

Wizyjny system do wykrywania wtrąceń w elementach z tworzywa sztucznego wykorzystujący modele 3D

Paweł Rotter, Maciej Klemiato, Dawid Knapik, Maciej Rosół

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Automatyki i Robotyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Grzegorz Putynkowski

Centrum Badań i Rozwoju Technologii dla Przemysłu S.A., ul. L. Waryńskiego 3A, 00-645 Warszawa

Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcję systemu do wykrywania wtrąceń, czyli wad występujących w postaci lokalnych przebarwień na powierzchniach elementów z tworzywa sztucznego produkowanych metodą wtrysku wysokociśnieniowego. System ten stanowi jeden z elementów większego systemu optycznej kontroli jakości elementów polimerowych, obejmującego także kontrolę geometrii. Wtrącenia mogą być skutecznie wykrywane jako obszary o niejednorodnej jasności, jednakże z badanego obrazu należy wcześniej wykluczyć krawędzie obiektu. Obraz krawędzi wyznaczany jest na podstawie modeli CAD produkowanych elementów, a zaproponowana metoda pary referencyjnej zapewnia precyzyjne nałożenie maski krawędzi na obraz badanego produktu. Algorytm został zaimplementowany w prototypie modułowego systemu kontroli jakości. Po odpowiednim dostrojeniu parametrów wykryte zostały wszystkie wtrącenia na zbiorze testowym, przy poziomie fałszywych alarmów akceptowalnym w zastosowaniach przemysłowych.

Słowa kluczowe: optyczna kontrola jakości, wtryski polimerowe, detekcja wtrąceń, skanowanie 3D, modele CAD

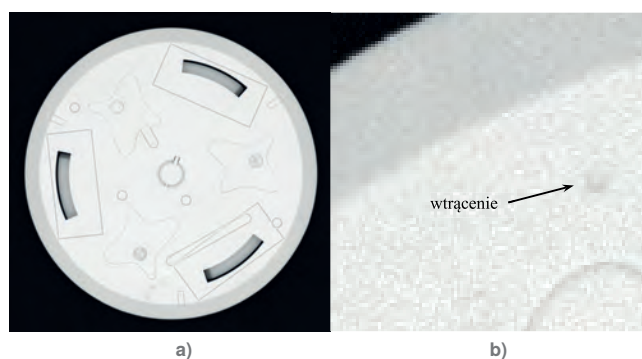
1. Wprowadzenie

Artykuł nawiązuje do badań zaprezentowanych we wcześniejszej publikacji autorów [10], w której opisano projekt oraz implementację systemu kontroli jakości wyrobów z tworzyw sztucznych wytwarzanych metodą wtrysku wysokociśnieniowego. Jedną z części tego systemu jest moduł detekcji wtrąceń, czyli lokalnych przebarwień na powierzchni produkowanych elementów, które stanowią wadę i powinny zostać wykryte w procesie kontroli jakości. Ze względu na fakt, że jest to drugi artykuł z cyklu, nie będziemy dokonywać tu przeglądu literatury dotyczącej metod wykrywania defektów, odsyłając do wcześniejszego artykułu [10] oraz do artykułów przeglądowych [8, 3, 9].

W artykule przedstawiamy zasadę działania modułu detekcji wtrąceń. Charakterystyczną cechą naszej metody jest wykorzystanie trójwymiarowych modeli kontrolowanych elementów, pomimo że wtrącenia wykrywane są na dwuwymiarowym obrazie. Jednakże trójwymiarowy model po odpowiednim dopasowaniu do obrazu kamery pozwala na precyzyjne zlokalizowanie krawędzi, a co za tym idzie odróżnienie zmienności intensywności

obrazu wynikającej z obecności krawędzi od zmienności, której przyczyną jest wystąpienie wtrącenia.

Kontrolowane elementy produkowane są w stosunkowo niewielkich seriach, gdzie wolumeny są liczone w tysiącach. Produkcja wymaga częstych przebrojeń, a system kontroli



Rys. 1. Obraz przykładowego elementu polimerowego (a) oraz powiększenie zaznaczonego fragmentu z widocznym wtrąceniem (b)
Fig. 1. Image of a sample polymer element (a) and a zoomed view of the marked section with a visible inclusion (b)

Autor korespondujący:

Paweł Rotter, rotter@agh.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 29.03.2025 r., przyjęty do druku 27.06.2025 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

powinien uