypanego granulatu. Niestety oba rozwiązania mają swoje wady. Przy pomiarze światłem podczerwonym nie mamy żadnej metody określenia ile dokładnie zostało nasypane w postaci ani objętości ani masy, ze względu na brak dokładnej korelacji tego co przelatuje z faktyczna ilością. W przypadku określania masy za pomocą wagi, innym problemem będzie higroskopijność dodatków takich jak np suszone owoce, która znaczaco będzie wpływała na masę granulek. Dlatego autor zdecydował o próbie określenia ile granulatu

zostało nasypane za pomocą technik wizyjnych. W artykule “Drone-based Object Counting by Spatially Regularized Regional Proposal Network” zaproponowano jedno z możliwych rozwiązań - przetwarzanie obrazu przez sieć neuronową w celu wyizolowania pojedynczych obiektów i następnie zliczanie ich, w tym przypadku chodziło o określenie liczby samochodów [5]. Bardziej złożoną metodę przedstawiono w pracy “Counting From Sky: A Large-Scale Data Set for Remote Sensing Object Counting and a Benchmark Method”. Obraz wejściowy jest analizowany przez warstwę wstępную opartą na architekturze VGG16, po czym moduły uwagi przestrzennej i kanałowej selektywnie koncentrują się na istotnych cechach. Te cechy są dalej przetwarzane przez warstwy średkowe sieci, które uwzględniają zarówno lokalne, jak i globalne konteksty. Ostatecznie, serią warstw konwolucyjnych i dekonwolucyjnych tworzona jest mapa gęstości, przedstawiająca rozmieszczenie i koncentrację obiektów na obrazie [6]. Jest to metoda bardziej uniwersalna, która powinna sprawdzić się do różnych obiektów. Jednak oba opracowania opisują metody analizy statycznych obrazów. Kiedy obrazem jest wideo - obiekty się poruszają - trzeba je śledzić między klatkami aby poprawnie je policzyć. Metodę bardzo dobrze opisano w artykule “Real-time Accurate Object Counting for Smart Farms”, gdzie celem było zliczanie żywca. Metoda zliczania obiektów przedstawiona w dokumencie opiera się na analizie obrazu wideo, szczególnie skoncentrowanej na rzeczywistym, dokładnym zliczaniu obiektów w inteligentnych gospodarstwach rolnych. Proces rozpoczyna się od filtrowania klatek, aby zmniejszyć obciążenie obliczeniowe, wybierając te ramki, w których obiekty są mniej nałożone i łatwiejsze do zliczenia. Następnie przeprowadzana jest detekcja i zliczanie obiektów za pomocą zmodyfikowanej wersji Faster R-CNN, czyli konwolucyjnej sieci neuronowej znanej z efektywnej detekcji obiektów. Na koniec stosuje się fuzję zliczeń, gdzie wyniki z wielu klatek są łączone w celu zwiększenia dokładności, uwzględniając stopień nałożenia się obiektów, aby ważyć pewność zliczeń z każdej ramki [7]. Jednak wszystkie opisane do tej pory metody są dosyć złożone i angażują sztuczną inteligencję. W celu realizacji tak prostego zadania jak zliczanie ziarenek granulatu można oprzeć się tylko na technikach przetwarzania obrazu. Świetym przykładem takiej realizacji jest praca pt. “Analiza możliwości wykorzystania systemu wizyjnego do rozpoznawania typu wiórów”. Algorytm rozpoczynał od wyizolowania składowej jasności obu obrazów – wejściowego i referencyjnego, a następnie przeprowadzał redukcję szumów przy użyciu filtra medianowego z maską 6x6 pikseli. Po filtracji, obrazy były od siebie odejmowane, co pozwalało na wyodrębnienie różnic, a analiza skupiała się wyłącznie na wybranym obszarze zainteresowania (ROI) o rozdzielczości 734 x 1146 pikseli. W końcowym etapie, stosowano progowanie z wartością progu ustaloną empirycznie, a obiekty, które nie spełniały kryterium minimalnej wielkości określonej przez parametr Waddel Disk Diameter, były eliminowane [8].

Ostatnim aspektem funkcjonalnym ekspresu do herbaty, który poddaje rozważaniom jest automatyczne wykrywanie wielkości kubka, czy szklanki. Klasycznie problem można próbować rozwiązać przez kilka umieszczonych nad sobą czujników odbiciowych. Jednak rozwiązanie posiada szereg wad: obliczanie wielkości będzie zgrubne - tj. przyjmując stała średnicę kubka, będziemy mieli wartości progowe wysokości - uzależnione od ilości czujników. Jeżeli użyjemy do tego czujników podczerwieni, jak opisano w książce “Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs,

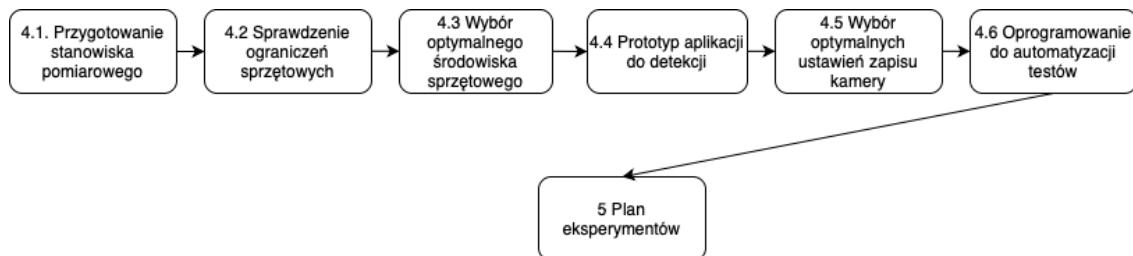
and Applications 2015” w rozdziale 15 Light Detectors, istnieje spore ryzyko że światło o błyszczących powierzchni nie będzie odbite wystarczająco dobrze, lub tak jak w przypadku przeźroczystych obiektów, zostanie rozproszone i w ogóle nie wróci do detektora [2]. Przykładowe rozwiązanie pomiaru wielkości za pomocą systemu wizyjnego opisano w artykule “Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision”. Na początku następuje akwizycja obrazu, który jest konwertowany na sygnał cyfrowy, a potem przesyłany do komputera. Dalej obraz jest przetwarzany do skali szarości i oczyszczany z szumów, po czym następuje detekcja krawędzi w celu pomiaru wymiarów, takich jak wysokość kolumny i promień podstawy. Na koniec, po wcześniejszej kalibracji systemu, do wyników dodawana jest poprawka [9]. Z kolei algorytm detekcji przedstawiony w publikacji “Application of machine vision technology in geometric dimension measurement of small parts” rozpoczyna się od akwizycji obrazu. Następnie przechodzi przez etap przetwarzania wstępne, które obejmuje oczyszczenie i przygotowanie obrazu do analizy. W kolejnych krokach algorytm wykrywa krawędzie obiektu na obrazie, dopasowuje je do znanych kształtów (fiting), a na końcu generuje wyniki pomiarów, które mogą być wykorzystane do dalszej analizy lub wyświetlenia [10]. W odróżnieniu od poprzedniego rozwiązania występuje tutaj dopasowanie wykrytych obiektów do znanych. Takie rozwiązanie mogłoby być całkiem dobre, kiedy na przykład mamy znanych kilka kubków, szklanek i filiżanek. Najprostszą, ale możliwe że najlepszą metodą może być rozwiązanie przedstawione w “An Embedded Real-Time Object Detection and Measurement of its Size”. Początek działania jest bardzo zbliżony do wcześniejszych rozwiązań i obejmuje akwizycję obrazu, preprocessing, wykrywanie krawędzi. Tutaj jednak do samego określenia wielkości wykorzystano jedynie prostokąt - “bounding box”, który okala wykryte krawędzie. Rozwiązanie bardzo proste, ale dla maszyny, która potrzebuje zgrubnie określić wielkość kubka może być to wystarczające [11].

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury można stwierdzić, że zastosowanie technik wizyjnych w procesie dozowania w maszynie do herbaty oferuje znaczące możliwości ulepszenia, usprawnienia i automatyzacji tego procesu. Choć klasyczne metody pomiarowe, takie jak różne rodzaje czujników przepływu czy pomiar wagowy, są dobrze znane, sprawdzone i szeroko stosowane, ich ograniczenia w zakresie dokładności, kosztów i rozmiaru sprawiają, że technika wizyjna staje się atrakcyjną alternatywą. Na podstawie wyszukanych tekstów można wywnioskować, że systemy wizyjne mogą być użyteczne nie tylko do zgrubnego określenia ilości płynów i granulatu, ale również do określenia rozmiaru naczyń, takich jak kubki czy szklanki. Wykorzystanie zaawansowanych technik przetwarzania obrazu, takich jak detekcja krawędzi, segmentacja obrazu czy nawet zastosowanie sieci neuronowych, umożliwia efektywne i precyzyjne rozwiązania, które są jednocześnie mniej kosztowne i elastyczne w implementacji. Wyniki tej analizy literatury wskazują, że dalsze badania i rozwój w tym kierunku mogą przyczynić się do znaczącego postępu w automatyzacji i optymalizacji tych procesów.

4. Opis środowiska testowego

W tym rozdziale zostało opisane przygotowanie środowiska testowego. Jak

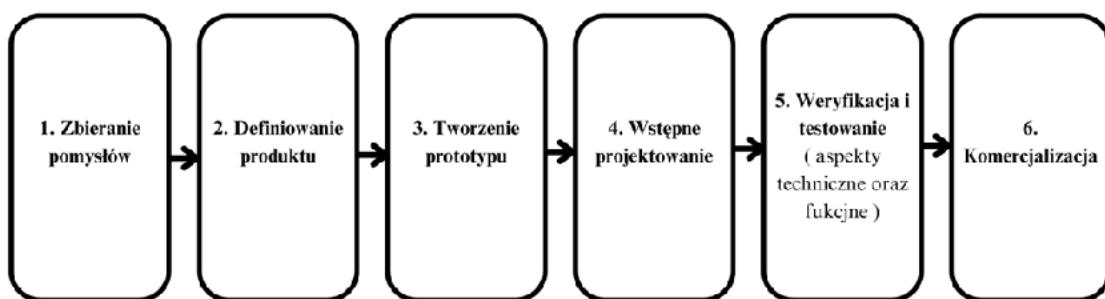
w każdym projekcie na etapie badań i rozwoju dokonywane jest wiele zmian. Na rysunku 4.1 przedstawiono kolejne etapy przygotowania środowiska testowego. Jednak proces przygotowania w rzeczywistości polegał na ciągłych iteracjach, powrotnach do kroków poprzednich, celem usprawnienia środowiska testowego, celem uzyskania lepszych wyników. W tym rozdziale opisano jedynie optymalne ustawienia, które wykorzystano w trakcie prowadzenia eksperymentów, z uzasadnieniem i ewentualnym opisem wcześniejszych ustawień, które powodowały gorsze wyniki.



Rys. 4.1 Etapy przygotowania środowiska testowego

4.1 Przygotowanie stanowisko pomiarowego - maszyny będącej przedmiotem badań

Projekt jest w ciągłym rozwoju od 3 lat. Aktualnie prototyp znajduje się w fazie testów i weryfikacji - etap 5. rys. 4.1.1. Szczególnym obiektem badań jest poprawność działalności użytych czujników. W tym miejscu należy zaznaczyć że początkowo zamontowane czujniki okazały się nie spełniać założeń funkcjonalnych. Zamontowane czujniki podczerwieni odbiorcze, obecności cieczy pojemnościowe, bariery podczerwieni, miniatura turbinki wprawiane w ruch przepływem cieczy nie były dość powtarzalnym i miarodajnym sposobem pozyskiwania informacji o pracy elementów maszyny. Z tego względu nie było możliwe zweryfikowanie ich działania i przeprowadzenia prawidłowych badań pomiarowych. Dlatego w niniejszej pracy działanie czujników pierwotnie zamontowanych nie będzie poddane ocenie. Zamiast tego jako metody referencyjne, klasyczne do pomiaru masy i objętości zostaną użyte sprzęty nie wchodzące w skład konstrukcji urządzenia, takie jak waga.



Rys.4.1.1 Etapy procesu rozwoju nowego produktu. Opracowanie własne.

Źródło: www.asana.com

Na etapie przeprowadzania wymienionych eksperymentów, w skład maszyny, przedstawionej na rys. 4.1.2, wchodzą następujące komponenty:

- komputer jednopłytkowy Raspberry PI Zero 2 wraz z ekranem dotykowym 7 cali - służą jako główny komputer urządzenia odpowiedzialny za wyświetlanie interfejsu graficznego, komunikację z internetem i aktualizowanie oprogramowania ze zdalnego repozytorium oraz komunikację poprzez port USB z płytą sterującą wszystkimi elementami wykonawczymi
- płyta sterująca oparta o mikrokontroler Raspberry PI Zero, wraz z ekspanderami wyjść podłączonymi do magistrali I2C - steruje wszystkimi urządzeniami wykonawczymi - grzałkami, silownikami, pompami, silnikami podajników oraz zbiera dane z czujników pojemnościowych obecności cieczy, podczerwonych szczelinowych do pomiaru przysłonięcia, temperatury, przepływu, itp.
- zaparzacz do herbaty
- podajniki śrubowe do dozowania dodatków w postaci granulatów
- dozowniki do dodatków płynnych
- pompy tłoczące wodę przez zaparzacz
- kamera OV5647 widoczna na rys 4.1.3. podłączona do Raspberry PI Zero 2 skierowana na obszar przygotowywania herbaty

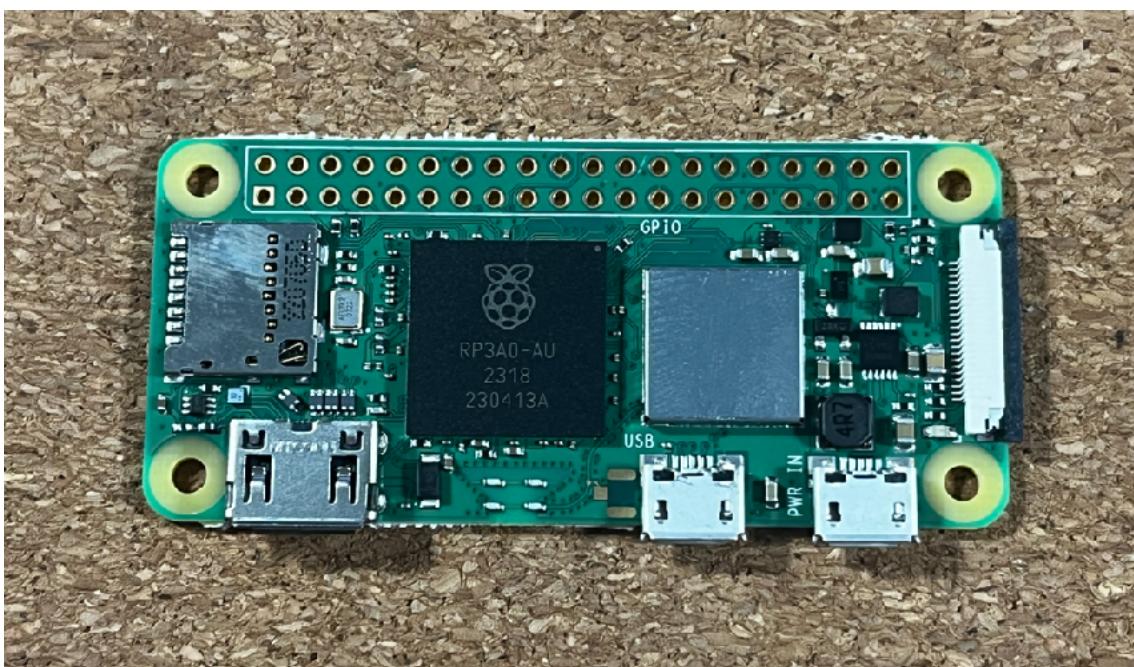


Rys. 4.1.2 Ekspres do herbaty. Opracowanie własne.



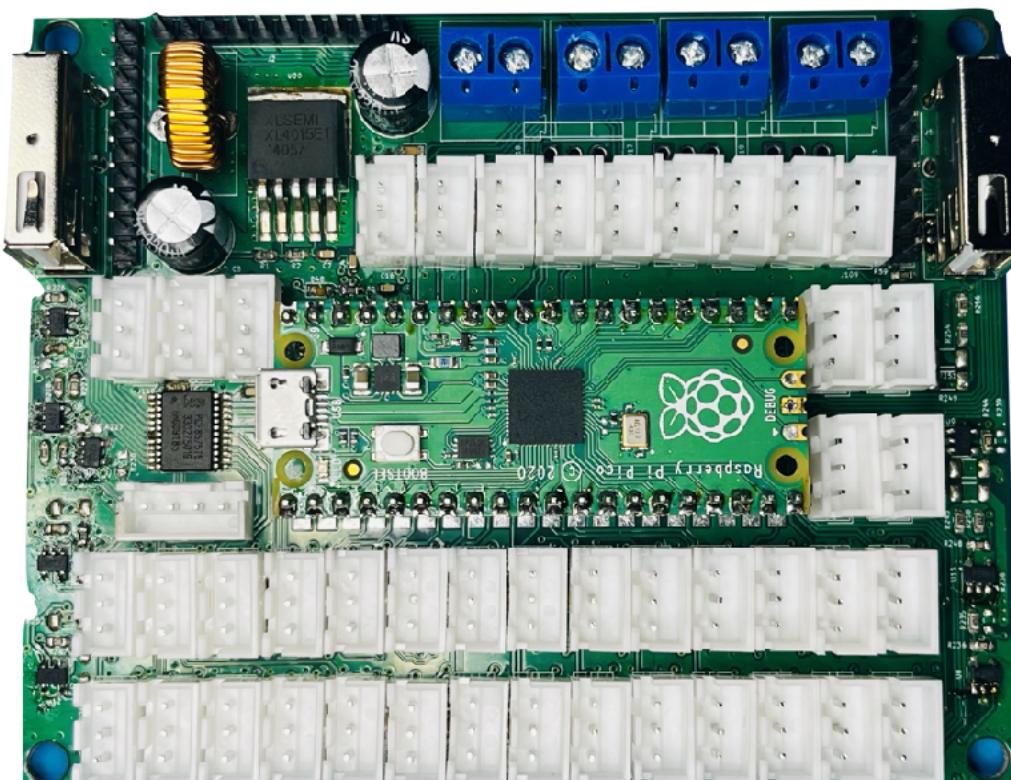
Rys. 4.1.3. Kamera i obszar przygotowania napoju. Opracowanie własne.

Na komputerze jednopłytkowym Raspberry PI Zero 2, przedstawionym na rysunku 4.1.4., został zainstalowany system operacyjny Raspbian z graficznym interfejsem użytkownika. Jest to rekomendowana dystrybucja przez producenta urządzenia. Dzięki temu nie było wymagane ręczne instalowanie sterowników do periferii takich jak wi-fi, kamera, czy ekran dotykowy.



Rys 4.1.4. Komputer jednopłytkowy Raspberry PI Zero 2. Opracowanie własne.

Opisany komputer podłączony jest do mikrokontrolera Raspberry PI PICO poprzez port USB. Na mikrokontrolerze uruchomiony jest kod sterujący poszczególnymi urządzeniami wykonawczymi, zbierającymi dane z czujników, zapewniające podstawowe funkcje bezpieczeństwa, np. blokowanie włączenia grzałki kiedy pompa do wody jest wyłączona. Wszystkie wymienione urządzenia wejściowe lub wyjściowe nie są podłączone do mikrokontrolera bezpośrednio, ale przez dodatkową płytę sterującą przedstawioną na rysunku 4.1.5., która jak zaznaczono wcześniej była przedmiotem pracy dyplomowej inżynierskiej autora.



Rys. 4.1.5. Płytki sterujące ekspresem do herbaty wraz z mikrokontrolerem Raspberry PI PICO. Opracowanie własne.

Raspberry PI PICO obsługuje funkcje krytyczne. Komunikacja między nim a Raspberry PI Zero 2 odbywa się za pomocą portu szeregowego. Wysyłając na niego odpowiednio sformatowane komendy można łączać i wyłączać poszczególne urządzenia.

Przykładowa komenda łącząca pompę numer 7:

```
> P7:ON
```

Przykładowa komenda wyłączająca pompę numer 7:

```
> P7:OFF
```

4.2 Sprawdzenie ograniczeń sprzętowych

Mając na uwadze, że zastosowany komputer w ekspresie (Raspberry PI Zero 2) ma bardzo ograniczone zasoby, przed wykonaniem wszystkich eksperymentów rejestrówanych, przetestowano możliwość uruchomienia oprogramowania do detekcji obrazu na sprzęcie docelowym. W tym celu stworzono program testowy przedstawiony jako kod 4.2.1.

```
import cv2
import numpy as np
from picamera import PiCamera
from picamera.array import PiRGBArray
import sys
import time

# Ustawienia kamery
camera = PiCamera()
camera.resolution = (640, 480)
camera.framerate = 32
rawCapture = PiRGBArray(camera, size=(640, 480))

# Oczekiwanie na uruchomienie kamery
time.sleep(0.1)

# Ustawienie obszaru detekcji
detection_width = 150
detection_height = 250
x_start = (camera.resolution[0] // 2) - (detection_width // 2)
y_start = camera.resolution[1] - detection_height

# Inicjalizacja zmiennych
active_seconds = 0.0
cumulative_count = 0

# Odbiór obrazu z kamery
try:
    for frame in camera.capture_continuous(rawCapture, format="bgr", use_video_port=True):
        image = frame.array
        gray_image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
        if 'prev_frame' in locals():
            detection_area = gray_image[y_start:y_start+detection_height, x_start:x_start+detection_width]
            prev_detection_area = prev_frame[y_start:y_start+detection_height, x_start:x_start+detection_width]
```

```
frame_diff = cv2.absdiff(detection_area, prev_detection_area)
_, thresh = cv2.threshold(frame_diff, 30, 255, cv2.THRESH_BINARY)
contours, _ = cv2.findContours(thresh, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
active_in_frame = False
for contour in contours:
    if cv2.contourArea(contour) > 100:
        x, y, w, h = cv2.boundingRect(contour)
        cv2.rectangle(image, (x_start + x, y_start + y), (x_start + x + w, y_start + y + h), (0, 255, 0), 2)
        cumulative_count += 1
        active_in_frame = True
if active_in_frame:
    active_seconds += (1 / camera.framerate) * 4 # Czas aktywności mnożony przez 4

sys.stdout.write(f"\rDetected Drops: {cumulative_count}, Active Time: {active_seconds:.2f} seconds")
sys.stdout.flush()

cv2.rectangle(image, (x_start, y_start), (x_start + detection_width, y_start + detection_height), (0, 0, 255), 2)
cv2.imshow("Frame", image)

key = cv2.waitKey(1) & 0xFF
rawCapture.truncate(0)
if key == ord("q") or key == 27:
    break

# Zapisz aktualny obraz do przetwarzania w następnej iteracji
prev_frame = gray_image

finally:
    cv2.destroyAllWindows()
    camera.close()
```

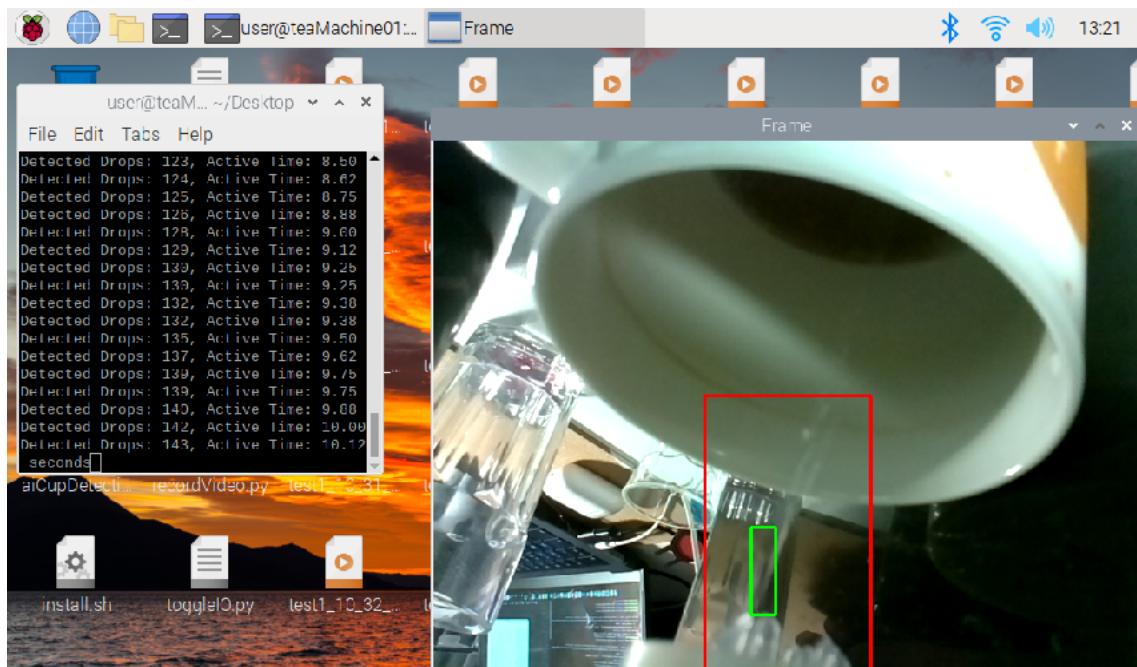
Kod 4.2.1. dropsivedetection.py - Program do wykrywania kropel w czasie rzeczywistym

Program miał na celu dokonanie detekcji przelatujących kropli wody, na żywo, w czasie rzeczywistym. Sam algorytm detekcji jest bardzo prosty - wyszukuje różnice pomiędzy poszczególnymi klatkami filmu, w obszarze zainteresowania obrysowanym czerwonym prostokątem.

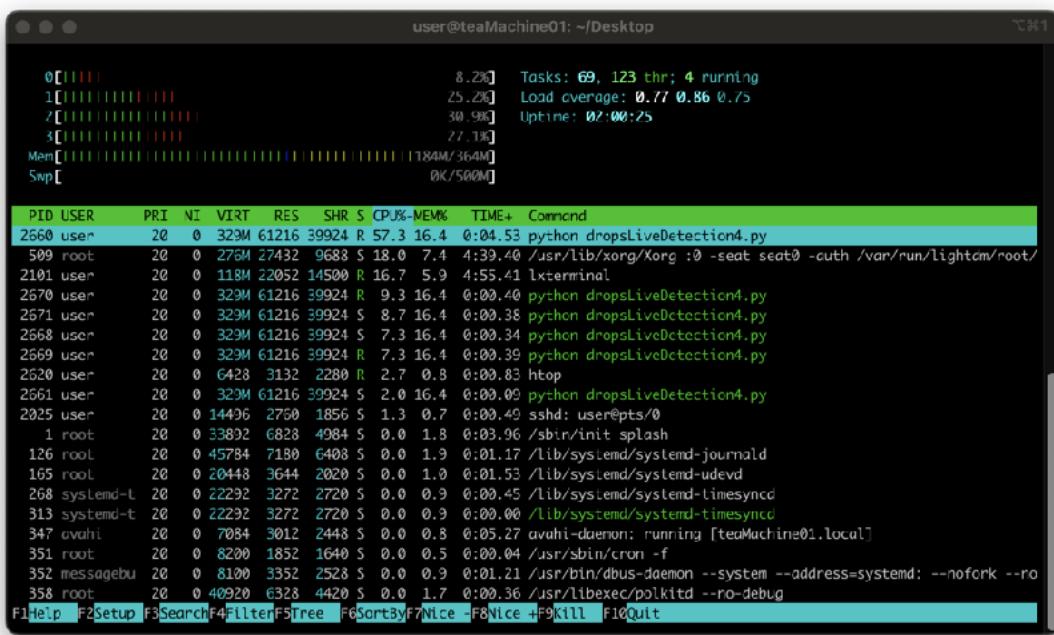
Jednak ilość operacji takich jak: odczyt obrazu z kamerki, analiza różnic pomiędzy klatkami, naniesienie prostokątów obrysowujących różnice oraz wyświetlanie obrazu po przeprowadzonych operacjach, z reguły wymagają dużej złożoności obliczeniowej. Pomimo tego program bez problemu uruchomił się na komputerze Raspberry PI Zero 2.

Na załączonym rysunku 4.2.1 przedstawiono okno programu, który skutecznie wykrywa przelatujące krople wody. W trakcie pracy programu, co pokazano na rysunku 4.2.2, użycie pamięci RAM nie przekracza 40%. Średnie zużycie procesora jest

na poziomie 20%. Z tego prostego testu można wywnioskować że uruchomienie programów z podobną złożonością obliczeniową jest możliwe, a co więcej jest jeszcze zapas mocy do uruchomienia bardziej skomplikowanych programów na komputerze urządzenia ekspresu do herbaty.



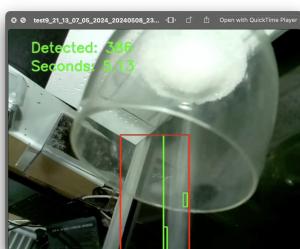
Rys. 4.2.1. Efekt działania programu dropsLiveDetection



Rys. 4.2.2 Użycie zasób podczas pracy programu dropsLiveDetection

4.3 Wybór optymalnego środowiska sprzętowego

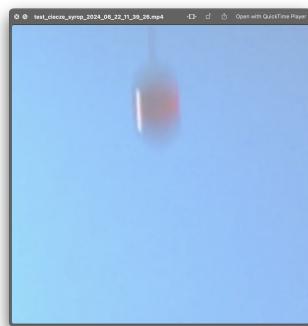
W tym rozdziale opisano wybór optymalnych ustawień sprzętów i zmiany fizycznych w elementach maszyny. Wszystkie zmiany zostały wprowadzone, po uprzednim przetestowaniu różnych algorytmów detekcji. W przypadku systemu wizyjnego nie wszystko można poprawić za pomocą skuteczniejszego oprogramowania. W przypadku ekspresu do herbaty wiązało się to ze zmianami ustawień kamery, oświetlenia, czy wymianami części maszyny. Na rysunku 4.3.4. przedstawiono pierwotne ustawienie kamery oraz na rysunku 4.3.1 widok z obiektywu kamery. Jak się okazało w trakcie testów - nie możliwe było powtarzalne i miarodajne oszacowanie ilość dozowanych produktów. Użyta kamera rejestrowała za mało klatek na sekundę, obraz był rozmyty i zbyt niskiej rozdzielczości. Wykrywanie kubków okazało się bardzo trudne. Jeszcze trudniejsze przy kamerze zamontowanej pod kątem okazało się szacowanie wielkości kubka. Optymalne ustawienie przedstawiono na rysunku 4.3.2. Na rysunku 4.3.3 przedstawiono optymalne widok kamery, dobrany eksperymentalnie do detekcji cieczy i granulatów. Jak pokazano na rysunku 4.3.5 kamera w tym wypadku została zamontowana poza maszyną, na dodatkowym ramieniu.



Rys. 4.3.1 Pierwotne ustawienie kamery



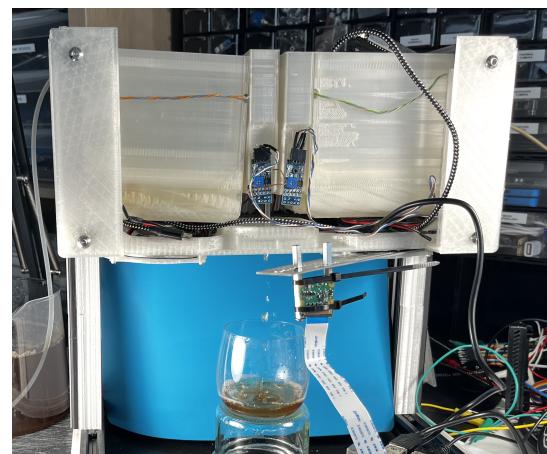
Rys. 4.3.2 Optymalne ustawienie kamery do detekcji kubków



Rys. 4.3.3. Optymalne ustawienie kamery do detekcji cieczy i granulatów

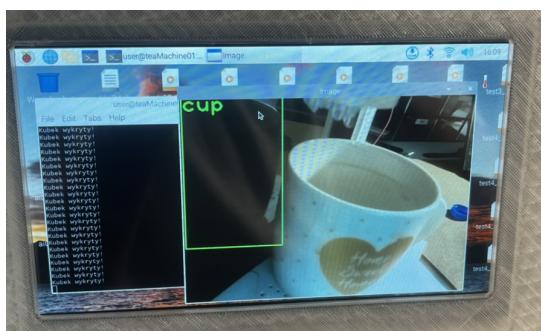


Rys. 4.3.4. Stanowisko testowe przy pierwszych testach

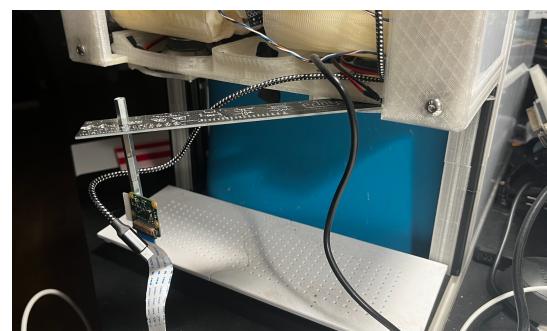


Rys. 4.3.5 Optymalne stanowisko testowe do detekcji przelatujących cieczy

Ostatnim problematycznym aspektem okazał się przedni panel maszyny. Wykonany z czarnego połyskującego materiału, powodował odbijanie się światła, padające na niego krople były bardzo widoczne w obrazie a przy detekcji kubków, jak pokazano na rysunku 4.3.6, powodował fałszywe wykrycie kubka w lustrzanym odbiciu. Ostatecznie został zmieniony na niebieski matowy materiał, jak pokazano na rysunku 4.3.7.



Rys. 4.3.6 Pierwotny połyskujący panel przedni



Rys. 4.3.7 Matowy panel niebieski użyty w trakcie testów

Zmieniono również oświetlenie. Jak się okazało trudne były stworzenie algorytmu detekcji powtarzalnego w różnych warunkach oświetleniowych. Przy szybkiej rejestracji obiektów, przy ustawionej maksymalnej czułości kamery, mała ilość światła powodowała słabe odwzorowanie obiektów i nie dało się tego skorygować żadnymi poprawkami na obrazie. Ostatnie poza zapewnieniem stałego umiejscowienia kamery było zamocowanie stałego doświetlenia miejsca dozowania, które w przyszłości zostanie zastąpione zintegrowanymi z maszyną naświetlaczami.

4.4 Prototyp aplikacji do detekcji

W trakcie prób detekcji przelatujących obiektów zastosowano różne podejścia do problemu. Ze względu na ograniczenia sprzętowe kamery, komputera oraz specyfikę wykrywanych obiektów, wiele algorytmów nie dawało dobrych rezultatów. W tym rozdziale opisano jakie podejścia zastosowane, jakie dały rezultaty oraz jakie były z nimi problemy. Wszystkie stworzone aplikacje do detekcji zostały napisane w języku python. Do operacji na obrazie wykorzystano bibliotekę OpenCV, do odczytu i zapisu plików wideo moduł OS, do eksportu wyników w postaci tekstopowej zaś bibliotekę CSV. Wśród przetestowanych podejść sprawdzono:

Detekcję krawędzi - pierwszym rozsądny podejściem wydawało się wyizolowanie pojedynczych kropel lub granulek za pomocą filtrów krawędziowych. Próbowało wyizolować obiekty za pomocą filtrów Cannego, Sobela, Prewitta, operacji erozji i dylatacji. Jednak żadne z wymienionych z dowolnymi nastawami nie dał dobrych efektów. Analizując poszczególne etapy potoku przetwarzania wideo da się zauważyć że w przypadku kropel problemem było, że produkty które nalane do naczynia mają wyraźną barwę - jak mleko białą, czy herbata odcień zółci i pomarańcza - w postaci kropel wyglądają prawie tak przeźrocznie jak woda. Przez to ciężko o wyraźne wyizolowanie krawędzi obiektów które wyraźnie przepuszczają kolor tła, bardzo mocno się do niego zbliżając. Nawet jeżeli w dowolnej klatce światło załamuje się w ten sposób że część obrysu krawędzi jest widoczna, brak całkowitego obrysu skutkuje zaklasyfikowaniem kropli jako znacznie mniejszej, co w efekcie skutkuje znaczącym błędem pomiarowym. W przypadku granulek z kolei problem z dowolną detekcją krawędzi był spowodowany wciąż zbyt niską liczbą klatek na sekundę. Przelatujące granulki są delikatnie rozmyte, co uniemożliwiało skuteczną analizę.

Detekcję koloru - innym podejściem, które próbowało zastosować było wykrywanie konkretnej barwy. Celowo tło wybrano w niebieskim kolorze, aby zawierało barwę nie występującą w produktach spożywczych. Celem algorytmu było wyizolowanie z obrazu tylko tych obiektów, które posiadają poszukiwaną barwę wzorcową. Algorytm był w stanie izolować z zadowalającym rezultatem syrop malinowy - o wyraźnej czerwonej barwie, jednak nie był w stanie skutecznie wychwycić ani herbaty ani mleka. Oba produkty przelatując w formie kropel mają wyraźnie jaśniejszą barwę - klarownością nie odstępują mocno od kropel wody. Powodowało to że niebieskie tło wyraźnie prześwitywało przez krople. W przypadku granulatów podstawowym problemem były różne barwy poszczególnych składników. Poszczególne suszone owoce mają znaczaco różne odcień, a mieszanka różnych składników suszonych w ogóle uniemożliwiała detekcję. Dodatkowym problemem było rozmycie granulek na poszczególnych klatkach. W przypadku rozmycia nastawa programu na właściwą barwę nie dawała dobrych wyników, ze względu na łagodne przejście barw w miejscu nieostrości. Nie udało się uzyskać zadowalających wyników tą metodą.

Kluczowanie barwy - kolejnym pomysłem był wykorzystywane w produkcjach video kluczowanie barwy niebieskiej. Pomyśl podobny do poprzedniego, lecz odwrotny. Autor starał się usunąć z obrazu barwę niebieską, pozostawiając tylko przelatujące obiekty. Pierwszym problemem okazało się nierównomierne oświetlenie. Całkowite usunięcie barwy wymagało znacznego rozszerzenia zakresu barw do kluczowania. Niestety równolegle poskutkowało to również praktycznie całkowitym usunięciem kropel przez które prześwitywało tło. Brak całkowitego obrysu kropli uniemożliwił skuteczne określenie powierzchni widocznej na obrazie. Ostatecznie zrezygnowano również i z tej metody.

Śledzenie obiektów - starano się również śledzić poszczególne obiekty - krople lub granulki. Niestety okazało się to niemożliwe do zrealizowania przy tak ograniczonym sprzęcie. Wielokrotnie wspomniano że obraz z kamery nawet przy największej rejestrowanej liczbie klatek na sekundę jest delikatnie rozmyty. Przelatujące obiekty przekręcają się w trakcie lotu, zderzają się ze sobą i znaczaco zmieniają trajektorię lotu. Wszystko to powodowało że nie udało się zrealizować skutecznego zliczania poszczególnych obiektów.

Analiza różnic w obrazie pomiędzy klatkami - kolejnym pomysłem była analiza różnic pomiędzy poszczególnymi klatkami w obrazie. Jak zauważono przelatujące krople czy granulki pomiędzy klatkami doznają znaczącego przesunięcia. Dla dobranych ustawnie każdy obiekt przelatując przed kamerą jest rejestrowany zaledwie na ośmiu klatkach. Celem uproszczenia detekcji tych samych obiektów poruszających się pomiędzy klatkami - analizie poddawana jest tylko co ósma klatka obrazu. Algorytm, przedstawiony jako kod 4.4, poszukuje różnic pomiędzy sąsiadującymi obrazami. Każde piksele, które zmieniły się pomiędzy klatkami o wartość większą niż ustalony próg klasyfikowane są jako wykryty obiekt. Obliczana jest całkowita powierzchnia wykrytych obiektów, początkowo w pikselach, później przeliczana na milimetry kwadratowe. Przelicznik został dobrany eksperymentalnie - za pomocą linijki umieszczonej w kadrze na odległość odpowiadającą przelatującym składnikom. Metoda oczywiście ma wadę postaci błędu w szacowaniu powierzchni kiedy składniki przelatują bliżej lub dalej od kamery. Jak wspomniano wcześniej każdy składnik jest widoczny na ośmiu klatkach. Chcąc poprawnie określić jego powierzchnię intuicyjne wydaje się by uwzględnić jego obecność 8 razy i tylko raz dodać jego powierzchnię do całkowitej zliczonej powierzchni. Można by to było uczynić z zastosowaniem średniej arytmetycznej - wyliczenie średniej powierzchni z obecnością na 8 klatkach. Jednak ze względu na mnogość obiektów przelatujących na raz oraz wspomniane wcześniej problemy ze śledzeniem pojedynczych obiektów zdecydowano się uprościć metodę obliczania i zostawić sumowanie obiektów na wszystkich klatkach i na końcu do wyniku zastosować poprawkę, dobraną drogą eksperymentu. W tej metodzie oczywiście nie ma bezpośredniego przeliczenia powierzchni dwuwymiarowych obiektów na objętość. Autor poczynił założenie że krople dozowanych płynów, czy granulek mają dosyć powtarzalne kształty i zastosowanie stałego przelicznika, dobranego drogą eksperymentu na objętość lub masę może dać zadowalające wyniki. Jak wstępnie ustaloną drogą eksperymentu -

założenie nie było błędne, dla różnych czasów dozowania wyniki pomiędzy objętością zmierzona metodami klasycznymi a powierzchnią obliczoną z wizji pozostawały w bardzo zbliżonej korelacji.

```
# Funkcja przetwarzająca pojedynczą klatkę wideo, aby uzyskać różnicę między aktualną a poprzednią klatką
def process_frame(current_frame_gray, previous_frame_gray):
    frame_diff = cv2.absdiff(current_frame_gray, previous_frame_gray) # Obliczenie różnicy między klatkami
    _, thresh = cv2.threshold(frame_diff, 30, 255, cv2.THRESH_BINARY) # Prógowanie różnicy, aby uzyskać maskę binarną
    thresh = cv2.dilate(thresh, None, iterations=2) # Rozszerzenie obszarów na masce, aby usunąć szumy
    return thresh
```

Kod 4.4. Fragment programu odpowiadający za analizę różnic pomiędzy kolejnymi klatkami

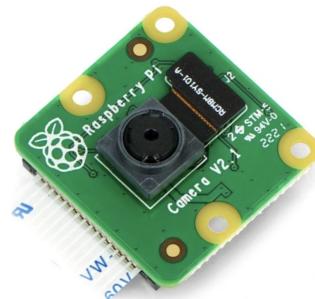
Na tym etapie przeprowadzono również testowe dozowania każdego składnika. Zarejestrowano ich masy, nagrano proces dozowania. Do każdego z produktów dobrano wartości progu dla maski binarnej. Na tym etapie wyliczono również przelicznik pomiędzy powierzchnią detekcji na obrazie w milimetrach kwadratowych a masą lub objętością - indywidualny dla każdego składnika.

4.5 Wybór optymalnych ustawień zapisu kamery

Eksperymenty prowadzone w tym rozdziale są silnie połączone z eksperymentami z rozdziału poprzedzającego, gdzie starano się znaleźć najlepszy algorytm detekcji. Jak się okazało użytka kamera do testów miała znaczący wpływ na wyniki pomiarów. Początkowo w maszynie zamontowana była kamera oparta o sensor OVA5647, przedstawiona na rysunku 4.5.1. Kamera była wystarczająca do wykrywania kubków, szacowania jego wielkości, jednak przy algorytmach detekcji zdecydowanie rejestrowany obraz był zbyt słabej jakości. Następnie próbowało wykorzystać kamerę z sensorem IMX708, przedstawioną na rysunku 4.5.3. Kamera jest w stanie rejestrować obraz o rozdzielcości 4k, ma autofocus, jednak nie oferuje zapisu w wysokiej liczbie klatek na sekundę. Dlatego też użyto kamery opartej o sensor IMX219. Kamera jest w stanie rejestrować przy niskiej rozdzielcości do 205 klatek na sekundę, albo przy rozdzielcości 1920x1080 do 60 klatek. Dodatkowo ma manualny focus, który w tym zastosowaniu jest zdecydowanie bardziej pożądanym.



Rys. 4.5.1. Raspberry PI camera V1 OVA5647. Źródło bootland.com

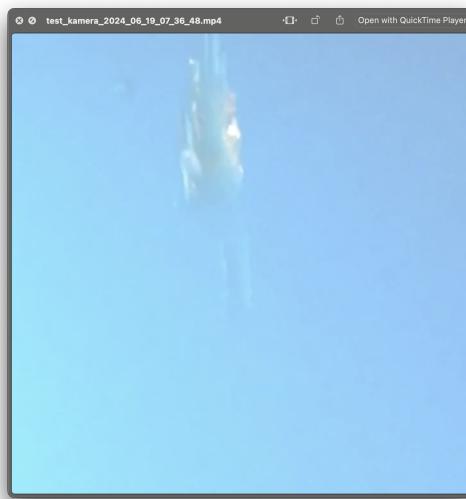


Rys. 4.5.2. Raspberry PI camera V2 IMX219. Źródło bootland.com



Rys. 4.5.3. Raspberry PI camera V3 IMX708. Źródło bootland.com

Po wyborze kamery do detekcji opartej na sensorze IMX219 przeprowadzono szereg testów, mających na celu wybór najlepszych ustawień rejestracji przez kamerę. Widok z kamery, nie zmieniając jej położenia przedstawiono na rys. 4.5.4 - 4.5.7. Wartości były dobrane eksperymentalnie - związane bezpośrednio z możliwym najszybszym transferem po interfejsie kamerowym CSI. Przedstawione kombinacje oferowały możliwie największą ilość zarejestrowanych klatek na sekundę przy każdej z wybranych rozdzielczości bez utraty żadnych ramek w trakcie zapisu.



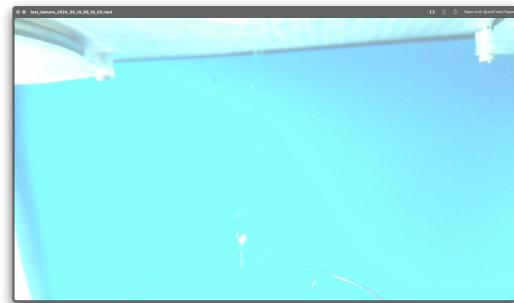
Rys. 4.5.4 Ustawienie rejestracji na rozdzielcość 720x720 oraz 205 kl/sek



Rys. 4.5.5 Ustawienie rejestracji na rozdzielcość 1280x720 oraz 112 kl/sek

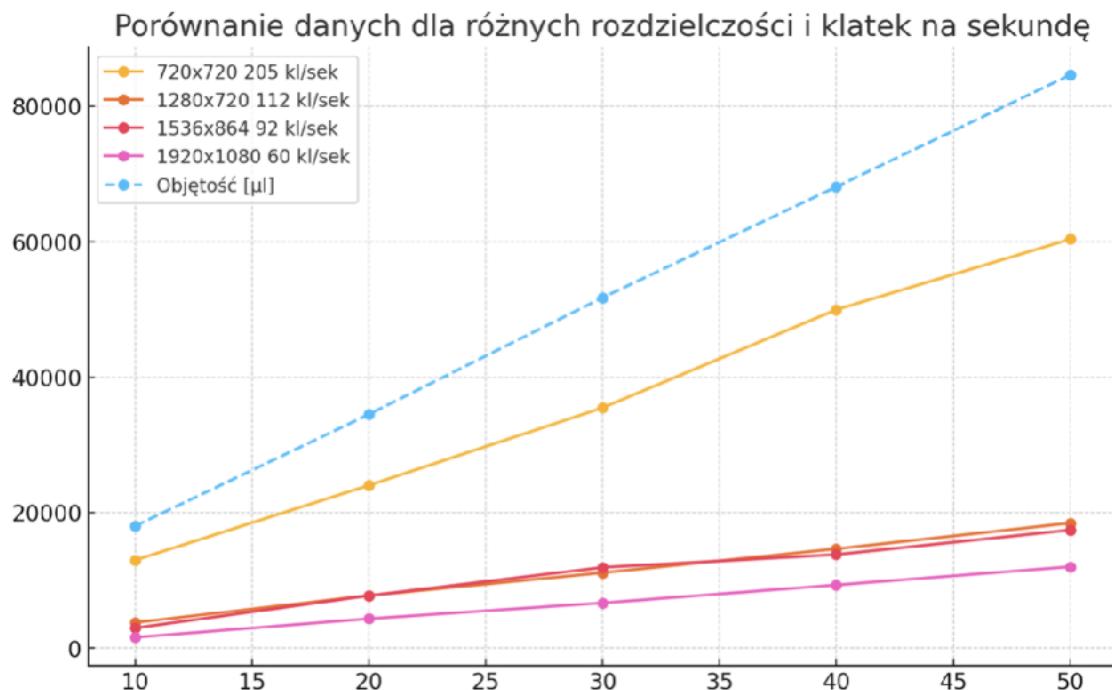


Rys. 4.5.6 Ustawienie rejestracji na rozdzielcość 1536x864 oraz 92 kl/sek

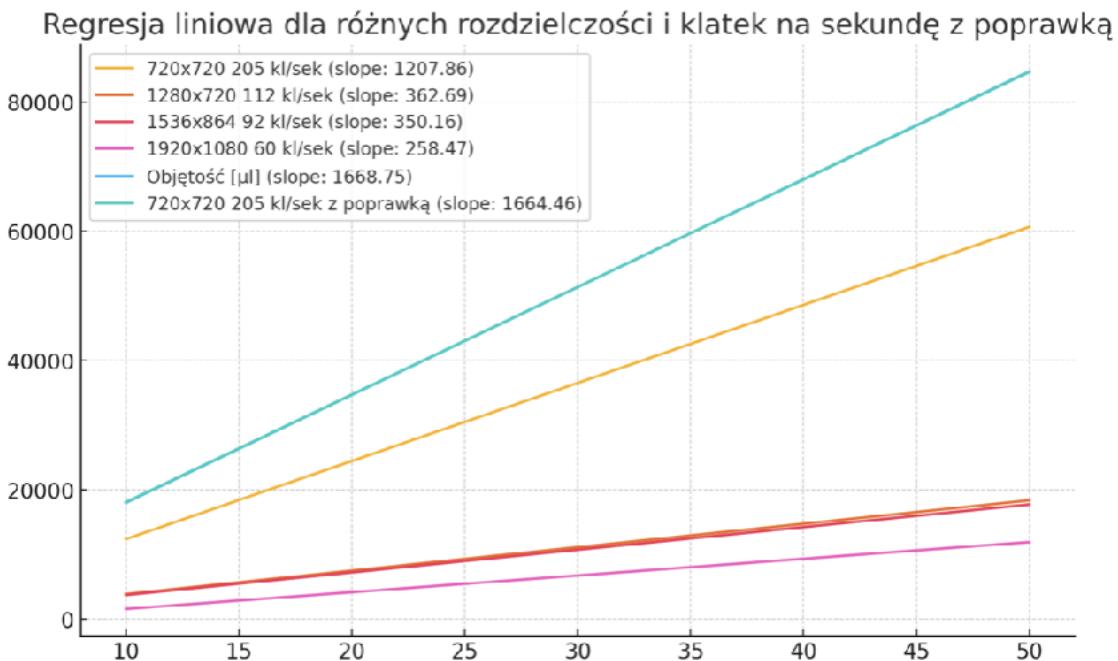


Rys. 4.5.7. Ustawienie rejestracji na rozdzielcość 1920x1080 oraz 60 kl/sek

Dla każdego z ustawień kamery dokonano próbnej detekcji przelatujących kropli. Wyniki zebrane na wykresie na rys. 4.5.8. Na osi rzędnych przedstawiono w sekundach czas dozowania, natomiast na osi odciętych liczbową wartość detekcji. Jak wspomniano wcześniej nie ma bezpośredniego przeliczenia detekcji dwuwymiarowej na objętość, dlatego na tym samym wykresie przedstawiono na niebiesko objętość w mikrolitrach, celem porównania jedynie jak bardzo wyniki dla poszczególnych czasów korelują się z ilością. Jak widać na wykresie właściwie korelacja zachodzi dla każdego ustawienia kamery, ogólny trend jest wzrostowy dla każdego ustawienia. Dodatkowo na rys. 4.5.9 pokazano wyniki w formie regresji liniowej. Jak można wywnioskować z obu wykresów ustawieniem które dało najlepszą korelację było 720x720 pixeli, przy 205 klatkach na sekundę. Dlatego też do późniejszych testów detekcji zdecydowano się wybrać właśnie to ustawienie.



Rys. 4.5.8 Próbną detekcję dla różnych ustawień kamery



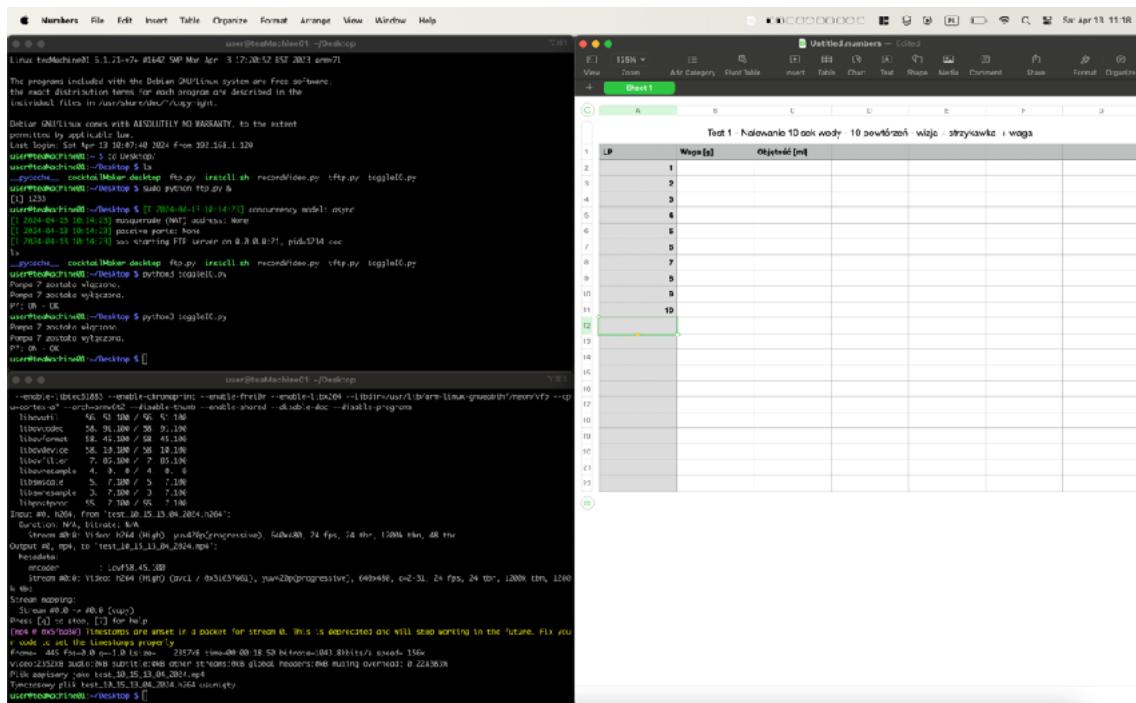
Rys. 4.5.9 Próbną detekcję dla różnych ustawień kamery, regresja liniowa wyników

4.6 Oprogramowanie do automatyzacji testów

Przeprowadzanie eksperymentów, akwizycja danych, zapisywanie wyników są bardzo czasochłonnymi procesami. Biorąc pod uwagę zasób jakim jest czas, warto rozważyć automatyzację podobnych procesów, które mają charakter powtarzalny. Dlatego też do zapisu, nazywania i nagrywania eksperymentów przygotowano kilka skryptów w pythonie do zautomatyzowania tego procesu. Wszystkie pomiary były prowadzone zdalnie, za pomocą komputera klasy osobistej, laptopa podłączonego do tej samej sieci lokalnej co komputer wbudowany ekspresu do herbaty - oba widoczne na rys. 4.6.1. Zdalne połączenie było prowadzone za pomocą zdalnej konsoli - SSH - przedstawione na rys. 4.6.2.



Rys. 4.6.1 Przygotowane środowisko testowe. Opracowanie własne.



Rys. 4.6.2 Komputer połączony zdalnie z ekspresem do herbaty. Opracowanie własne.

4.6.1. Automatyzacja załączania elementów maszyny

Kod 4.3.2. przedstawia program do załączania wybranej pompy na określony czas. Przykładowe wywołanie, które załączy pompę numer 7 na 13 sekund pokazano poniżej:

```
> python3 toggleIO.py -t 13
```

```
import serial
import time
import argparse

def parse_args():
    parser = argparse.ArgumentParser(description='Kontrola pompy za pomocą Raspberry Pi Pico')
    parser.add_argument('-t', '--time', type=int, default=10, help='Czas działania pompy w sekundach')
    return parser.parse_args()

def main():
    args = parse_args()
    # Tworzenie połączenia szeregowego.
    ser = serial.Serial('/dev/ttyACM0', 115200, timeout=1)
    try:
        # Włączanie pompy nr 7
        ser.write(b'P7:ON\n')
        print("Pompa 7 została włączona.")
        # Czekanie przez określony czas
        time.sleep(args.time)
        # Wyłączanie pompy nr 7
        ser.write(b'P7:OFF\n')
        print("Pompa 7 została wyłączona.")
        # Odczytywanie odpowiedzi z Pico
        while ser.in_waiting:
            line = ser.readline().decode('utf-8').strip()
            print(line)
    finally:
        ser.close()

if __name__ == '__main__':
    main()
```

Kod. 4.6.1. Program do załączania pompy numer 7

Analogicznie możliwe jest włączanie i wyłączanie podajników śrubowych i innych urządzeń, poprzez niewielkie zmiany w kodzie i odpowiednie wywołanie aplikacji.

4.6.2 Metody zapisu oraz archiwizacji danych

Do zapisu danych z kamery opartej o sensor OV5647 napisano aplikacje w pythonie - przedstawioną jako kod 4.6.2, która po uruchomieniu rozpoczyna rejestrację obrazu z podłączonej kamery do pliku. Po zakończeniu nagrywania konwertuje plik na format .mp4 i nadaje nazwę na podstawie przedrostka wpisanego przy uruchamianiu oraz dodając datę i godzinę.

```
import argparse
from picamera import PiCamera
from datetime import datetime
import subprocess
import time

def parse_args():
    parser = argparse.ArgumentParser(description='Nagrywanie filmów z kamery Raspberry Pi i zapis jako MP4.')
    parser.add_argument('-t', '--title', type=str, required=True, help='Tytuł pliku wideo.')
    return parser.parse_args()

def main():
    args = parse_args()
    camera = PiCamera()
    camera.resolution = (640, 480) # Ustawienie rozdzielczości wideo
    now = datetime.now()
    temp_filename = f'{args.title}_{now.strftime("%H_%M_%d_%m_%Y")}.h264"
    final_filename = f'{args.title}_{now.strftime("%H_%M_%d_%m_%Y")}.mp4"

    try:
        # Rozpoczęcie nagrywania
        camera.start_recording(temp_filename)
        print(f"Nagrywanie rozpoczęte. Plik tymczasowy: {temp_filename}")
        input("Wciśnij Enter, aby zakończyć nagrywanie...")
        camera.stop_recording()
        print("Nagrywanie zakończone, trwa konwersja do MP4...")
    finally:
        camera.close()

    # Konwersja pliku do formatu MP4
    convert_command = f'ffmpeg -framerate 24 -i {temp_filename} -c copy {final_filename}'
    subprocess.run(convert_command.split())
    print(f"Plik zapisany jako {final_filename}")

    # Usuwanie tymczasowego pliku .h264
    remove_command = f'rm {temp_filename}'
    subprocess.run(remove_command.split())
    print(f"Tymczasowy plik {temp_filename} usunięty.")

if __name__ == '__main__':
    main()
```

Kod 4.6.2 Program do nagrania obrazu z kamery

Przykładowe wywołanie, które spowoduje uruchomienie nagrywania wideo o nazwie Eksperyment_3_[HH]_[MM]_[DD]_[MM]_[RRRR] pokazano poniżej:

```
> python3 recordVideo.py -t "Eksperyment_3"
```

W przypadku kamery opartej o sensor IMX219, do obsługi której używa się innego sterownika do nagrania użyto programu libcamera-vid, którego przykładowe wywołanie przedstawiono poniżej.

```
libcamera-vid --level 4.2 --framerate 112 --width 1280 --height 720 --shutter 10000 --gain 1.5 --awb tungsten --  
brightness 0.5 --contrast 1.0 --saturation 1.0 --sharpness 1.0 -o test_kamera_$(date +  
%Y_%m_%d_%H_%M_%S).h264 --denoise cdn_off -t 1000
```

4.6.3. Program do łatwego przesyłania plików pomiędzy komputerami

Wszystkie nagrane pliki są zapisywane w pamięci komputera Raspberry PI Zero 2. Jak się okazało kopiowanie plików po SSH, poleciением SCP było dosyć powolne - wywołanie go po każdym nagraniu zajmowało znaczną ilość czasu. Celem łatwego ich zgrywania na komputer zdalny napisano aplikację która uruchamia lokalny serwer FTP. Kod aplikacji wraz z komentarzami przedstawiono jako kod 4.6.3.

```
from pyftpdlib.authorizers import DummyAuthorizer  
from pyftpdlib.handlers import FTPHandler  
from pyftpdlib.servers import FTPServer  
import os  
  
def run_ftp_server():  
    # Tworzenie instancji autoryzatora  
    authorizer = DummyAuthorizer()  
    # Dodanie użytkownika (nazwa użytkownika, hasło, katalog domowy, uprawnienia)  
    # Tutaj użytkownik 'user' z hasłem '12345' ma pełne uprawnienia do katalogu '/path/to/your/directory'  
    authorizer.add_user('user', 'user', '/home/user/', perm='elradfmwMT')  
  
    # Tworzenie uchwytu FTP i powiązanie z autoryzatorem  
    handler = FTPHandler  
    handler.authorizer = authorizer  
  
    # Uruchomienie serwera na adresie 0.0.0.0 i porcie 21  
    server = FTPServer(('0.0.0.0', 21), handler)  
    server.serve_forever()  
  
if __name__ == '__main__':  
    run_ftp_server()
```

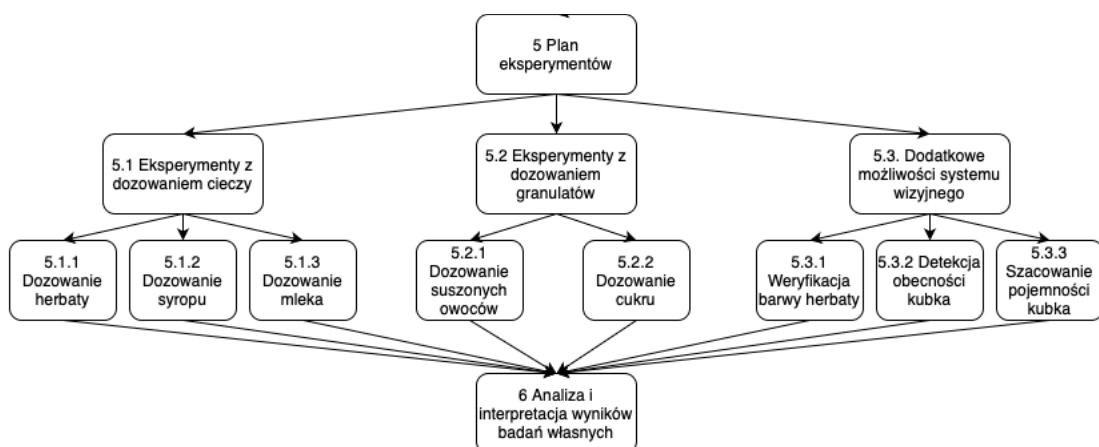
Kod 4.6.3 Program uruchamiający serwer FTP

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

Po połączeniu za pomocą klienta FTP z serwerem uruchomionym na Raspberry PI Zero
2, możliwe jest skopiowanie zapisanych plików.

5. Eksperymenty

Opisane w niniejszym rozdziale eksperymenty mają na celu umożliwić odpowiedzenie na hipotezę postawioną we wstępie - czy można zastąpić klasyczne metody dozowania technikami wizyjnymi. Plan działań przedstawiono na rys. 5. Badania podzielono na 3 główne grupy - dozowanie cieczy, dozowanie granulatów oraz dodatkowe możliwości oferowane przez system wizyjny. Dobre przypadki znacząco się różnią między sobą w celu ujawnienia potencjalnych słabości systemu.



Rys. 5 Plan przeprowadzenia eksperymentów

5.1. Eksperymenty z dozowaniem cieczy

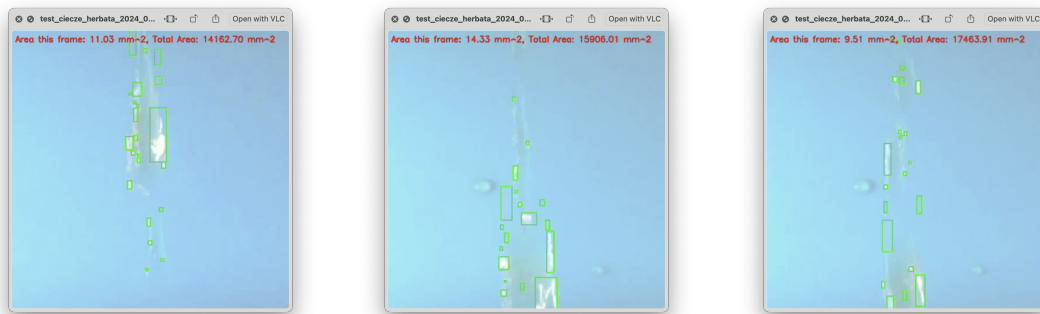
W tej grupie eksperymentów wszystkie dozowane cieczce są podawane za pomocą pomp perystaltycznych o znany, teoretycznie stałym przepływie cieczy. Jednak jak autor odkrył w trakcie prac, wartość ta nie jest stała. Różni się w zależności od gęstości i lepkości cieczy. Również jest mocno uzależniona od stopnia zapowietrzenia układu podczas początku dozowania. Dlatego też dla każdej z badanych cieczy przeprowadzono początkowo test aby określić faktyczny przepływ dla danej substancji. Jak opisano w rozdziale czwartym zastosowany algorytm detekcji posiada nieznaczący błąd, który wykorzystano do obliczenia poprawki - zarówno wartości stałej jak współczynnika kierunkowego prostej, które zostały wykorzystane podczas pomiarów w tym rozdziale. Jako metody referencyjne do obliczenia objętości i masy wykorzystano strzykawkę oraz wagę precyzyjną. Środowisko testowe podczas eksperymentów z dozowaniem cieczy przedstawiono na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Środowisko testowe podczas dozowania herbaty. Opracowanie własne.

5.1.1. Dozowanie herbaty

Pierwszym eksperimentem było zmierzenie ilości dozowanej herbaty. Dla każdej serii wykonano 10 pomiarów, dla kolejnych wydłużających się czasów załączenia pompki, od 5 sekund, inkrementując co 5 sekund, aż do 50 sekund. Dla każdej próby został zarejestrowany plik wideo, została zmierzona klasycznie, ręcznie objętość oraz masa. Analiza wideo celem określenia ilości dozowanej herbaty została dokonana po przeprowadzeniu wszystkich 5 serii pomiarowych. Wyniki pracy algorytmu detekcji w postaci przykładowych detekcji zaprezentowano na rys. 5.1.1a, 5.1.1b oraz 5.1.1c.



Rys. 5.1.1a Wykryte krople podczas dozowania herbaty. Opracowanie własne.

Rys. 5.1.1b Wykryte krople podczas dozowania herbaty. Opracowanie własne.

Rys. 5.1.1c Wykryte krople podczas dozowania herbaty. Opracowanie własne.

W tabeli 5.1.1a przedstawiono wyniki dozowania 250 ml herbaty, które przeprowadzono celem weryfikacji deklarowanego przepływu generowanego za pomocą pomp perystaltycznych. Ten test przeprowadzono w dwóch celach. Po pierwsze weryfikacja parametrów znamionowych zastosowanych urządzeń. Drugi określenie zmienności dozowania w kolejnych próbach, aby wykluczyć możliwość zmiany przepływu w trakcie dłuższej pracy.

LP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Czas nalewania [s]	129	136	133	134	132	132	133	133	133	132

Tab. 5.1.1a Pomiar czasu dozowania 250 ml herbaty

W tabeli 5.1.1b przedstawiono wyniki pomiaru masy oraz objętości dozowanej herbaty. Jak zauważono pomiar objętości za pomocą strzykawki wydaje się nie być zbyt dokładnym, przez samą jego specyfikę. Odciąganie wody i przelewanie między naczyniami, w połączeniu z podziałką na strzykawce co jeden mililitr dawały niezadowalające wyniki. Dlatego też postanowiono dokładniej określić gęstość herbaty i później obliczyć jej objętość na podstawie samej masy zmierzonej za pomocą wagi precyzyjnej.

LP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa [g]	76,56	85,61	82,00	91,22	80,88	85,55	80,43	90,00	81,00	90,23
Objętość [ml]	76,00	85	81	95	82	87	83	92	84	91

Tab. 5.1.1b Pomiar masy oraz objętości herbaty

W tabeli 5.1.1c zaprezentowano wyniki pięciu serii pomiarowych dozowania herbaty. Zapisano masę zmierzona za pomocą wagi precyzyjne, objętość zmierzona za pomocą strzykawki oraz jako wynik pracy programu obliczoną powierzchnię

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

w milimetrach kwadratowych i wartość przeliczoną, na podstawie wykonanych w rozdziale czwartym testów, objętość określona wizyjnie.

LP	Dozowana ciecz	Teoretycznie	Klasyczne / referencyjne		Wizyjne	
		Czas załączenia dozowania [s]	Masa [g]	Objętość [ml]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona objętość z wizji [ml]
1	Herbata Seria 1	5,00	4,14	4,00	1345,98	3,28
2		10,00	16,78	17,00	4517,41	8,60
3		15,00	25,00	24,50	6453,21	11,85
4		20,00	33,86	33,00	8908,73	15,97
5		25,00	42,67	41,50	12925,08	22,71
6		30,00	49,65	49,00	15748,10	27,44
7		35,00	55,38	54,00	17869,80	31,00
8		40,00	68,39	67,00	23950,20	41,21
9		45,00	76,56	76,00	26040,73	44,71
10		50,00	85,61	85,00	19542,31	33,81
11	Herbata Seria 2	5,00	8,78	9,00	5949,04	11,00
12		10,00	18,00	18,00	11845,99	20,90
13		15,00	27,66	28,00	16429,02	28,59
14		20,00	36,67	37,00	22444,18	38,68
15		25,00	45,47	46,00	28381,65	48,64
16		30,00	55,00	55,00	32540,57	55,62
17		35,00	64,10	65,00	39362,39	67,07
18		40,00	73,00	75,00	43839,29	74,58
19		45,00	82,00	81,00	49898,00	84,75

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

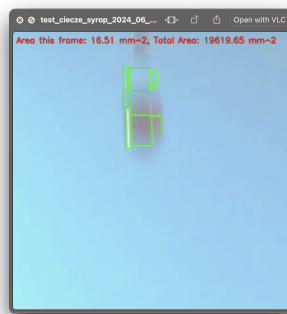
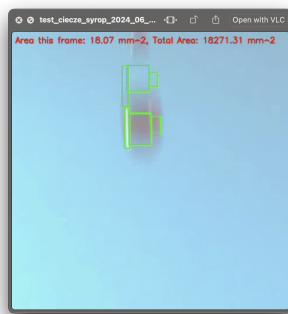
LP	Dozowana ciecz	Teoretycznie	Klasyczne / referencyjne		Wizyjne	
		Czas załączenia dozowania [s]	Masa [g]	Objętość [ml]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona objętość z wizji [ml]
20	Herbata Seria 3	50,00	91,22	95,00	56155,44	95,25
21		5,00	9,35	9,00	5771,58	10,70
22		10,00	18,58	18,00	11983,30	21,13
23		15,00	27,54	27,00	17135,10	29,77
24		20,00	36,22	36,50	22144,40	38,18
25		25,00	45,32	45,00	25720,58	44,18
26		30,00	54,15	55,00	30804,84	52,71
27		35,00	62,74	62,00	34389,13	58,72
28		40,00	71,73	72,00	41020,99	69,85
29		45,00	80,88	82,00	47192,80	80,21
30		50,00	85,55	87,00	49385,89	83,89
31	Herbata Seria 4	5,00	9,15	9,00	5828,94	10,80
32		10,00	18,12	18,00	11047,80	19,56
33		15,00	27,17	27,00	15273,16	26,65
34		20,00	35,86	36,00	21775,75	37,56
35		25,00	44,81	45,00	25386,85	43,62
36		30,00	53,72	55,00	30703,70	52,54
37		35,00	62,41	62,00	35690,02	60,91
38		40,00	71,00	72,50	41108,80	70,00
39		45,00	80,43	83,00	45007,74	76,54
40		50,00	90,00	92,00	51567,04	87,55

LP	Dozowana ciecz	Teoretycznie	Klasyczne / referencyjne		Wizyjne	
		Czas załączenia dozowania [s]	Masa [g]	Objętość [ml]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona objętość z wizji [ml]
41	Herbata Seria 5	5,00	9,00	9,00	6004,40	11,09
42		10,00	17,78	17,50	10705,35	18,98
43		15,00	27,42	27,00	17232,45	29,93
44		20,00	36,37	36,00	21883,66	37,74
45		25,00	45,40	45,00	25653,93	44,07
46		30,00	54,36	55,00	33558,05	57,33
47		35,00	63,19	64,00	34467,75	58,85
48		40,00	72,20	81,00	38844,88	66,20
49		45,00	81,00	84,00	44373,47	75,48
50		50,00	90,23	91,00	50893,06	86,42

Tab. 5.1.1c Wyniki dozowanie herbaty - pomiar 5 serii dozowań

5.1.2. Dozowanie syropu

Dozowanie syropu owocowego zrealizowano analogicznie do dozowania herbaty. Wykonano 5 serii po 10 prób. Przykłady detekcji zaprezentowano na rys. 5.1.2a, 5.1.2b oraz 5.1.2c.



Rys. 5.1.2a Wykryte krople podczas dozowania syropu. Rys. 5.1.2b Wykryte krople podczas dozowania syropu. Rys. 5.1.2c Wykryte krople podczas dozowania syropu.

Opracowanie własne.

Opracowanie własne.

Opracowanie własne.

W tabeli 5.1.2a przedstawiono wyniki dozowania 250 ml syropu, które analogicznie do herbaty, przeprowadzono celem weryfikacji deklarowanego przepływu generowanego za pomocą pomp perystaltycznych.

LP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Czas nalewania [s]	189	193	192	193	180	178	193	190	179	187

Tab. 5.1.2a Pomiar czasu dozowania 250 ml syropu

W tabeli 5.1.2b przedstawiono wyniki pomiaru masy oraz objętości dozowanej syropu. Podobnie jak w przypadku herbaty - celem określenia gęstości i obliczenia dokładnej objętości na podstawie zmierzonyj masy.

LP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa [g]	86,83	90,00	70,14	76,35	70,00	76,83	69,74	66,53	70,51	77,57
Objętość [ml]	66,00	68,00	53,00	58,00	53,00	59,00	53,00	52,00	53,00	59,00

Tab. 5.1.2b Pomiar masy oraz objętości syropu

W tabeli 5.1.2c zaprezentowano wyniki pięciu serii pomiarowych dozowania syropu. Zapisano masę zmierzona za pomocą wagi precyzyjne, objętość zmierzona za pomocą strzykawki oraz jako wynik pracy programu obliczoną powierzchnię w milimetrach kwadratowych i wartość przeliczoną, na podstawie wykonanych w rozdziale czwartym testów, objętość określona wizyjnie.

LP	Dozowana ciecz	Czas załączenia dozowania [s]	Teoretycznie / Klasyczne / referencyjne		Wizyjne	
			Masa [g]	Objętość [ml]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona objętość z wizji [ml]
1	Syrop Seria 1	10,00	18,46	13,00	22478,83	11,70
2		15,00	27,75	20,00	33564,51	16,96
3		20,00	36,74	27,00	44971,13	22,38
4		25,00	45,17	33,50	55206,56	27,24
5		30,00	55,20	40,50	66249,29	32,49

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

LP	Dozowana ciecz	Teoretycznie	Klasyczne / referencyjne		Wizyjne	
		Czas załączenia dozowania [s]	Masa [g]	Objętość [ml]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona objętość z wizji [ml]
6	Syrop Seria 2	35,00	64,21	48,00	78860,87	38,48
7		40,00	73,50	54,00	80582,48	39,29
8		45,00	86,83	66,00	106635,44	51,67
9		50,00	90,00	68,00	127099,24	61,39
10		5,00	6,28	3,50	7333,07	4,50
11		10,00	9,84	6,00	15373,59	8,32
12		15,00	17,00	11,00	25224,45	13,00
13		20,00	23,46	17,00	34991,35	17,64
14		25,00	31,44	22,00	44509,08	22,16
15		30,00	40,76	29,00	56729,65	27,96
16	Syrop Seria 3	35,00	52,00	37,50	67941,24	33,29
17		40,00	61,83	47,00	77057,66	37,62
18		45,00	70,14	53,00	86470,85	42,09
19		50,00	76,35	58,00	93259,72	45,32
20		5,00	8,87	5,00	10313,72	5,92
21		10,00	16,59	10,00	19270,91	10,17
22		15,00	24,55	17,00	29986,03	15,26
23		20,00	32,39	23,00	36562,50	18,38
24		25,00	40,21	29,00	48672,46	24,14
25		30,00	47,79	35,00	55749,69	27,50
26		35,00	55,29	40,00	71749,41	35,10

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

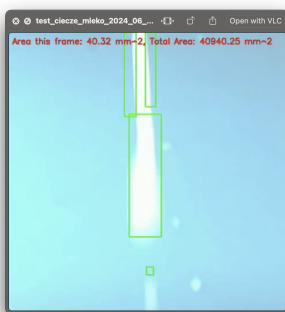
LP	Dozowana ciecz	Teoretycznie	Klasyczne / referencyjne		Wizyjne	
		Czas załączenia dozowania [s]	Masa [g]	Objętość [ml]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona objętość z wizji [ml]
27	Syrop Seria 4	40,00	62,80	46,50	82111,76	40,02
28		45,00	70,00	53,00	85766,26	41,76
29		50,00	76,83	59,00	100331,48	48,68
30		5,00	9,21	5,50	11273,29	6,37
31		10,00	16,69	11,00	20833,13	10,91
32		15,00	24,83	17,00	27999,63	14,32
33		20,00	32,53	23,00	37967,36	19,05
34		25,00	40,60	29,00	46583,35	23,14
35		30,00	47,16	34,00	56787,37	27,99
36		35,00	55,14	40,00	67631,72	33,14
37	Syrop Seria 5	40,00	62,00	46,00	78947,18	38,52
38		45,00	69,74	53,00	87566,26	42,61
39		50,00	66,53	52,00	92357,39	44,89
40		5,00	9,49	5,50	11573,98	6,52
41		10,00	17,13	11,00	21216,31	11,10
42		15,00	24,74	17,00	31838,93	16,14
43		20,00	32,59	23,50	43909,70	21,87
44		25,00	39,73	28,50	51457,92	25,46
45		30,00	47,86	35,00	60835,31	29,91
46		35,00	55,12	40,00	72325,55	35,37
47		40,00	62,77	47,00	81932,13	39,94

LP	Dozowana ciecz	Teoretycznie	Klasyczne / referencyjne		Wizyjne	
		Czas załączenia dozowania [s]	Masa [g]	Objętość [ml]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona objętość z wizji [ml]
48		45,00	70,51	53,00	92164,83	44,80
		50,00	77,57	59,00	113432,96	54,90

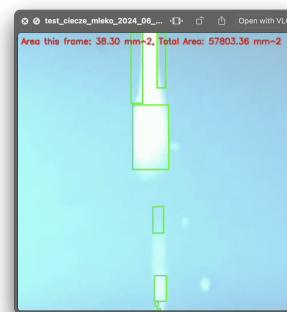
Tab. 5.1.2c Wyniki dozowanie syropu - pomiar 5 serii dozowań

5.1.3. Dozowanie mleka

Analogicznie zrealizowano dozowanie mleka. Wykonano 5 serii po 10 prób. Przykłady detekcji zaprezentowano na rys. 5.1.3a, 5.1.3b oraz 5.1.3c. Wyniki zapisano w tabelach 5.1.3a, 5.1.3b oraz 5.1.3c analogicznie jak w poprzedzających eksperymentach.



Rys. 5.1.3a Wykryte krople podczas dozowania mleka.
Opracowanie własne.



Rys. 5.1.3b Wykryte krople podczas dozowania mleka.
Opracowanie własne.

Rys. 5.1.3c Wykryte krople podczas dozowania mleka.
Opracowanie własne.

W tabeli 5.1.3a przedstawiono wyniki dozowania 250 ml mleka, które analogicznie do poprzednich eksperymentów, przeprowadzono celem weryfikacji deklarowanego przepływu generowanego za pomocą pomp perystaltycznych.

LP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Czas nalewania [s]	138	133	133	132	128	129	129	128	122	129

Tab. 5.1.3a Pomiar czasu dozowania 250 ml mleka

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

W tabeli 5.1.3b przedstawiono wyniki pomiaru masy oraz objętości dozowanego mleka. Podobnie jak wcześniej - celem określenia gęstości i obliczenia dokładnej objętości na podstawie zmierzonej masy.

LP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa [g]	77,75	76,64	77,00	85,32	77,00	85,29	77,33	85,77	78,16	86,80
Objętość [ml]	74,00	83,00	75,00	83,00	75,00	82,00	73,00	83,00	74,00	84,00
Obliczona gęstość [g/ml]	1,05	0,92	1,03	1,03	1,03	1,04	1,06	1,03	1,06	1,03

Tab. 5.1.3b Pomiar gęstości dla mleka

W tabeli 5.1.3c zaprezentowano wyniki pięciu serii pomiarowych dozowania mleka. Zapisano masę, objętość oraz jako wynik pracy programu obliczoną powierzchnię w milimetrach kwadratowych i przeliczoną objętość w mililitrach.

LP	Dozowana ciecz	Teoretycznie	Klasyczne / referencyjne		Wizyjne	
		Czas załączenia dozowania [s]	Masa [g]	Objętość [ml]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona objętość z wizji [ml]
1	Mleko Seria 1	5,00	6,00	6,00	17278,74	7,83
2		10,00	17,27	16,00	33810,51	14,34
3		15,00	26,00	25,00	51590,35	21,34
4		20,00	34,25	32,50	68288,38	27,92
5		25,00	43,58	42,00	87601,57	35,53
6		30,00	46,80	44,00	95557,96	38,67
7		35,00	54,40	56,00	125658,27	50,53
8		40,00	69,16	66,00	143249,85	57,46
9		45,00	77,75	74,00	163676,82	65,51
10		50,00	76,64	83,00	208183,28	83,04
11		5,00	8,84	8,00	26238,31	11,36
12		10,00	17,26	17,00	49063,17	20,35

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

LP	Dozowana ciecz	Teoretycznie	Klasyczne / referencyjne		Wizyjne	
		Czas załączenia dozowania [s]	Masa [g]	Objętość [ml]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona objętość z wizji [ml]
13	Mleko Seria 2	15,00	25,81	24,50	70232,41	28,69
14		20,00	34,50	33,00	92225,10	37,35
15		25,00	42,89	44,00	112210,40	45,23
16		30,00	51,57	50,00	136965,92	54,98
17		35,00	59,82	55,00	166237,85	66,52
18		40,00	68,41	64,00	182560,45	72,95
19		45,00	77,00	75,00	193328,53	77,19
20		50,00	85,32	83,00	215033,93	85,74
21	Mleko Seria 3	5,00	4,12	4,00	11912,88	5,71
22		10,00	17,41	16,50	42908,57	17,92
23		15,00	26,00	25,00	66682,80	27,29
24		20,00	34,13	33,00	89490,51	36,28
25		25,00	43,00	41,00	111502,22	44,95
26		30,00	51,32	49,00	131958,35	53,01
27		35,00	59,68	55,00	156120,45	62,53
28		40,00	63,32	62,00	153703,36	61,58
29		45,00	77,00	75,00	187760,62	75,00
30		50,00	85,29	82,00	208519,32	83,17
31		5,00	8,57	8,00	24182,42	10,55
32		10,00	17,52	17,00	45453,66	18,93
33		15,00	26,17	24,00	66973,47	27,41

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

LP	Dozowana ciecz	Teoretycznie	Klasyczne / referencyjne		Wizyjne	
		Czas załączenia dozowania [s]	Masa [g]	Objętość [ml]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona objętość z wizji [ml]
34	Mleko Seria 4	20,00	34,50	33,00	84185,99	34,19
35		25,00	38,00	37,00	93941,88	38,03
36		30,00	51,48	50,00	125228,61	50,36
37		35,00	60,00	56,50	143776,56	57,67
38		40,00	68,42	63,00	167277,88	66,93
39		45,00	77,33	73,00	163364,50	65,38
40		50,00	85,77	83,00	216700,82	86,40
41	Mleko Seria 5	5,00	8,69	8,00	24618,58	10,72
42		10,00	17,47	17,00	41959,84	17,55
43		15,00	26,30	25,00	65966,55	27,01
44		20,00	35,00	33,00	85938,48	34,88
45		25,00	38,64	37,50	90976,22	36,86
46		30,00	52,22	51,00	134165,01	53,88
47		35,00	61,00	56,50	150302,91	60,24
48		40,00	69,42	65,00	163016,75	65,25
49		45,00	78,16	74,00	188261,73	75,19
50		50,00	86,80	84,00	212631,73	84,79

Tab. 5.1.3c Wyniki dozowanie syropu - pomiar 5 serii dozowań

5.2 Eksperymenty z dozowaniem granulatów

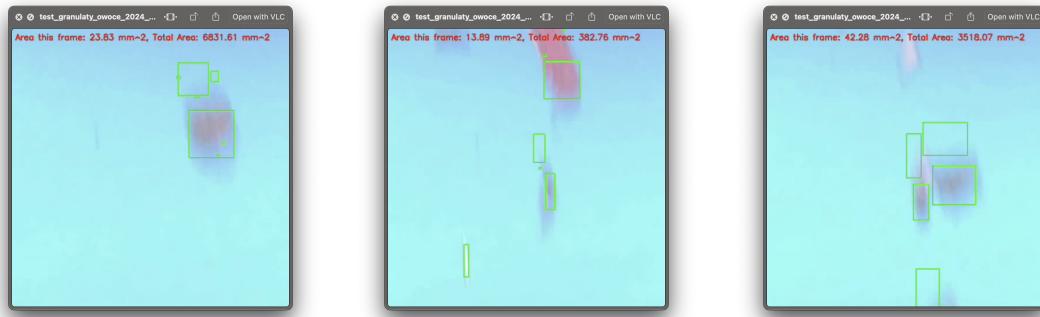
W przypadku granulatów oczekiwany był znaczny rozrzut wyników przy takim samym czasie dozowania. Nieregularne kształty produktu, losowość przemieszania się go w dozowniku powodują, że podajniki śrubowe dozują produkt dosyć nieregularnie i nie możliwe jest poleganie tylko na czasie dozowania, chcąc podać konkretną wartość. Na rys. 5.2 przedstawiono środowisko testowe podczas badania dozowania granulatów.



Rys. 5.2. Stanowisko pomiarowe w trakcie pomiaru dozowania granulatu

5.2.1. Dozowanie suszonych owoców

Kolejnym eksperymentem było dozowanie suszonych owoców za pomocą podajników śrubowych. Podobnie jak wcześniej granulki przelatywały przed obiektywem kamery. Obraz z kamery był rejestrowany za pomocą kamery i na rysunkach 5.2.1a, 5.2.1b oraz 5.2.1c przedstawiono przykładowe detekcje.



Rys. 5.2.1a Wykryte krople podczas dozowania suszonych owoców.
Opracowanie własne.

Rys. 5.2.1b Wykryte krople podczas dozowania suszonych owoców.
Opracowanie własne.

Rys. 5.2.1c Wykryte krople podczas dozowania suszonych owoców.
Opracowanie własne.

W tabeli 5.2.1a przedstawiono wyniki pomiaru dozowania granulatu przez 50 sekund. Podobnie jak przy dozowaniu cieczy ten test przeprowadzono aby sprawdzić stałość dozowania w kolejnych próbach. Jak można zauważyć dozowniki śrubowe są znacznie mniej powtarzalne od pomp perystaltycznych. Jest to związane losowością przemieszczania się granulatu wewnątrz dozownika.

LP	1	2	3	4	5
Masa [g]	15,34	10,00	15,58	17,62	18,00

Tab. 5.2.1a Pomiar dozowania granulatu przez 50 sekund

W tabeli 5.2.1b przedstawiono wyniki wszystkich przeprowadzonych prób dozowania suszonych owoców. Zapisano ich masę oraz wyniki pracy programu - obliczoną powierzchnię oraz aproksymowaną masę.

LP	Dozowane składniki	Czas załączenia dozowania [s]	Wizyjne		
			Masa [g]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona masa z wizji [g]
1	Suszone owoce mix Seria 1	10,00	2,35	1597,80	2,43
2		20,00	10,83	6463,71	9,81
3		30,0	12,12	8620,54	13,09
4		40,0	14,42	7664,76	11,63

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

LP	Dozowane składniki	Czas załączenia dozowania [s]	Klasyczne / referencyjne	Wizyjne	
			Masa [g]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona masa z wizji [g]
5	Suszone owoce mix Seria 2	50	15,34	10572,53	16,05
6		10,00	0,66	601,90	0,91
7		20,00	8,52	6265,41	9,51
8		30,0	4,00	2915,34	4,43
9		40,0	8,00	5531,84	8,40
10		50	10,00	7243,98	11,00
11	Suszone owoce mix Seria 3	10,00	4,00	3299,58	5,01
12		20,00	6,11	4829,10	7,33
13		30,0	10,00	7010,20	10,64
14		40,0	13,64	9237,60	14,02
15		50	15,58	9158,91	13,90
16	Suszone owoce mix Seria 4	10,00	2,00	1305,67	1,98
17		20,00	5,20	3406,57	5,17
18		30,0	11,00	6864,73	10,42
19		40,0	12,57	7777,21	11,80
20		50	17,62	10774,53	16,35
21	Suszone owoce mix Seria 5	10,00	3,00	1953,41	2,97
22		20,00	8,13	4679,86	7,10
23		30,0	8,40	4573,66	6,94
24		40,0	14,00	8608,66	13,07
25		50	18,00	10098,49	15,33

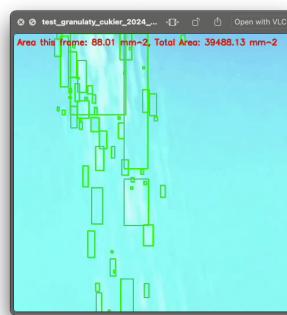
Rys. 5.2.1b Wyniki dozowania suszonych owoców

5.2.2. Dozowanie cukru

Dozowania cukru, podobnie do próby poprzedniej, zostało zrealizowane przez podajnik śrubowy. Podobnie jak wcześniej ziarenka przelatywały przed obiektywem. Obraz z kamery był rejestrowany za pomocą kamery i na rysunkach 5.2.2a, 5.2.2b oraz 5.2.2c przedstawiono przykładowe detekcje.



Rys. 5.2.2a Wykryte kryształki cukru podczas dozowania. Opracowanie własne.



Rys. 5.2.2b Wykryte kryształki cukru podczas dozowania. Opracowanie własne.



Rys. 5.2.2c Wykryte kryształki cukru podczas dozowania. Opracowanie własne.

W tabeli 5.2.2a przedstawiono wyniki pomiaru dozowania cukru przez 50 sekund. Podobnie jak dla suszonych owoców wyniki cechują się dużym rozrzutem.

LP	1	2	3	4	5
Masa [g]	62,70	72,41	56,45	54,00	52,32

Tab. 5.2.2a Pomiar ilości dozowanego cukru przez 50 sekund

W tabeli 5.2.2b przedstawiono wyniki wszystkich przeprowadzonych prób dozowania cukru. Zapisano ich masę oraz wyniki pracy programu - obliczoną powierzchnię oraz aproksymowaną masę.

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

LP	Dozowane składniki	Teoretycznie	Klasyczne / referencyjne	Wizyjne	
		Czas załączenia dozowania [s]	Masa [g]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona masa z wizji [ml]
1	Cukier Seria 1	10,00	12,33	42884,05	13,87
2		20,00	24,44	72554,77	23,46
3		30,0	40,00	109077,13	35,27
4		40,0	35,61	103448,32	33,45
5		50	62,70	151226,11	48,90
6	Cukier Seria 2	10,00	13,87	33927,80	10,97
7		20,00	30,00	80033,17	25,88
8		30,0	42,00	111918,50	36,19
9		40,0	56,63	148919,21	48,15
10		50	72,41	195820,72	63,32
11	Cukier Seria 3	10,00	11,00	35164,52	11,37
12		20,00	26,48	86627,59	28,01
13		30,0	40,17	122368,18	39,57
14		40,0	51,59	162313,75	52,48
15		50	56,45	175442,07	56,73
16	Cukier Seria 4	10,00	16,00	51496,99	16,65
17		20,00	23,53	80401,15	26,00
18		30,0	32,63	114604,25	37,06
19		40,0	59,63	188270,24	60,88
20		50	54,00	175820,21	56,85
21		10,00	12,38	50858,33	16,45

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

LP	Dozowane składniki	Teoretycznie	Klasyczne / referencyjne	Wizyjne	
		Czas załączenia dozowania [s]	Masa [g]	Obliczona powierzchnia [mm ²]	Przeliczona masa z wizji [ml]
22	Cukier Seria 5	20,00	25,81	91933,91	29,73
23		30,0	23,58	89098,47	28,81
24		40,0	48,40	162897,23	52,67
25		50	52,32	173791,95	56,20

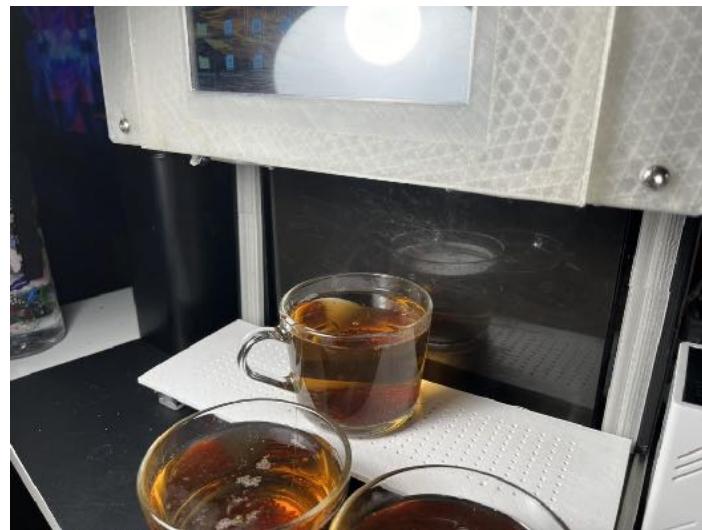
Rys. 5.2.2b Wyniki dozowania cukru

5.3. Dodatkowe możliwości systemu wizyjnego

Klasyczne systemy pomiarowe zwykle są ograniczone pod względem ilości parametrów fizycznych jakie mogą mierzyć. Wagę zmierzamy tylko masę, a turbinką tylko przepływ. System wizyjny natomiast oferuje elastyczność tego co będziemy wykrywać - wszystko zależy od oprogramowania które uruchomimy na urządzeniu. W tym rozdziale zaprezentowano kilka dodatkowych funkcjonalności, które może zaoferować taki system, już obecny w urządzeniu.

5.3.1 Weryfikacja barwy herbaty

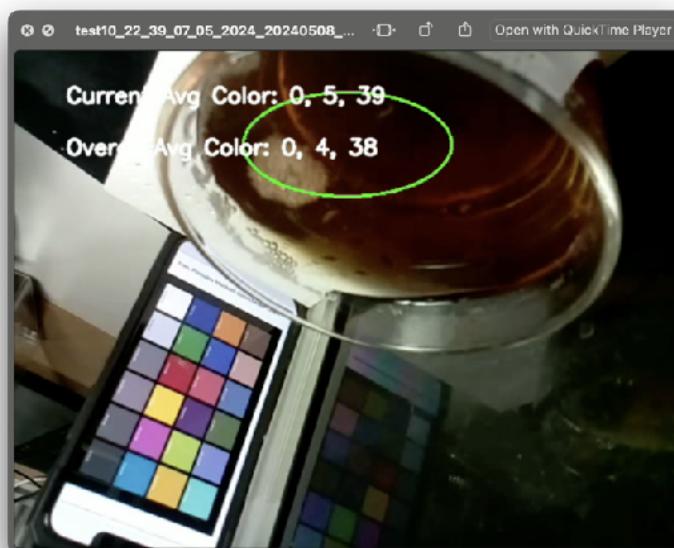
W tym eksperymencie celem było zweryfikowanie czy zaparzacz do herbaty przygotował napój z odpowiedniej intensywności. Aby umożliwić pełną powtarzalność wyniku, zamiast przygotowywać napój z ekspresu, zaparzono testowe herbaty z kolejno zwiększałymi ilościami herbaty granulowanej - od 1 gramu do 5 gram. Na rysunku 5.2.10.1 pokazano środowisko testowe. Dla każdej ilości wykonano 3 próby - jak pokazano na rysunku 5.2.10.2 - trzy szklanki z odmierzoną identyczną ilością granulatu, które później zalano identyczną ilością wrzątka. Na rysunku 5.2.10.3 przedstawiono przykładowy obraz z kamery w trakcie eksperimentu. Zaproponowany algorytm uśrednia wartości barwy zaprezentowanej w skali kolorów RGB (*ang. red, green, blue*), w obszarze obrysowanym elipsą. Na tym etapie pominięto wykrywanie szklanki i poszukiwanie gdzie znajduje się herbata - ważniejsze było określenie czy technika wizyjna może zaoferować skutecną weryfikację intensywności herbaty. Wyniki zapisano w tabeli 5.2.10.



Rys. 5.2.10.1 Stanowisko pomiarowe w trakcie badania barwy herbaty



Rys. 5.2.10.2 Szklenki z przygotowaną identyczną ilością herbaty granulowanej



Rys. 5.2.10.3 Widok z kamery w trakcie trwania eksperymentu

LP	Waga [g]	R	G	B
1	1	0	9	49
2	1	0	11	52
3	1	0	10	71
4	2	0	4	37
5	2	1	4	37

LP	Waga [g]	R	G	B
6	2	22	38	74
7	3	0	1	24
8	3	0	0	23
9	3	0	5	38
10	4	12	24	62
11	4	0	0	21
12	4	0	0	24
13	5	0	0	15
14	5	0	0	15
15	5	0	0	16

Tab. 5.2.10 Wyniki pomiaru intensywności herbaty

5.3.2. Detekcja obecności kubka

Jedną z przydatnych opcji jaką może zaoferować system wizyjny w kontekście ekspresu do herbaty jest detekcja obecności kubka. Maszyna przed rozpoczęciem pracy powinna mieć możliwość sprawdzenia, czy naczynie jest obecne w miejscu przygotowania napoju. Brak kubka może skutkować nalaniem wrzącej herbaty na ociekacz, a rozbryzgające krople mogą kogoś poparzyć. W kodzie 5.3.2. przedstawiono fragmenty przykładowej implementacji wykorzystującej gotową sieć neuronową YOLO V4. Jak przedstawiono na rysunku 5.3.2a sieć poprawnie wykrywa kubek oraz wskazuje jego pozycje na ekranie. Po dodaniu warunku określającego gdzie kubek powinien stać aby zaklasyfikować go że stoi poprawnie, problem pokazano na rys 5.3.2b - sieć będzie mogła przekazać tą informację do oprogramowania zajmującego się już przygotowywaniem herbaty. Niestety konstrukcja maszyny, jak ukazano na rysunku 5.3.2c ma duże znaczenie, ponieważ sieć może zareagować na lustrzane odbicie kubka w połyskującej części ekspresu.

[...]

```
# Wczytanie wag i konfiguracji modelu YOLO
net = cv2.dnn.readNet('yolov4-tiny.weights', 'yolov4-tiny.cfg')

# Ustawienie nazw klas
classes = []
with open("coco.names", "r") as f:
    classes = [line.strip() for line in f.readlines()]
```

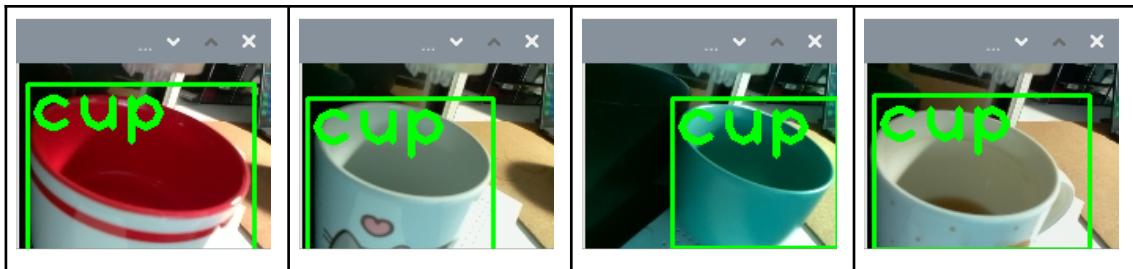
```
# Ustawienie parametrów modelu
layer_names = net.getLayerNames()
output_layers = [layer_names[i - 1] for i in net.getUnconnectedOutLayers()]

[...]

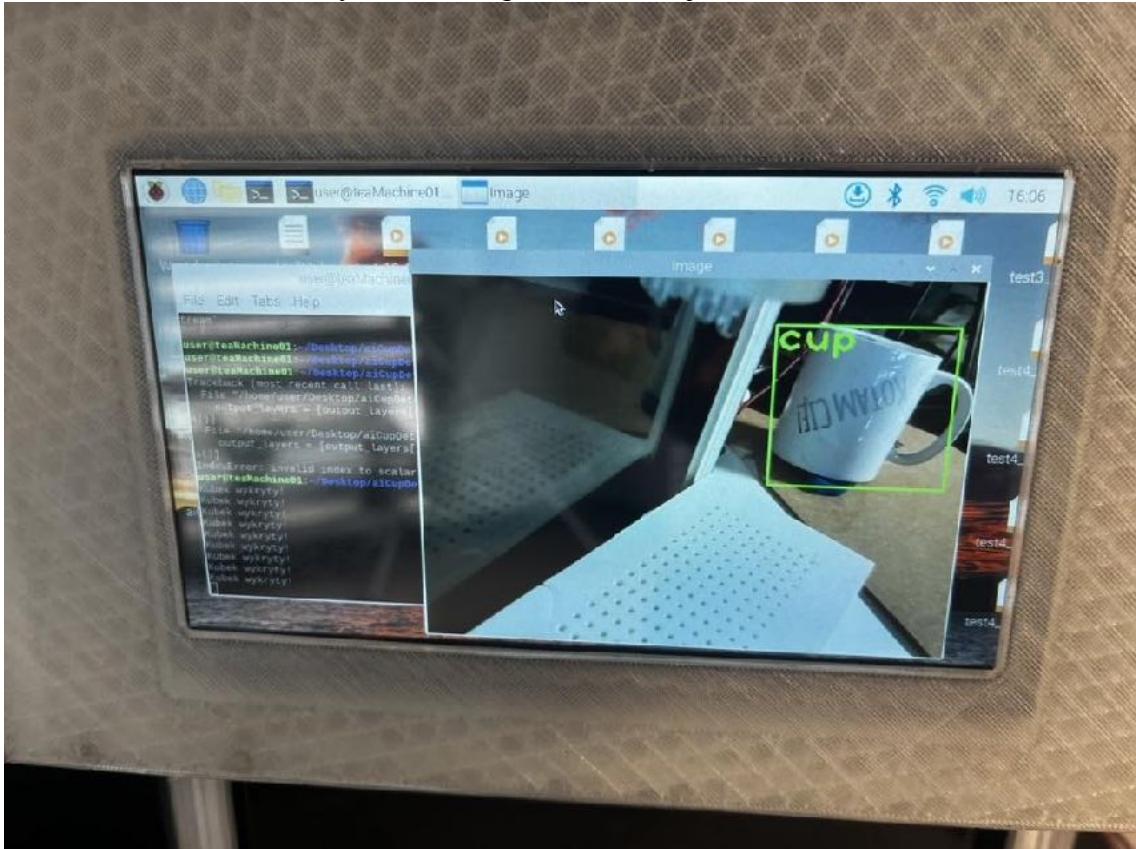
# Detekcja obiektów z użyciem zmniejszonego bloba
blob = cv2.dnn.blobFromImage(frame, 0.00392, (160, 120), (0, 0, 0), True, crop=False)
net.setInput(blob)
outs = net.forward(output_layers)

# Informacje o wykrytych obiektach
class_ids = []
confidences = []
boxes = []
for out in outs:
    for detection in out:
        scores = detection[5:]
        class_id = np.argmax(scores)
        confidence = scores[class_id]
        if confidence > 0.5:
            # Obiekt wykryty
            center_x = int(detection[0] * width)
            center_y = int(detection[1] * height)
            w = int(detection[2] * width)
            h = int(detection[3] * height)
            [...]
# Rysowanie prostokątów i wyświetlanie wyników
for i in range(len(boxes)):
    if i in indexes:
        x, y, w, h = boxes[i]
        label = str(classes[class_ids[i]])
        if label == 'cup':
            print("Kubek wykryty!")
            cv2.rectangle(frame, (x, y), (x + w, y + h), (0, 255, 0), 2)
            cv2.putText(frame, label, (x, y + 30), cv2.FONT_HERSHEY_PLAIN, 3, (0, 255, 0), 3)
[...]
```

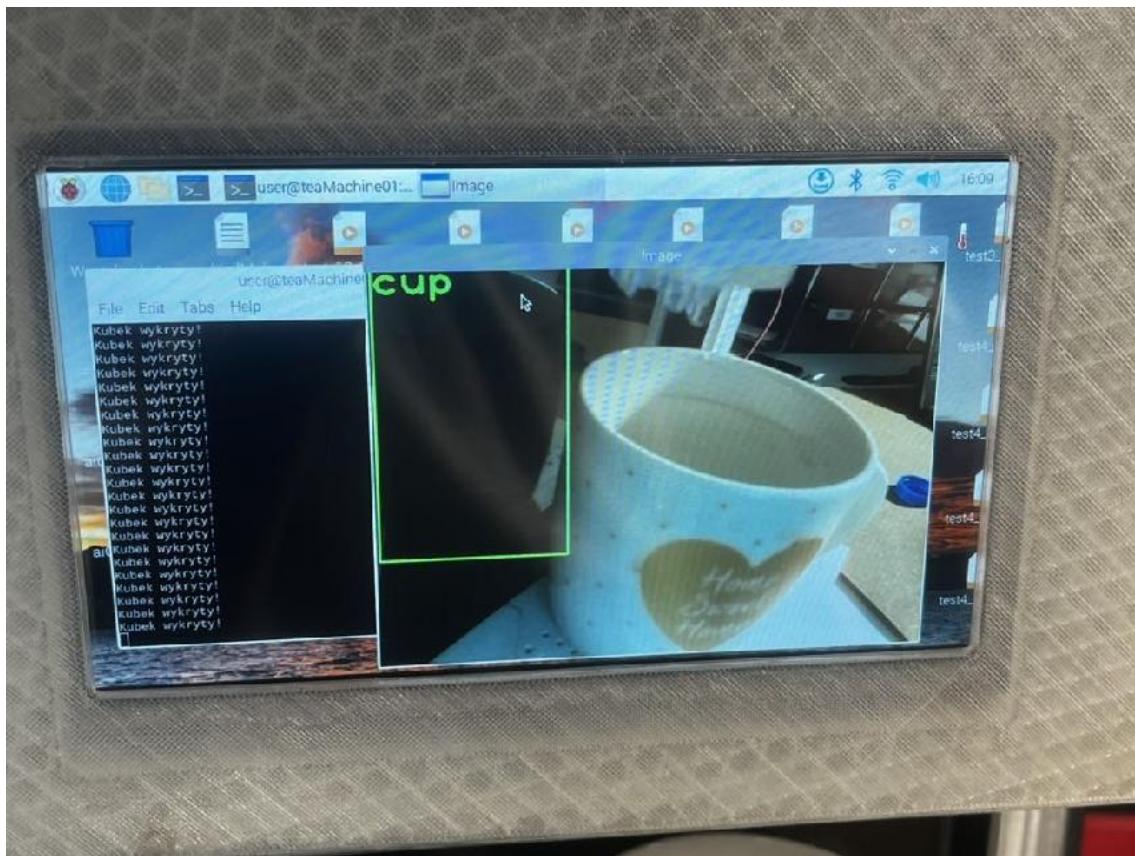
Kod 5.3.2.Fragmenty aplikacji do detekcji kubków w obrazie



Rys. 5.3.2a Poprawne detekcje kubków



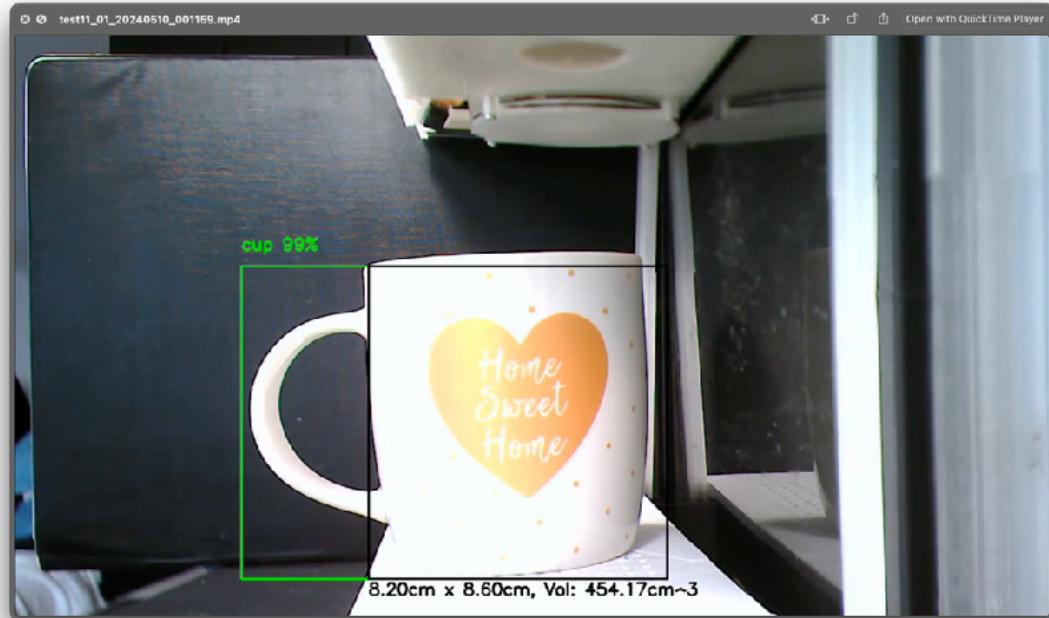
Rys. 5.3.2b Sieć neuronowa wykrywająca zbyt oddalony kubek



Rys. 5.3.2c Sieć neuronowa wykrywająca odbicie kubka

5.3.3. Oszacowanie pojemności kubka

Kolejną bardzo przydatną funkcjonalnością jest oszacowanie wielkości kubka. Jeżeli jest możliwość przygotowania napoju w różnej ilości należy wprowadzić właściwą wielkość kubka. Niestety oszacowanie tego przez użytkownika może być kłopotliwe. Zmierzenie tego klasycznie jest dosyć trudne - im większy kubek tym cięższy, ale może mieć ucho lub nie, albo w zależności od materiału z którego jest wykonany jego gęstość będzie różna, także wielkość nie zawsze będzie rosła wprost proporcjonalnie do masy. Dlatego też w tym eksperymencie próbowało się oszacować wielkość na podstawie obrazu z kamery. Na potrzeby uproszczenia testu poczyniono kilka uproszczeń. Kamerę przemieszczono, tak aby była skierowana prostopadle do kubka. Dodano jednolite tło za kubkiem - tak aby łatwiej było go odróżnić od tła. Założono że kubek stoi miejscu gdzie powinien być podczas przygotowania napoju - do obliczeń przyjęto stałe wartości przeliczeń pixeli na mm. Podobnie, jak przy detekcji kubka, użyto sieci YOLO V4 do znalezienia kubka w obrazie. Ze względu na to że kubek może być skierowany uchem w stronę kamery, lub prostopadle do niej - dodano jego detekcję - tak aby obrrys części, do której nalewa się napój był bardziej zbliżony do rzeczywistych rozmiarów. Na rysunku 5.3.3a oraz 5.3.3b przedstawiono przykładowe detekcje. W tabeli 5.3.2. przedstawiono wyniki pomiaru oraz detekcji wizyjnej.



Rys. 5.3.3a. Przykładowa detekcja kubka wraz z szacowaniem wielkości



Rys. 5.3.3b Przykładowa detekcja kubka wraz z szacowaniem wielkości

LP	Pojemność zmierzona [ml]	Pojemność oszacowana z wizji [ml]
1	358	397.75
2	286	427.94

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

3	540	452.27
4	266	387.24
5	284	329.18
6	248	279.57

Tab. 5.3.2. Wyniki szacowania wielkości kubków.

6. Analiza i interpretacja wyników badań własnych

6.1. Wyniki dozowania cieczy

6.1.1. Wyniki dozowania herbaty

- Weryfikacja stałości dozowania

Obliczony średni przepływ jako średnia arytmetyczna, dla danych przedstawionych w tabeli 6.1.1a wynosi 113 ml/min z odchyleniem standardowym 2 ml/min. Jest to wynikiem znaczco niższym od deklarowanego przez producenta 150ml/min, ale wynikiem dosyć powtarzalnym, oceniąc jego odchylenie standardowe.

LP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Czas nalewania [s]	129	136	133	134	132	132	133	133	133	132
Obliczony przepływ [ml/min]	116	110	113	112	114	114	113	113	113	114

Tab. 6.1.1a Obliczony przepływ dla każdej próby

- Określenie gęstości cieczy

Obliczenie gęstości dozowanej cieczy pozwala wykorzystać pomiar masy do określania dokładnej objętości. W tabeli 6.1.1b obliczono gęstość dla 10 zmierzonych przypadków. Średnia gęstość dla herbaty wynosi 0,99 g/ml z odchyleniem standardowym 0,02 g/ml.

LP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa [g]	76,56	85,61	82,00	91,22	80,88	85,55	80,43	90,00	81,00	90,23
Objętość [ml]	76,00	85	81	95	82	87	83	92	84	91
Obliczona gęstość [g/ml]	1,01	1,01	1,01	0,96	0,99	0,98	0,97	0,98	0,96	0,99

Tab. 6.1.1b Obliczona gęstość herbaty

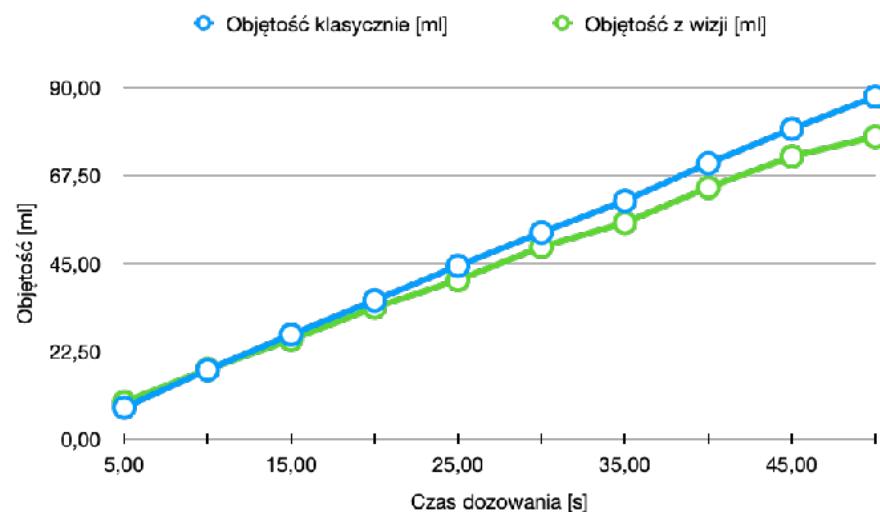
- Analiza wyników z 5 serii pomiarowych dozowania

Na rys. 6.1.1a przedstawiono uśrednione wyniki dozowania dla kolejno zwiększonego czasu - dla klasycznej metody pomiaru oraz oszacowanej wizyjnie. Dane do stworzenia wykresu pochodzą z tabeli 6.1.1c, stworzonej na podstawie pomiarów w tabeli 5.1.1c. Objętość klasycznie obliczono ze zmierzonej masy substancji oraz wyznaczonej gęstości. Jak można zauważyć na wykresie wyniki są bardzo silnie

skorelowane ze sobą. Najważniejszą informacją na tym wykresie jest jedynie liniowość samego dozowania, co można odczytać z klasycznej metody.

LP	Czas dozowania [s]	Objętość z wizji seria 1 [ml]	Objętość klasycznie seria 1 [ml]	Objętość z wizji seria 2 [ml]	Objętość klasycznie seria 2 [ml]	Objętość z wizji seria 3 [ml]	Objętość klasycznie seria 3 [ml]	Objętość z wizji seria 4 [ml]	Objętość klasycznie seria 4 [ml]	Objętość z wizji seria 5 [ml]	Objętość klasycznie seria 5 [ml]	Średnia objętość (klasycznie) [ml]	Średnia objętość wizyjna [ml]
1	5,00	3,28	4,10	11,00	8,69	10,70	9,26	10,80	9,06	11,09	8,91	8,00	9,37
2	10,00	8,60	16,61	20,90	17,82	21,13	18,39	19,56	17,94	18,98	17,60	17,67	17,83
3	15,00	11,85	24,75	28,59	27,38	29,77	27,26	26,65	26,90	29,93	27,15	26,69	25,36
4	20,00	15,97	33,52	38,68	36,30	38,18	35,86	37,56	35,50	37,74	36,01	35,44	33,62
5	25,00	22,71	42,24	48,64	45,02	44,18	44,87	43,62	44,36	44,07	44,95	44,29	40,64
6	30,00	27,44	49,15	55,62	54,45	52,71	53,61	52,54	53,18	57,33	53,82	52,84	49,13
7	35,00	31,00	54,83	67,07	63,46	58,72	62,11	60,91	61,79	58,85	62,56	60,95	55,31
8	40,00	41,21	67,71	74,58	72,27	69,85	71,01	70,00	70,29	66,20	71,48	70,55	64,37
9	45,00	44,71	75,79	84,75	81,18	80,21	80,07	76,54	79,63	75,48	80,19	79,37	72,34
10	50,00	33,81	84,75	95,25	90,31	83,89	84,69	87,55	89,10	86,42	89,33	87,64	77,38

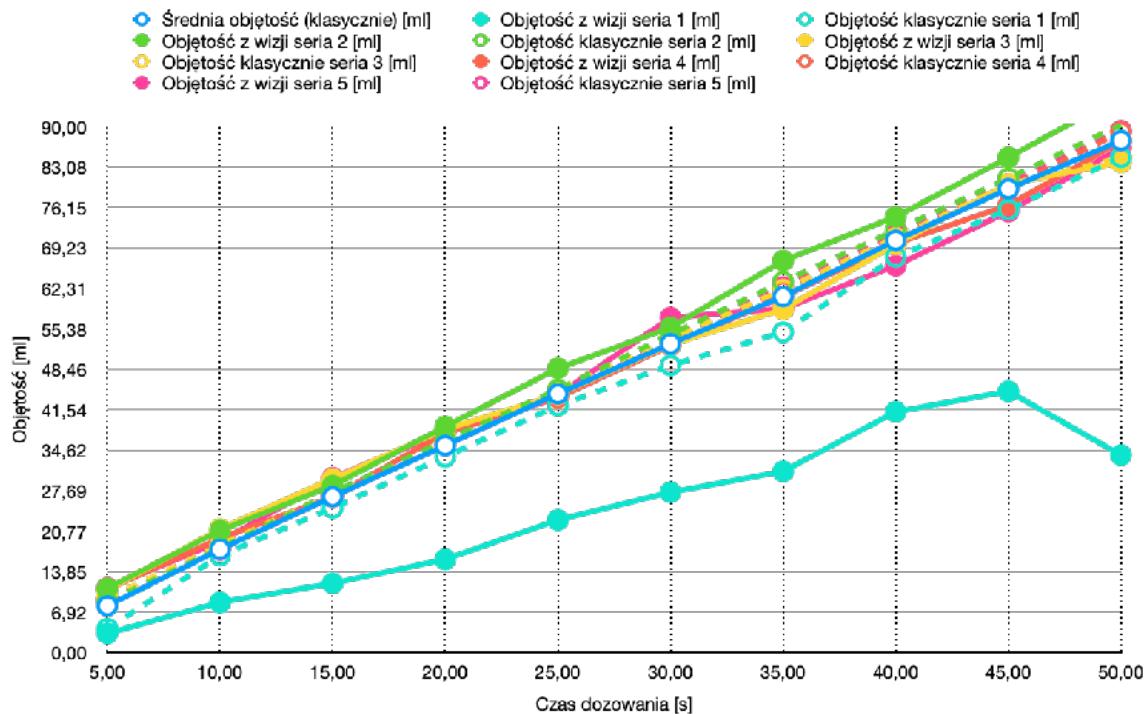
Tab 6.1.1c Wyniki dozowania herbaty



Rys. 6.1.1a Zestawienie uśrednionych wyników dozowania z 5 serii herbaty

Uśrednione wyniki nie wnoszą zbyt dużej wartości, ponieważ liczy się każdy pojedynczy przygotowany napój. Na rysunku 6.1.1b przedstawiono wykres zbiorczy każdego pojedynczego dozowania - liniami ciągłymi zaznaczone metody wizyjne, liniami przerywanymi metody klasyczne, dla każdej z pięciu serii pomiarowych.

Zdecydowana większość pomiarów silnie koreluje ze sobą, poza pierwszą serią. Seria ta została nagrana jako chronologicznie ostatnia, co było spowodowane utratą plików. Analizując nagranie widać że nieznacznie zmieniły się warunki oświetleniowe w polu widzenia kamery - co poskutkowało znacznie większym błędem. W tabeli 6.1.1d przedstawiono obliczone błędy względne dla każdej serii oraz uśredniony błąd względny. Na rysunku 6.1.1c przedstawiono obliczone błędy w formie wykresu. Jak można zauważyć błąd średni nie przekracza 30%, jednak dla większości prób nie przekracza on 10% i jest silnie zawyżony przez jeden serie z innym oświetleniem.

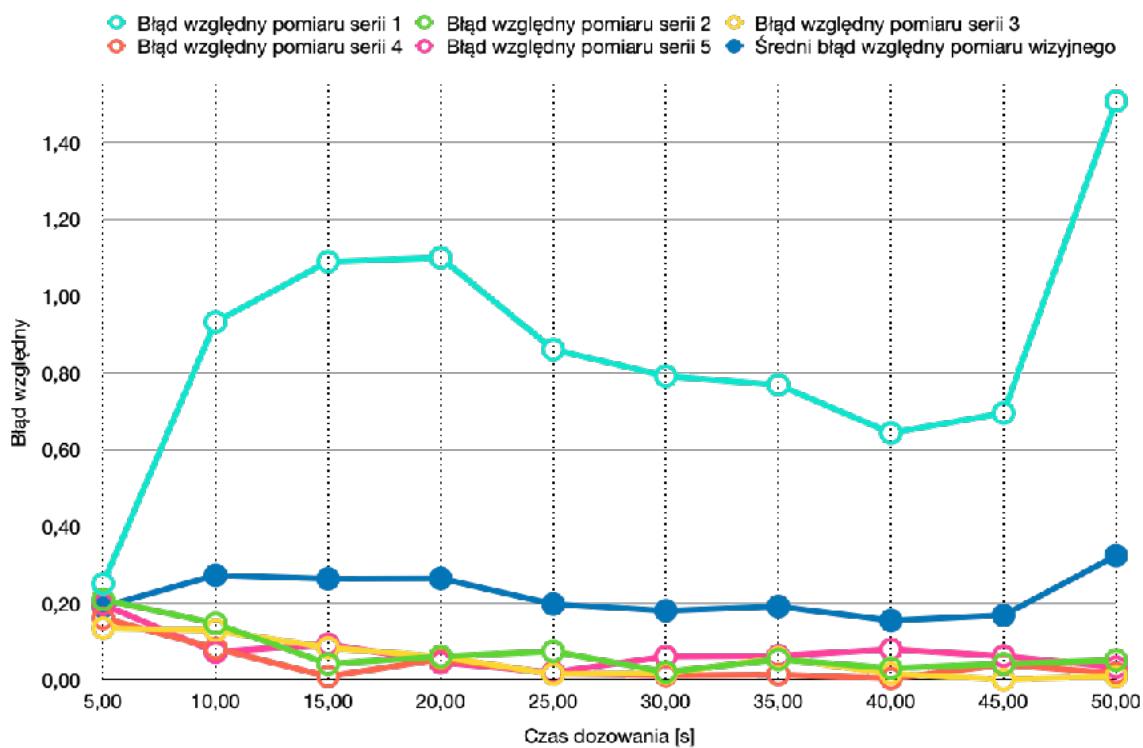


Rys. 6.1.1b Porównanie poszczególnych serii dozowania herbaty

LP	Czas dozowania [s]	Błąd względny pomiaru serii 1	Błąd względny pomiaru serii 2	Błąd względny pomiaru serii 3	Błąd względny pomiaru serii 4	Błąd względny pomiaru serii 5	Średni błąd względny pomiaru wizyjnego
1	5,00	0,25	0,21	0,14	0,16	0,20	0,19
2	10,00	0,93	0,15	0,13	0,08	0,07	0,27
3	15,00	1,09	0,04	0,08	0,01	0,09	0,26
4	20,00	1,10	0,06	0,06	0,05	0,05	0,26
5	25,00	0,86	0,07	0,02	0,02	0,02	0,20
6	30,00	0,79	0,02	0,02	0,01	0,06	0,18

7	35,00	0,77	0,05	0,06	0,01	0,06	0,19
8	40,00	0,64	0,03	0,02	0,00	0,08	0,15
9	45,00	0,70	0,04	0,00	0,04	0,06	0,17
10	50,00	1,51	0,05	0,01	0,02	0,03	0,32

Tab. 6.1.1d Obliczone błędy dla poszczególnych serii dozowania herbaty



Rys. 6.1.1c Wykres błędów względnych dozowania wizyjnego herbaty

6.1.2. Wyniki dozowania syropu

- Weryfikacja stałości dozowania

Obliczony średni przepływ jako średnia arytmetyczna, dla danych przedstawionych w tabeli 6.1.2a wynosi 80 ml/min z odchyleniem standardowym 3 ml/min. Jest to wynikiem znaczco niższym od deklarowanego przez producenta 150ml/min, co potwierdziło tezę że większa gęstość i lepkość substancji wpływa na prędkość dozowania. Ważne jest że wielokrotne próby nie wpływają negatywnie na pracę pompy i wynik ten nie zmniejsza się wraz z kolejnymi próbami.

LP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Czas nalewania [s]	189	193	192	193	180	178	193	190	179	187

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

Obliczony przepływ [ml/min]	79	78	78	78	83	84	78	79	84	80
------------------------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tab. 6.1.2a Obliczony przepływ syropu dla każdej próby

- Określenie gęstości cieczy

Obliczenie gęstości dozowanej cieczy pozwala wykorzystać pomiar masy do określania objętości. W tabeli 6.1.2b obliczono gęstość dla 10 zmierzonych przypadków. Średnia gęstość dla syropu wynosi 1,31 g/ml z odchyleniem standardowym 0,01 g/ml.

LP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa [g]	86,83	90,00	70,14	76,35	70,00	76,83	69,74	66,53	70,51	77,57
Objętość [ml]	66,00	68,00	53,00	58,00	53,00	59,00	53,00	52,00	53,00	59,00
Obliczona gęstość [g/ml]	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,30	1,32	1,28	1,33	1,31

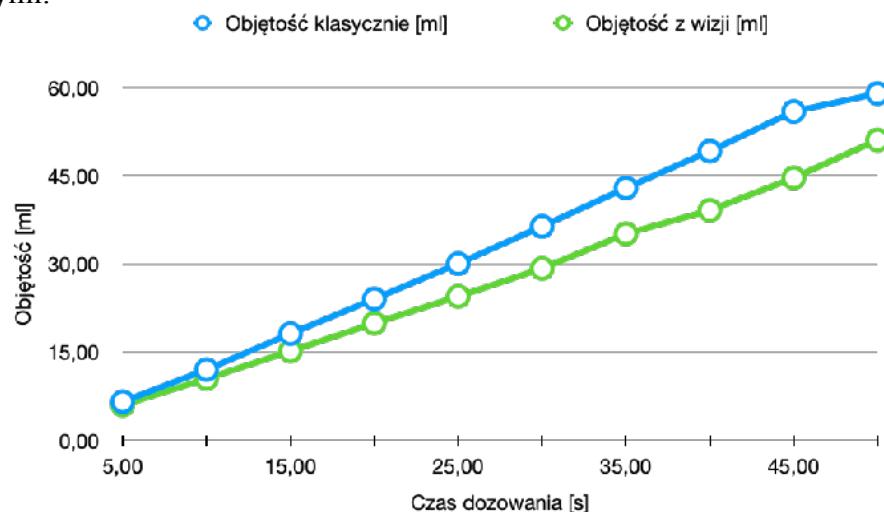
Tab. 6.1.2b Obliczona gęstość syropu

- Analiza wyników z 5 serii pomiarowych dozowania syropu

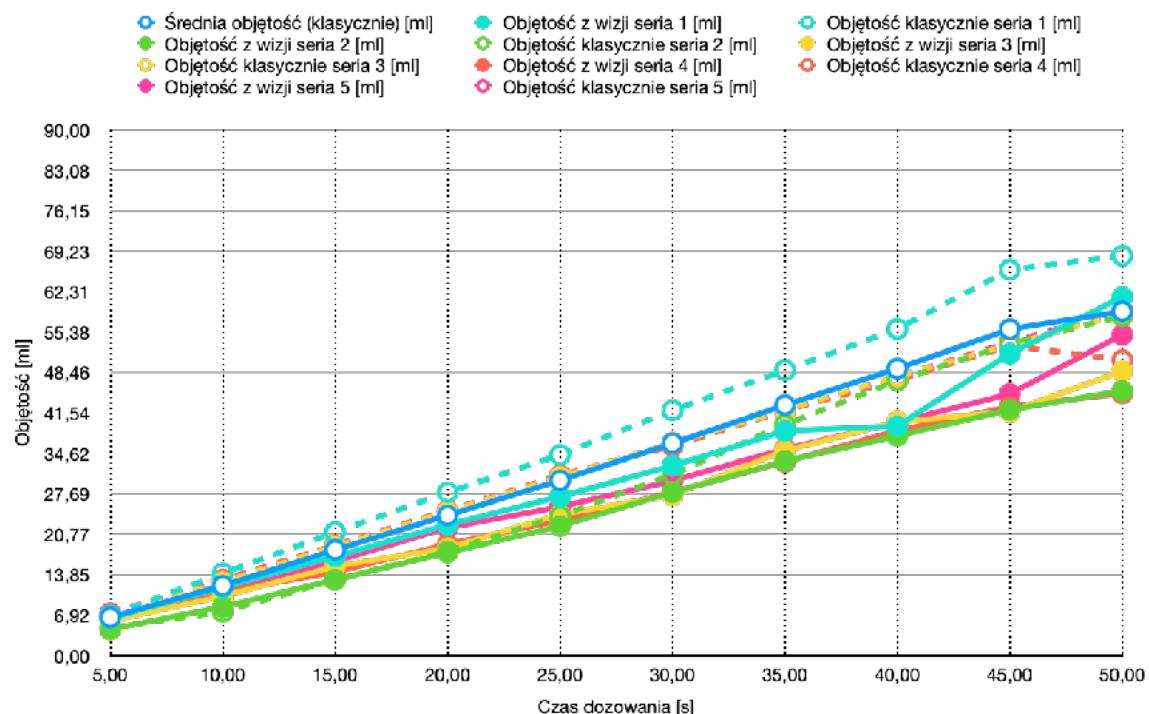
LP	Czas dozowania [s]	Objętość z wizji seria 1 [ml]	Objętość klasycznie seria 1 [ml]	Objętość z wizji seria 2 [ml]	Objętość klasycznie seria 2 [ml]	Objętość z wizji seria 3 [ml]	Objętość klasycznie seria 3 [ml]	Objętość z wizji seria 4 [ml]	Objętość klasycznie seria 4 [ml]	Objętość z wizji seria 5 [ml]	Objętość klasycznie seria 5 [ml]	Średnią objętość (klasycznie) [ml]	Średnią objętość wizyjną [ml]
1	5,00	6,41	6,85	4,50	4,78	5,92	6,75	6,37	7,01	6,52	7,22	6,52	5,94
2	10,00	11,70	14,05	8,32	7,49	10,17	12,62	10,91	12,70	11,10	13,03	11,98	10,44
3	15,00	16,96	21,12	13,00	12,94	15,26	18,68	14,32	18,89	16,14	18,82	18,09	15,14
4	20,00	22,38	27,96	17,64	17,85	18,38	24,65	19,05	24,75	21,87	24,80	24,00	19,87
5	25,00	27,24	34,37	22,16	23,92	24,14	30,60	23,14	30,89	25,46	30,23	30,00	24,43
6	30,00	32,49	42,00	27,96	31,01	27,50	36,36	27,99	35,88	29,91	36,42	36,34	29,17
7	35,00	38,48	48,86	33,29	39,57	35,10	42,07	33,14	41,96	35,37	41,94	42,88	35,08
8	40,00	39,29	55,93	37,62	47,05	40,02	47,78	38,52	47,18	39,94	47,76	49,14	39,08
9	45,00	51,67	66,07	42,09	53,37	41,76	53,26	42,61	53,07	44,80	53,65	55,88	44,59
10	50,00	61,39	68,48	45,32	58,10	48,68	58,46	44,89	50,62	54,90	59,02	58,94	51,03

Tab 6.1.2c Wyniki dozowania syropu

W tabeli 6.1.2c przedstawiono wyniki dozowania klasycznego jak i wizyjnego z pięciu serii pomiarowych. Tabela powstała na podstawie tabeli 5.1.2c. Na rys. 6.1.2a przedstawiono uśrednione wyniki dozowania z 5 serii. Podobnie jak dla herbaty pompa perystaltyczna dozuje ciecz dosyć powtarzalnie. Wyniki z wizji korelują z wynikami klasycznymi.



Rys. 6.1.2a Zestawienie uśrednionych wyników dozowania z 5 serii



Rys. 6.1.2b Porównanie poszczególnych serii dozowania syropu

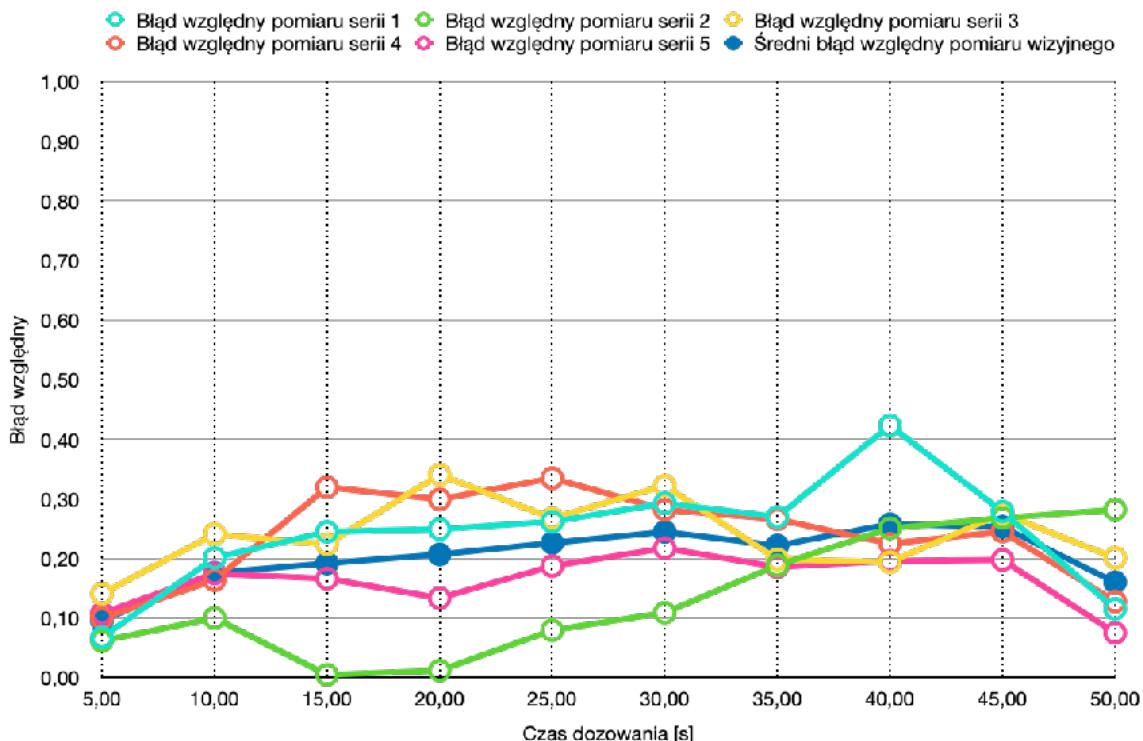
Na rysunku 6.1.2b przedstawiono wyniki z poszczególnych serii. W odróżnieniu od herbaty tutaj wszystkie próby zostały przeprowadzone w podobnych warunkach oświetleniowych. Wyniki w kolejnych próbach korelują ze sobą. W tabeli 6.1.2d

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

obliczono błędy względne zarówno dla każdej serii jak i uśrednione. Na rysunku 6.1.2c przedstawiono te błędy w formie wykresu. Jak widać praktycznie w każdej serii błędy przekraczają 15%, ale w większości przypadków mieszczą się poniżej 40%. Jest to wynik zdecydowanie gorszy niż dla dozowania herbaty.

LP	Czas dozowania [s]	Błąd względny pomiaru serii 1	Błąd względny pomiaru serii 2	Błąd względny pomiaru serii 3	Błąd względny pomiaru serii 4	Błąd względny pomiaru serii 5	Średni błąd względny pomiaru wizyjnego
1	5,00	0,07	0,06	0,14	0,10	0,11	0,10
2	10,00	0,20	0,10	0,24	0,16	0,17	0,18
3	15,00	0,24	0,00	0,22	0,32	0,17	0,19
4	20,00	0,25	0,01	0,34	0,30	0,13	0,21
5	25,00	0,26	0,08	0,27	0,33	0,19	0,23
6	30,00	0,29	0,11	0,32	0,28	0,22	0,24
7	35,00	0,27	0,19	0,20	0,27	0,19	0,22
8	40,00	0,42	0,25	0,19	0,22	0,20	0,26
9	45,00	0,28	0,27	0,28	0,25	0,20	0,25
10	50,00	0,12	0,28	0,20	0,13	0,08	0,16

Tab. 6.1.2d Obliczone błędy dla poszczególnych serii dozowania syropu



Rys. 6.1.2c Wykres błędów względnych dozowania wizyjnego syropu

6.1.3. Wyniki dozowania mleka

- Weryfikacja stałości dozowania

Obliczony średni przepływ jako średnia arytmetyczna, dla danych przedstawionych w tabeli 6.1.3a wynosi 115 ml/min z odchyleniem standardowym 4 ml/min. Jest to wynikiem znaczco niższym od deklarowanego przez producenta 150ml/min, co potwierdziło tezę że lepkość substancji, zawartość tłuszczy wpływa na prędkość dozowania.

LP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Czas nalewania [s]	138	133	133	132	128	129	129	128	122	129
Obliczony przepływ [ml/min]	109	113	113	114	117	116	116	117	123	116

Tab. 6.1.3a Obliczony przepływ mleka dla każdej próby

- Określenie gęstości cieczy

Obliczenie gęstości dozowanej cieczy pozwala wykorzystać pomiar masy do określania objętości. W tabeli 6.1.3b obliczono gęstość dla 10 zmierzonych

przypadków. Średnia gęstość dla mleka wynosi 1,03 g/ml z odchyleniem standardowym 0,04 g/ml.

LP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa [g]	77,75	76,64	77,00	85,32	77,00	85,29	77,33	85,77	78,16	86,80
Objetość [ml]	74,00	83,00	75,00	83,00	75,00	82,00	73,00	83,00	74,00	84,00
Obliczona gęstość [g/ml]	1,05	0,92	1,03	1,03	1,03	1,04	1,06	1,03	1,06	1,03

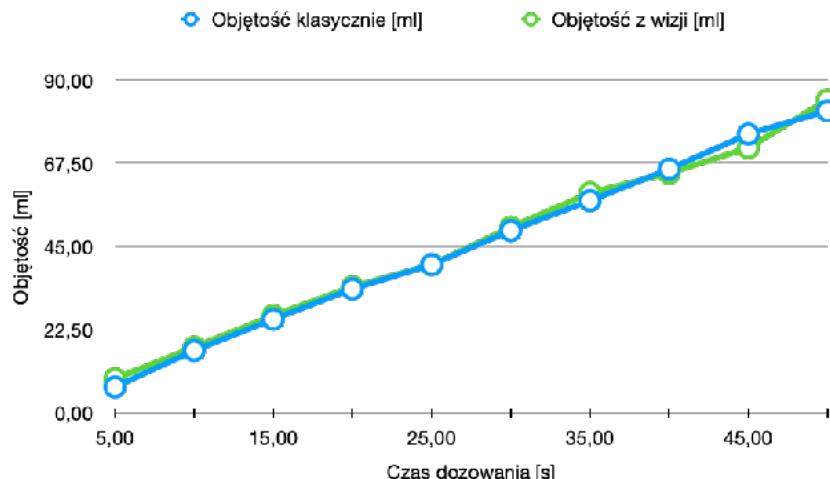
Tab. 6.1.3b Obliczona gęstość mleka

- Analiza wyników z 5 serii pomiarowych dozowania mleka

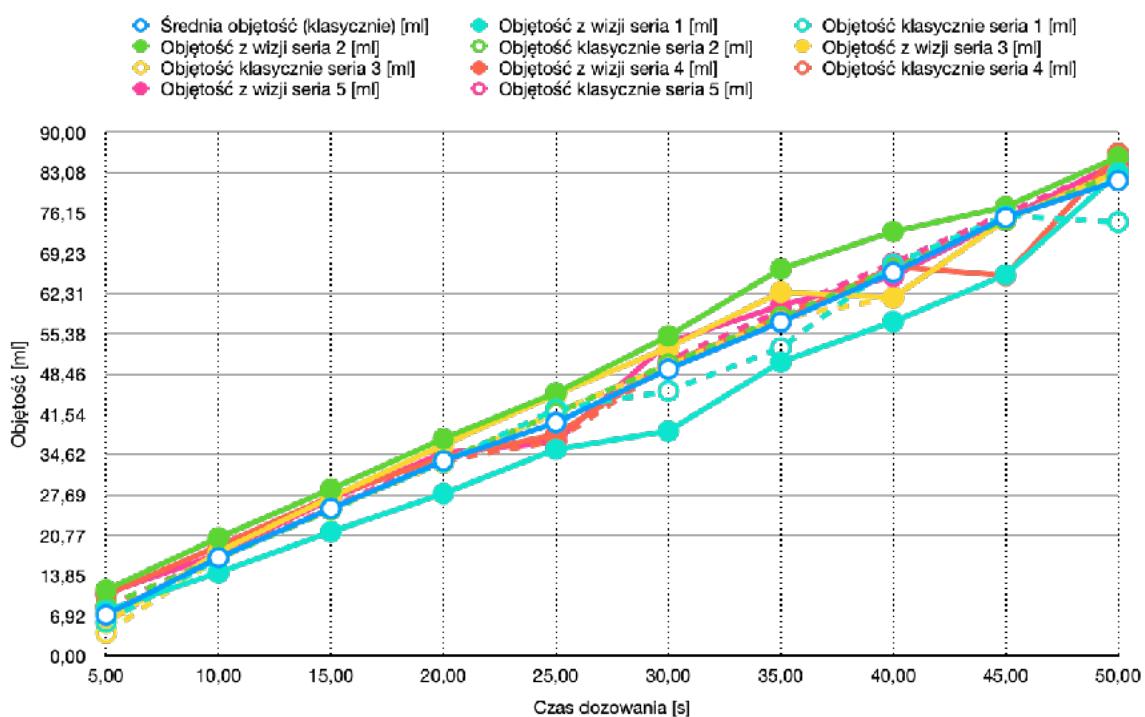
LP	Czas dozowania [s]	Średnia objętość (klasyczne) [ml]	Objet ość z wizji seria 1 [ml]	Objet ość klasycznie seria 1 [ml]	Objet ość z wizji seria 2 [ml]	Objet ość klasycznie seria 2 [ml]	Objet ość z wizji seria 3 [ml]	Objet ość klasycznie seria 3 [ml]	Objet ość z wizji seria 4 [ml]	Objet ość klasycznie seria 4 [ml]	Objet ość z wizji seria 5 [ml]	Objet ość klasycznie seria 5 [ml]	Średnia objętość (klasyczne) [ml]	Średnia objętość wizyjnie [ml]
1	5,00	7,05	7,83	5,84	11,36	8,60	5,71	4,01	10,55	8,34	10,72	8,46	7,05	9,23
2	10,00	16,92	14,34	16,80	20,35	16,79	17,92	16,94	18,93	17,05	17,55	17,00	16,92	17,82
3	15,00	25,35	21,34	25,30	28,69	25,11	27,29	25,30	27,41	25,46	27,01	25,59	25,35	26,35
4	20,00	33,54	27,92	33,32	37,35	33,57	36,28	33,21	34,19	33,57	34,88	34,05	33,54	34,12
5	25,00	40,11	35,53	42,40	45,23	41,73	44,95	41,84	38,03	36,97	36,86	37,60	40,11	40,12
6	30,00	49,31	38,67	45,54	54,98	50,18	53,01	49,93	50,36	50,09	53,88	50,81	49,31	50,18
7	35,00	57,39	50,53	52,93	66,52	58,20	62,53	58,07	57,67	58,38	60,24	59,35	57,39	59,49
8	40,00	65,92	57,46	67,29	72,95	66,56	61,58	61,61	66,93	66,57	65,25	67,54	65,92	64,83
9	45,00	75,36	65,51	75,65	77,19	74,92	75,00	74,92	65,38	75,24	75,19	76,05	75,36	71,65
10	50,00	81,70	83,04	74,57	85,74	83,01	83,17	82,99	86,40	83,45	84,79	84,45	81,70	84,63

Tab 6.1.3c Wyniki dozowania mleka

W tabeli 6.1.3c przedstawiono wyniki dozowania klasycznego jak i wizyjnego z pięciu serii pomiarowych. Tabela powstała na podstawie tabeli 5.1.3c. Na rys. 6.1.3a przedstawiono uśrednione wyniki dozowania z 5 serii. Podobnie jak we wcześniejszych przypadkach pompa perystaltyczna dozuje ciecz bardzo powtarzalnie. Na rysunku 6.1.3b przedstawiono wyniki dla poszczególnych dozowań.



Rys. 6.1.3a Zestawienie uśrednionych wyników dozowania z 5 serii

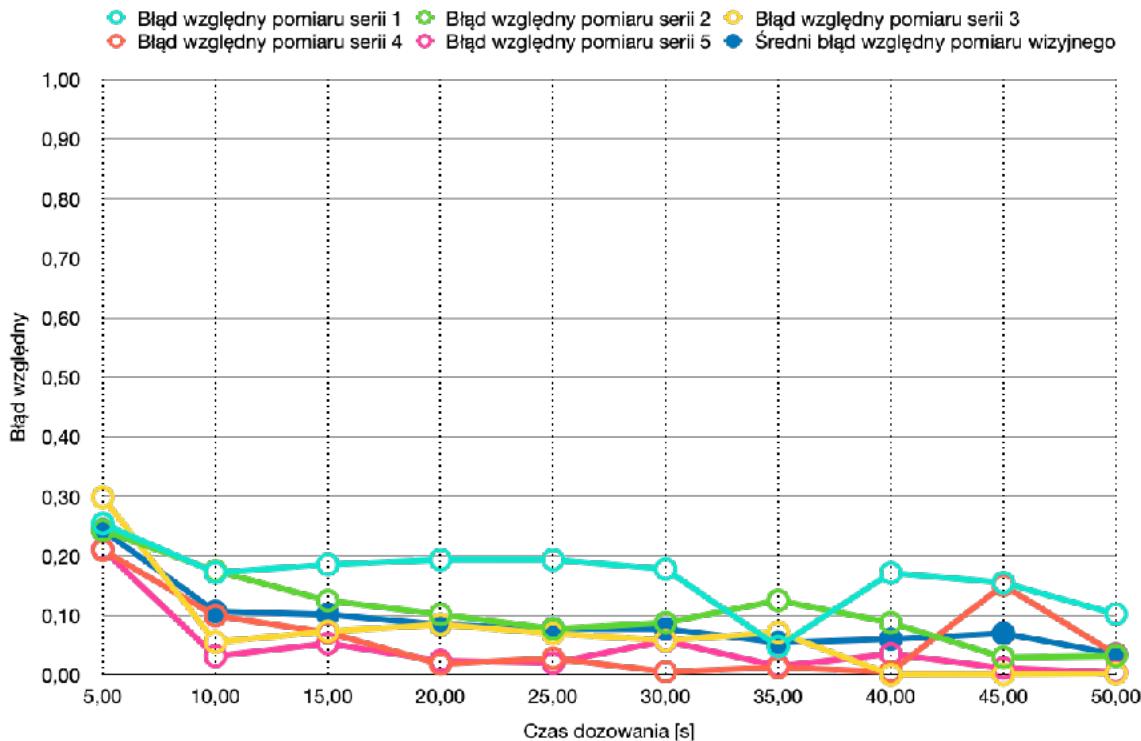


Rys. 6.1.3b Porównanie poszczególnych serii dozowania mleka

W tabeli 6.1.3d obliczono błędy względne dozowania wizyjnego. Na rysunku 6.1.3c przedstawiono te dane w formie wykresu. W przypadku mleka, w większości przypadków średnie błędy były one na poziomie 10%, poza wyjątkiem który stanowi pierwszą próbą. Dla poszczególnych serii błędy pozostają na poziomie poniżej 20%, dla znacznej większości pomiarów.

LP	Czas dozowania [s]	Błąd względny pomiaru serii 1	Błąd względny pomiaru serii 2	Błąd względny pomiaru serii 3	Błąd względny pomiaru serii 4	Błąd względny pomiaru serii 5	Średni błąd względny pomiaru wizyjnego
1	5,00	0,25	0,24	0,30	0,21	0,21	0,24
2	10,00	0,17	0,17	0,05	0,10	0,03	0,11
3	15,00	0,19	0,12	0,07	0,07	0,05	0,10
4	20,00	0,19	0,10	0,08	0,02	0,02	0,08
5	25,00	0,19	0,08	0,07	0,03	0,02	0,08
6	30,00	0,18	0,09	0,06	0,01	0,06	0,08
7	35,00	0,05	0,12	0,07	0,01	0,01	0,05
8	40,00	0,17	0,09	0,00	0,01	0,04	0,06
9	45,00	0,15	0,03	0,00	0,15	0,01	0,07
10	50,00	0,10	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03

Tab. 6.1.3d Obliczone błędy dla poszczególnych serii dozowania mleka



Rys. 6.1.3c Wykres błędów względnych dozowania wizyjnego mleka

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

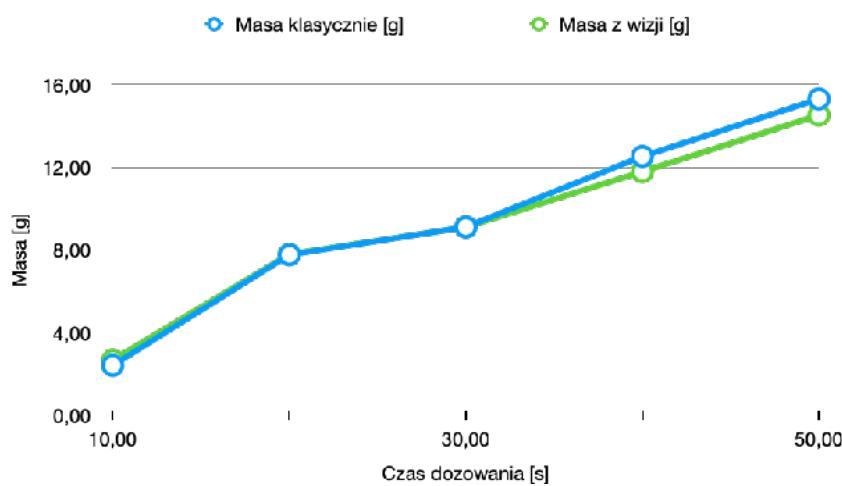
6.2. Wyniki dozowania substancji sypkich

6.2.1. Wyniki dozowania suszonych owoców

W tabeli 6.2.1a przedstawiono wyniki dozowania, na podstawie tabeli 5.2.1b. Na rys. 6.2.1a przedstawiono uśrednione wyniki dozowania suszonych owoców. Jak można zauważyć podajniki śrubowe dozują zdecydowanie bardziej nieregularnie w porównaniu do pomp perystaltycznych. Porównując poszczególne wyniki z pięciu serii przedstawione na rys 6.2.1b widać zdecydowany rozrzut wyników pomiędzy seriami.

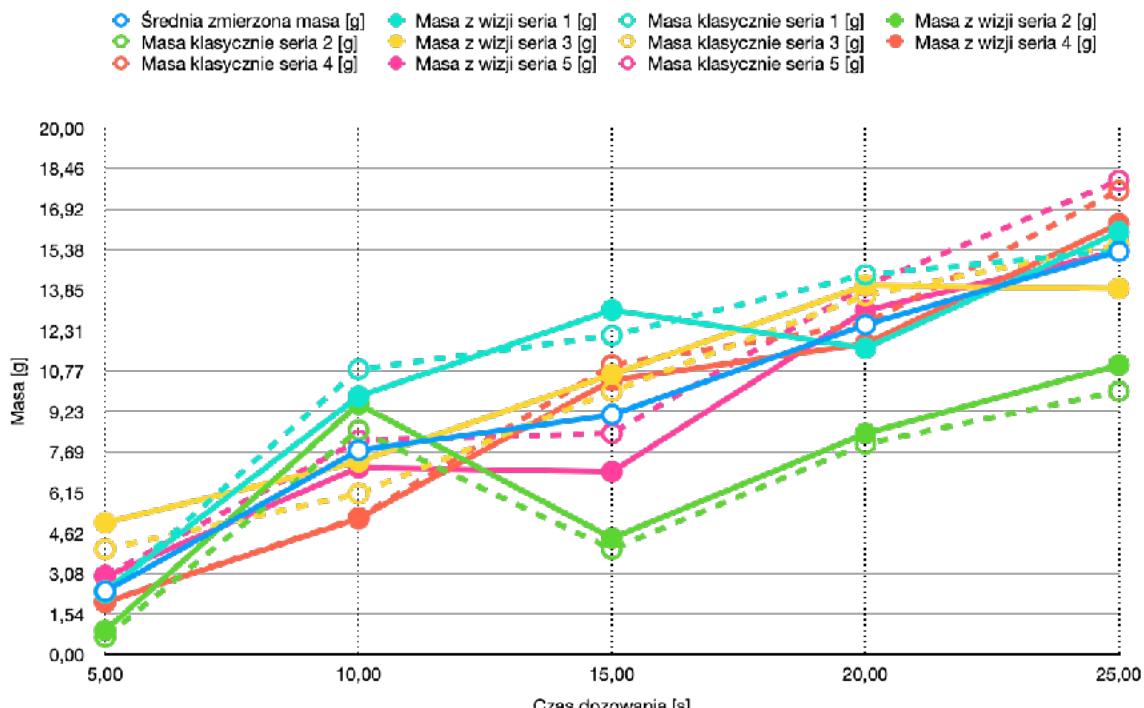
LP	Czas dozowania [s]	Masa z wizji seria 1 [g]	Masa klasycznej seria 1 [g]	Masa z wizji seria 2 [g]	Masa klasycznej seria 2 [g]	Masa z wizji seria 3 [g]	Masa klasycznej seria 3 [g]	Masa z wizji seria 4 [g]	Masa klasycznej seria 4 [g]	Masa z wizji seria 5 [g]	Masa klasycznej seria 5 [g]	Średnia zmiana masa [g]	Średnia zmiana wizyjnie
1	5,00	2,43	2,35	0,91	0,66	5,01	4,00	1,98	2,00	2,97	3,00	2,40	2,66
2	10,00	9,81	10,83	9,51	8,52	7,33	6,11	5,17	5,20	7,10	8,13	7,76	7,79
3	15,00	13,09	12,12	4,43	4,00	10,64	10,00	10,42	11,00	6,94	8,40	9,10	9,10
4	20,00	11,63	14,42	8,40	8,00	14,02	13,64	11,80	12,57	13,07	14,00	12,53	11,78
5	25,00	16,05	15,34	11,00	10,00	13,90	15,58	16,35	17,62	15,33	18,00	15,31	14,53

Tab 6.2.1a Wyniki dozowania suszonych owoców



Rys. 6.2.1a Zestawienie uśrednionych wyników dozowania suszonych owoców z 5 serii

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

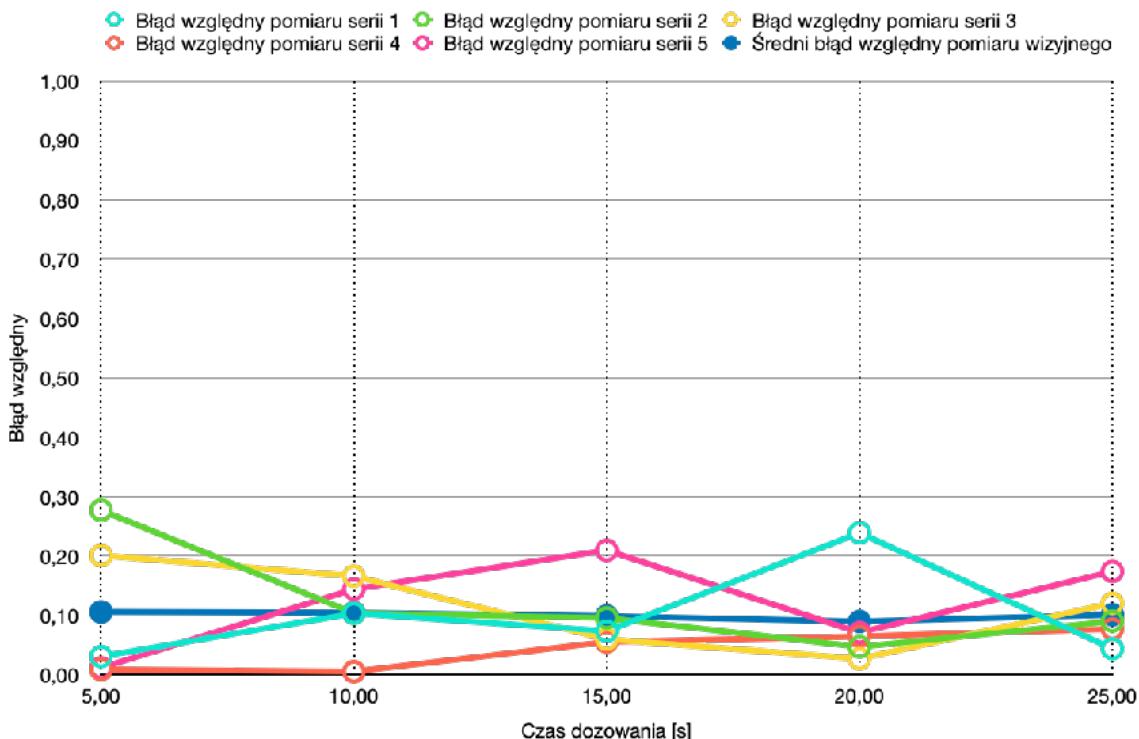


Rys. 6.2.1b Porównanie poszczególnych serii dozowania suszonych owoców

Jednak obserwujący wyniki w ramach tych samych serii - zmierzone metodą klasyczną oraz wizyjną korelacja jest bardzo duża. W tabeli 6.2.1b obliczono błędy względne. Wyniki przedstawiono na rysunku 6.2.1c. Średni błąd nie przekracza 10%. Jest to wynik znacznie lepszy niż dla cieczy. Prawdopodobnie jest to spowodowane faktem że granulki suszonych owoców znacznie lepiej odróżniają się od tła w porównaniu do kropli cieczy. Pojedyncze błędy do kolejnych serii niestety sugerują również że algorytm nie wypada aż tak dobrze. W ramach jednej serii wyniki oscylują od 1% do 20%.

LP	Czas dozowania [s]	Błąd względny pomiaru serii 1	Błąd względny pomiaru serii 2	Błąd względny pomiaru serii 3	Błąd względny pomiaru serii 4	Błąd względny pomiaru serii 5	Średni błąd względny pomiaru wizyjnego
1	5,00	0,03	0,28	0,20	0,01	0,01	0,11
2	10,00	0,10	0,10	0,17	0,01	0,14	0,10
3	15,00	0,07	0,10	0,06	0,06	0,21	0,10
4	20,00	0,24	0,05	0,03	0,06	0,07	0,09
5	25,00	0,04	0,09	0,12	0,08	0,17	0,10

Tab. 6.2.1b Obliczone błędy dla poszczególnych serii dozowania suszonych owoców



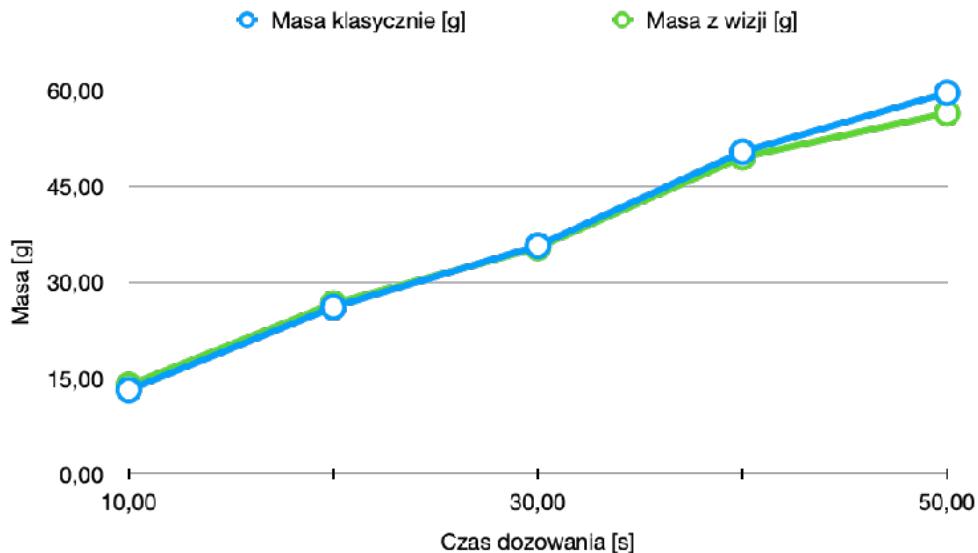
Rys. 6.2.1c Wykres błędów względnych dozowania wizyjnego dozowania suszonych owoców

6.2.2. Wyniki dozowania cukru

W tabeli 6.2.2a przedstawiono wyniki dozowania cukru, na podstawie tabeli 5.2.2b. Na rysunku 6.2.2a przedstawiono uśrednione wyniki z pięciu serii. W porównaniu do granulatów można zaobserwować dużo większą liniowość dozowania, ale jeszcze nie tak dobrą jak w przypadku dozowania płynów.

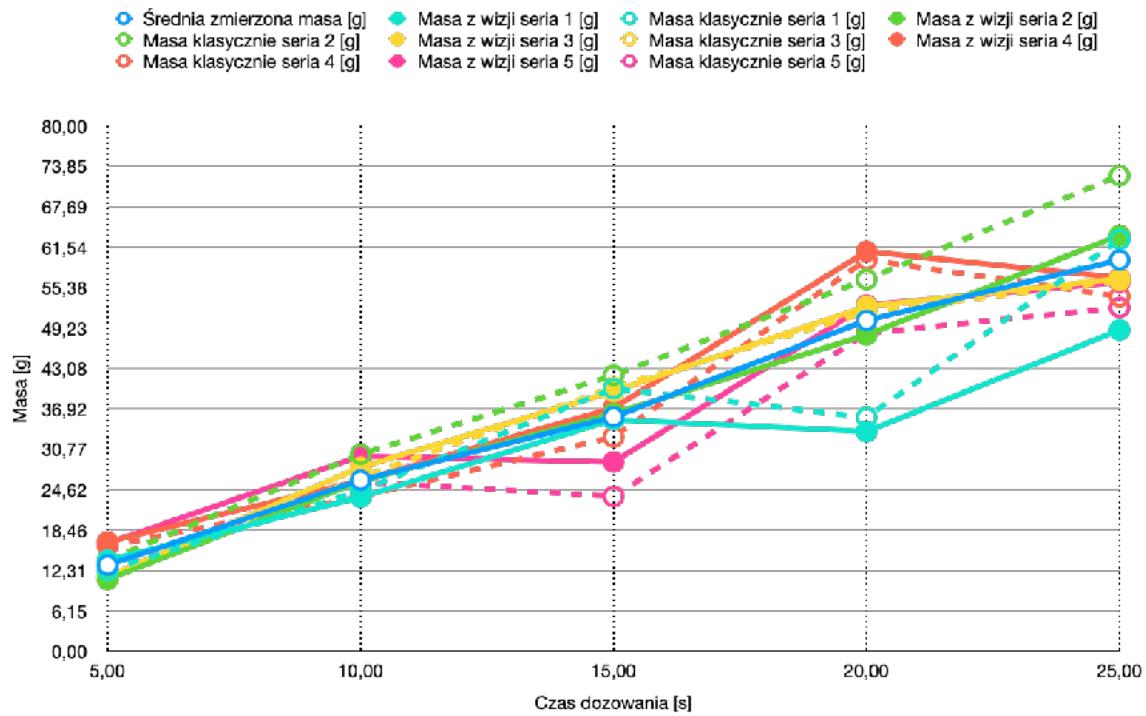
LP	Czas dozowania [s]	Masa z wizji seria 1 [g]	Masa klasycznie seria 1 [g]	Masa z wizji seria 2 [g]	Masa klasycznie seria 2 [g]	Masa z wizji seria 3 [g]	Masa klasycznie seria 3 [g]	Masa z wizji seria 4 [g]	Masa klasycznie seria 4 [g]	Masa z wizji seria 5 [g]	Masa klasycznie seria 5 [g]	Średnia zmierzona masa [g]	Średnia zmierzona wizyjnie masa
1	5,00	13,87	12,33	10,97	13,87	11,37	11,00	16,65	16,00	16,45	12,38	13,12	13,86
2	10,00	23,46	24,44	25,88	30,00	28,01	26,48	26,00	23,53	29,73	25,81	26,05	26,62
3	15,00	35,27	40,00	36,19	42,00	39,57	40,17	37,06	32,63	28,81	23,58	35,68	35,38
4	20,00	33,45	35,61	48,15	56,63	52,48	51,59	60,88	59,63	52,67	48,40	50,37	49,53
5	25,00	48,90	62,70	63,32	72,41	56,73	56,45	56,85	54,00	56,20	52,32	59,58	56,40

Tab 6.2.2a Wyniki dozowania cukru



Rys. 6.2.2a Zestawienie uśrednionych wyników dozowania z 5 serii

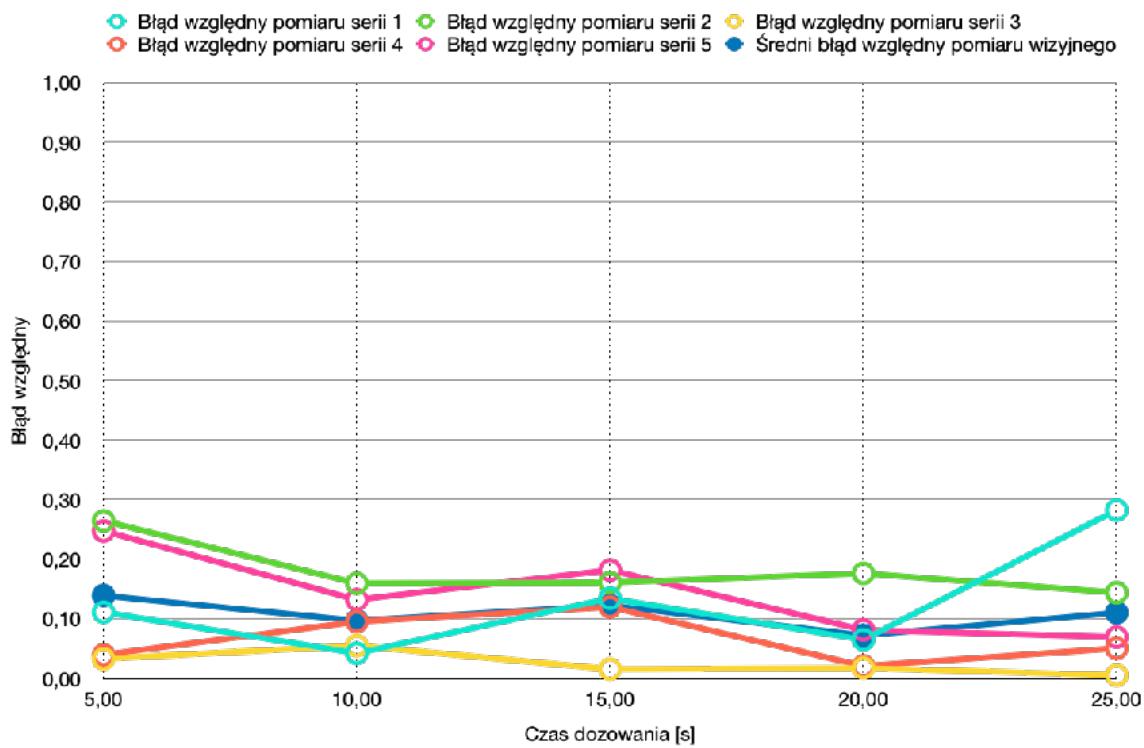
Na rysunku 6.2.2b przedstawiono wyniki z pięciu serii pomiarowych. Wyniki uzyskane z wizji dobrze korelują z klasycznymi. W tabeli 6.2.2b obliczono błędy względne. Na rysunku 6.2.2c przedstawiono wyniki z tej tabeli. Widoczne są obliczone średnie błędy względne - nieprzekraczające 15% oraz błędy w poszczególnych próbach, nieprzekraczające 30%.



Rys. 6.2.2b Porównanie poszczególnych serii dozowania cukru

LP	Czas dozowania [s]	Błąd względny pomiaru serii 1	Błąd względny pomiaru serii 2	Błąd względny pomiaru serii 3	Błąd względny pomiaru serii 4	Błąd względny pomiaru serii 5	Średni błąd względny pomiaru wizyjnego
1	5,00	0,11	0,26	0,03	0,04	0,25	0,14
2	10,00	0,04	0,16	0,05	0,09	0,13	0,10
3	15,00	0,13	0,16	0,02	0,12	0,18	0,12
4	20,00	0,06	0,18	0,02	0,02	0,08	0,07
5	25,00	0,28	0,14	0,00	0,05	0,07	0,11

Tab. 6.2.2b Obliczone błędy dla poszczególnych serii dozowania cukru

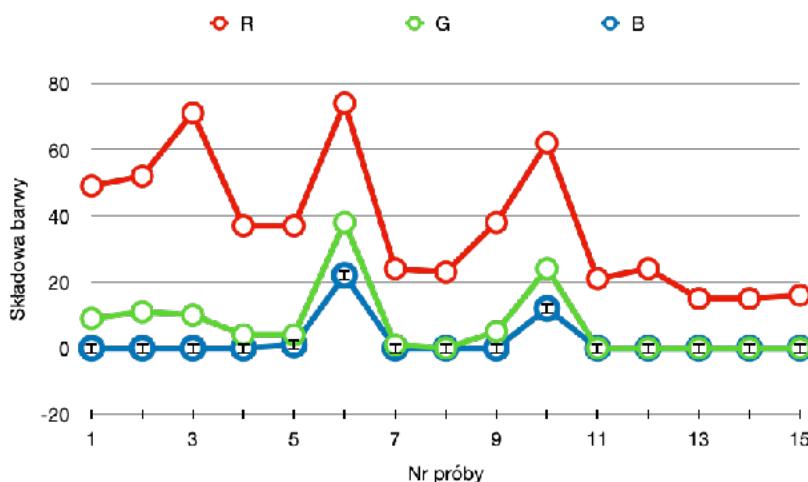


Rys. 6.2.2c Wykres błędów względnych dozowania wizyjnego

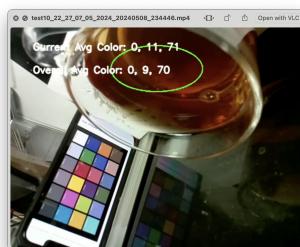
6.3. Wyniki alternatywnych metod detekcji

6.3.1. Weryfikacja barwy herbaty

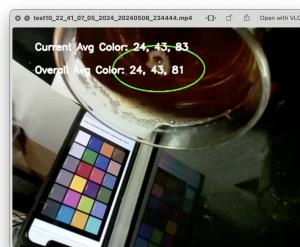
Na rysunku 6.3.1a przedstawiono wyniki analizy video barwy herbaty. Jak się okazało kilka prób znacząco odstawały od reszty wyników. Przedstawione klatki z nagrani na rysunkach 6.3.1b, 6.3.1c oraz 6.3.1d uwidaczniają problem - piana na powierzchni, która znalazła się w obszarze detekcji. Postanowiono pominąć te wyniki. Na rysunku 6.3.1e przedstawiono uśrednione wyniki dla każdej masy herbaty z której przygotowano napój. Jak widać pomiar jest dosyć liniowy i można wykorzystać do określenia intensywności napoju.



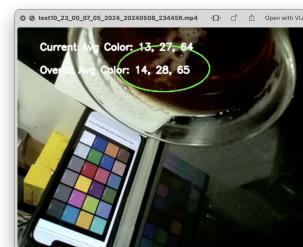
Rys. 6.3.1a Wyniki detekcji składowych barwy dla wszystkich prób



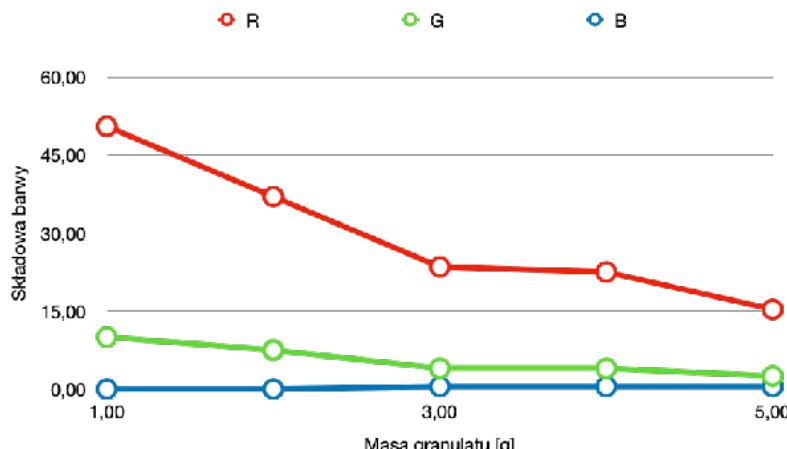
Rys. 6.3.1b Piana w
obszarze detekcji w trzeciej
próbce



Rys. 6.3.1c Piana w
obszarze detekcji w szóstej
próbce



Rys. 6.3.1d Piana w
obszarze detekcji w
dziewiątej próbie



Rys. 6.3.1e Uśrednione wyniki dla kolejnych mas granulatu po eliminacji prób gdzie analizowano herbatę z pianą

6.3.2. Detekcja obecności kubka

Wykrywanie kubka za pomocą sieci neuronowej działa bardzo dobrze. Niestety wykorzystuje bardzo dużo zasobów. Nawet analizując zaledwie 5 klatek na sekundę program zużywa ponad 90% czasu procesora oraz znaczne ilości pamięci RAM. Niestety rozwiązanie wymaga dopracowania, na przykład na detekcję odbicia kubka.

6.3.3. Oszacowanie objętości kubka

Szacowanie objętości kubka zrealizowano tylko jako dowód koncepcji. Uzyskane błędy były dość znaczące, zbyt duże by na tym etapie móc wykorzystać tą informację. Jednak stworzony program udowadnia że możliwe jest wykrycie kubka i szacowanie jego pojemności.

6.4. Podsumowanie wyników

W tym rozdziale udowodniono że w maszynie takiej jak ekspres do herbaty możliwe jest zastąpienie klasycznych metod pomiarowych systemem wizyjnym. W aplikacji na tyle nie krytycznej można zaakceptować błędy dozowania na poziomie nawet 30%. System radzi sobie zarówno z pomiarem dozowanych cieczy, choć tutaj skuteczność była uzależniona od rodzaju cieczy i wałała się od 10% do 30%. Bardzo dobre efekty, z błędami na poziomie 10% uzyskano dla dozowanych granulatów w postaci suszonych owoców. Dozowanie cukru również dało zadowalający wynik, z błędem na poziomie 15%. Sam system oferuje dodatkowe możliwości takie jak detekcja intensywności przygotowanej herbaty za pomocą wizji, detekcja kubków czy zgrubne określenie ich pojemności. Te dodatkowe możliwości zaprezentowane jak dowód koncepcji, wymagające udoskonalenia i ich skuteczność nie została poddana mierzącej ocenie. Pomimo uzyskanych całkiem dobrych wyników, przed implementacją rozwiązania w pełni wizyjnego należałoby odpowiedzieć jeszcze na pytanie czy trzeba zrobić system w pełni wizyjny. W ocenie autora to fuzja

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

informacji uzyskanych klasycznie z tym systemu wizyjnego może pozwolić uzyskać najlepsze dane o przebiegu procesu.

7. Analiza wyników, wnioski i dalsze prace

7.1. Wyniki oraz konkluzje

W pracy udało się zrealizować pierwotny cel - porównanie wizyjnych metod pomiarowych do metod klasycznych na przykładzie ekspresu do herbaty. Zbudowano środowisko testowe, stworzono potrzebne do automatyzacji testów oprogramowanie oraz opracowano algorytmy do detekcji wizyjnej używanych w ekspresie składników. Zaproponowane metody pomimo swojej prostoty okazały się być skuteczne i z sukcesem posłużyły do określenia ilości dozowanych produktów. Prawie w każdej próbie błędów względnych dozowania wizyjnego nie przekraczały 30%. W przypadku jakim jest ekspres do herbaty błędy na takim poziomie są akceptowane. Dodatkowo sprawdzono i udowodniono możliwości aplikacji, poprzez stworzenie prototypów, dodatkowych funkcjonalności systemu wizyjnego. Skutecznie określono barwę herbaty, świadcząca o intensywności napoju, stworzono aplikację wykorzystującą sieć neuronową do detekcji obecności kubka oraz napisano program do zgrubnego określania wielkości kubka. Wszystko wymienione świadczy o możliwości zastosowania systemu wizyjnego jako system pomiarowy w ekspresie do herbaty.

7.2. Napotkane problemy

W trakcie przygotowania środowiska pomiarowego napotkano wiele problemów dosyć typowych dla systemów wizyjnych. Zmienne warunki oświetleniowe - zarówno jasność jak i barwa światła, czy złożone tło skutecznie utrudniały analizę obrazu i segmentację poszukiwanych obiektów. Ograniczenia sprzętowe samej kamery, takie jak zbyt mała maksymalna liczba rejestrów klatek, czy zbyt niska maksymalna rozdzielcość. Optymalne ustawienie kamery dla konkretnego zadania. Dodatkowym problemem były również niedoskonałości ekspresu do herbaty. Blokujące się dozowniki lub niedopracowane oprogramowanie wymuszały niejednokrotnie powtórzenie testów. Dużo czasu zajęło również stworzenie oprogramowania umożliwiającego detekcję dozowanych składników. Przetestowanie każdego z algorytmów, przetworzenie zarejestrowanych eksperymentów zajęły kilka tygodni pracy.

7.3. Przyszłe prace

Dużo pracy należałyby na pewno poświęcić usprawnieniu programów i uodpornieniu ich na przypadki szczególne. W kontekście ekspresu do herbaty należałyby go przeprojektować tak, aby system wizyjny stał się integralną częścią maszyny. Środowisko wokół kamery należałyby znormalizować - stałe oświetlenie, tło umożliwiające detekcję różnych składników, by móc pomogłyby dodanie planszy kalibracyjnej. Powinno się również zastanowić nad sposobem rozwiązania problemu czyszczenia obiektywu kamery oraz tła.

Praca dyplomowa magisterska — Zbadanie i porównanie wizyjnych technik weryfikacji
oraz kwantyfikacji procesu dozowania

8. Bibliografia

1. Wilson, J. (2004). *Sensor Technology Handbook*. Newnes.
2. Fraden, J. (2015). *Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs, and Applications*. 5th ed. Springer.
3. Jensen, K. D. (2017). Flow Measurements. *Measurement Techniques*, 60(5), pp. 1-19.
4. Zhang, Y. (2022). *2D Computer Vision. Principles, Algorithms and Applications*. Springer.
5. Ma, T., Liu, Y., and Tao, Y. (2021). Drone-based Object Counting by Spatially Regularized Regional Proposal Network. *IEEE Transactions on Image Processing*, 30, pp. 1395-1408.
6. Xie, W., Shi, Z., and Tian, C. (2018). Counting From Sky: A Large-Scale Data Set for Remote Sensing Object Counting and a Benchmark Method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(2), pp. 661-671.
7. Kim, J., and Kang, B. (2020). Real-time Accurate Object Counting for Smart Farms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105512.
8. Kowalczyk, M., and Nowak, J. (2016). Analiza możliwości wykorzystania systemu wizyjnego do rozpoznawania typu wiórów. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 20(3), pp. 34-38.
9. Lee, J., and Hong, S. (2019). Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision. *Journal of Manufacturing Processes*, 45, pp. 1-9.
10. Wang, L., and Zhang, Y. (2019). Application of machine vision technology in geometric dimension measurement of small parts. *Measurement Science and Technology*, 30(12), 125401.
11. Chen, Z., and Li, H. (2017). An Embedded Real-Time Object Detection and Measurement of its Size. *Sensors*, 17(8), 1750.
12. Zhang, X., Li, J., and Zhao, Y. (2015). Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(5-8), pp. 995-1004.

Spis tabel

1. Tab. 5.1.1a - Pomiar czasu dozowania 250 ml herbaty
2. Tab. 5.1.1b - Pomiar masy oraz objętości herbaty
3. Tab. 5.1.1c - Wyniki dozowania herbaty - pomiar 5 serii dozowań
4. Tab. 5.1.2a - Pomiar czasu dozowania 250 ml syropu
5. Tab. 5.1.2b - Pomiar masy oraz objętości syropu
6. Tab. 5.1.2c - Wyniki dozowania syropu - pomiar 5 serii dozowań
7. Tab. 5.1.3a - Pomiar czasu dozowania 250 ml mleka
8. Tab. 5.1.3b - Pomiar gęstości dla mleka
9. Tab. 5.1.3c - Wyniki dozowania mleka - pomiar 5 serii dozowań
10. Tab. 5.2.1a - Pomiar dozowania granulatu przez 50 sekund
11. Tab. 5.2.1b - Wyniki dozowania suszonych owoców
12. Tab. 5.2.2a - Pomiar ilości dozowanego cukru przez 50 sekund
13. Tab. 5.2.2b - Wyniki dozowania cukru
14. Tab. 5.2.10 - Wyniki pomiaru intensywności herbaty
15. Tab. 5.3.2 - Wyniki szacowania wielkości kubków

Spis rysunków

1. Rys. 1.1 - Projekt CAD ekspresu do herbaty
2. Rys. 1.2 - Fizyczna maszyna - ekspres do herbaty
3. Rys. 1.3 - Płytki sterujące ekspresem do herbaty
4. Rys. 3.1.1 - Termostaty bimetaliczne w ekspresach do kawy. Opracowanie własne.
5. Rys. 3.1.2 - Czujnik Halla weryfikujący pracę młynka. Opracowanie własne.
6. Rys. 3.1.3 - Czujnik pojemnościowy używany do detekcji wody w zbiorniku. Opracowanie własne.
7. Rys. 3.1.4 - Po lewej czujnik natężenia pola magnetycznego halla, po prawej pływak, z przyczepionym magnesem wewnątrz zbiornika z wodą. Opracowanie własne.
8. Rys. 3.1.5 - Turbina używana w ekspresie do kawy. Opracowanie własne.
9. Rys. 3.1.6 - Dozownik do granulatów w maszynie vendingowej.
10. Rys. 3.1.7 - Maszyny vendingowe z podajnikiem taśmowym (po lewej) oraz podajnikiem z spiralnym (po prawej). Opracowanie własne.
11. Rys. 3.2.1 - Czujnik przepływu cieczy. Źródło - botland.com
12. Rys. 3.2.2 - Czujnik halla. Źródło botland.com
13. Rys. 3.2.3 - Czujnik odległości podczerwieni. Źródło botland.com

14. Rys. 3.2.4 - Belka tensometryczna. Źródło botland.com
15. Rys. 3.2.5 - Czujnik szczelinowy. Źródło botland.com
16. Rys. 3.2.6 - Czujnik spektrum światła. Źródło botland.com
17. Rys. 3.2.7 - Absolutny enkoder przelotowy firmy Netzer. Źródło netzerprecision.com
18. Rys. 3.2.8 - Czujnik pirometryczny firmy Opbris. Źródło opbris.com
19. Rys. 3.2.9 - Czujnik fotoelektryczny dyfuzyjny firmy QWIFM. Źródło qwdhc.com
20. Rys. 3.2.10 - Stanowisko pokazowe firmy Baumer - system wizyjny do weryfikacji detalu, podczas targów Warsaw Industry Week Expo. Opracowanie własne.
21. Rys. 3.2.11 - Stanowisko pokazowe firmy Baumer - prezentacja działania czujników serii CleverLevel. Opracowanie własne.
22. Rys. 3.2.12 - System wizyjny zamontowany na stanowisku pokazowym firmy Engel - Targi Kielce Plastpol 2024. Opracowanie własne.
23. Rys. 4.1 - Etapy przygotowania środowiska testowego
24. Rys. 4.1.1 - Etapy procesu rozwoju nowego produktu. Opracowanie własne.
Źródło: www.asana.com
25. Rys. 4.1.2 - Ekspres do herbaty. Opracowanie własne.
26. Rys. 4.1.3 - Kamera i obszar przygotowania napoju. Opracowanie własne.
27. Rys. 4.1.4 - Komputer jednopłytkowy Raspberry PI Zero 2. Opracowanie własne.
28. Rys. 4.1.5 - Płytką sterującą ekspresem do herbaty wraz z mikrokontrolerem Raspberry PI PICO. Opracowanie własne.
29. Rys. 4.2.1 - Efekt działania programu dropsLiveDetection
30. Rys. 4.2.2 - Użycie zasobów podczas pracy programu dropsLiveDetection
31. Rys. 4.3.1 - Pierwotne ustawienie kamery
32. Rys. 4.3.2 - Optymalne ustawienie kamery do detekcji kubków
33. Rys. 4.3.3 - Optymalne ustawienie kamery do detekcji cieczy i granulatów
34. Rys. 4.3.4 - Stanowisko testowe przy pierwszych testach
35. Rys. 4.3.5 - Optymalne stanowisko testowe do detekcji przelatujących cieczy
36. Rys. 4.3.6 - Pierwotny połyskujący panel przedni
37. Rys. 4.3.7 - Matowy panel niebieski użyty w trakcie testów
38. Rys. 4.5.1 - Raspberry PI camera V1 OVA5647. Źródło bootland.com
39. Rys. 4.5.2 - Raspberry PI camera V2 IMX219. Źródło bootland.com
40. Rys. 4.5.3 - Raspberry PI camera V3 IMX708. Źródło bootland.com
41. Rys. 4.5.4 - Ustawienie rejestracji na rozdzielcość 720x720 oraz 205 kl/sek
42. Rys. 4.5.5 - Ustawienie rejestracji na rozdzielcość 1280x720 oraz 112 kl/sek
43. Rys. 4.5.6 - Ustawienie rejestracji na rozdzielcość 1536x864 oraz 92 kl/sek
44. Rys. 4.5.7 - Ustawienie rejestracji na rozdzielcość 1920x1080 oraz 60 kl/sek

45. Rys. 4.5.8 - Próbna detekcja dla różnych ustawień kamery
46. Rys. 4.5.9 - Próbna detekcja dla różnych ustawień kamery, regresja liniowa wyników
47. Rys. 4.6.1 - Przygotowane środowisko testowe. Opracowanie własne.
48. Rys. 4.6.2 - Komputer połączony zdalnie z ekspresem do herbaty. Opracowanie własne.
49. Rys. 4.6.3 - Optymalne ustawienie kamery do testów w odległości 50 cm. Opracowanie własne.
50. Rys. 4.7.1 - Zrzut ekranu aplikacji sterującej kamerą. Opracowanie własne.
51. Rys. 4.7.2 - Fragment kodu aplikacji do analizy obrazu. Opracowanie własne.
52. Rys. 4.8.1 - Interfejs użytkownika programu do analizy wyników detekcji. Opracowanie własne.
53. Rys. 4.8.2 - Przykład analizy wyników z detekcji herbaty. Opracowanie własne.
54. Rys. 4.8.3 - Przykład analizy wyników z detekcji syropu. Opracowanie własne.
55. Rys. 4.8.4 - Przykład analizy wyników z detekcji mleka. Opracowanie własne.
56. Rys. 4.9.1 - Schemat podłączenia systemu detekcji do ekspresu. Opracowanie własne.
57. Rys. 4.9.2 - Przykład wizualizacji wyników detekcji w czasie rzeczywistym. Opracowanie własne.
58. Rys. 5.1.1 - Pomiar czasu dozowania 250 ml herbaty. Opracowanie własne.
59. Rys. 5.1.2 - Pomiar masy oraz objętości herbaty. Opracowanie własne.
60. Rys. 5.1.3 - Wyniki dozowania herbaty - pomiar 5 serii dozowań. Opracowanie własne.
61. Rys. 5.2.1 - Pomiar czasu dozowania 250 ml syropu. Opracowanie własne.
62. Rys. 5.2.2 - Pomiar masy oraz objętości syropu. Opracowanie własne.
63. Rys. 5.2.3 - Wyniki dozowania syropu - pomiar 5 serii dozowań. Opracowanie własne.
64. Rys. 5.3.1 - Pomiar czasu dozowania 250 ml mleka. Opracowanie własne.
65. Rys. 5.3.2 - Pomiar gęstości mleka. Opracowanie własne.
66. Rys. 5.3.3 - Wyniki dozowania mleka - pomiar 5 serii dozowań. Opracowanie własne.
67. Rys. 5.4.1 - Wyniki pomiaru intensywności herbaty. Opracowanie własne.
68. Rys. 5.4.2 - Wyniki szacowania wielkości kubków. Opracowanie własne.
69. Rys. 5.5.1 - Wyniki analizy detekcji poziomu płynów w kubku. Opracowanie własne.
70. Rys. 5.5.2 - Diagram przedstawiający zmienność dozowania płynów w różnych kubkach. Opracowanie własne.
71. Rys. 5.6.1 - Przykład dozowania granulatu przez 50 sekund. Opracowanie własne.
72. Rys. 5.6.2 - Wyniki dozowania suszonych owoców. Opracowanie własne.

73. Rys. 5.7.1 - Pomiar ilości dozowanego cukru przez 50 sekund. Opracowanie własne.
74. Rys. 5.7.2 - Wyniki dozowania cukru. Opracowanie własne.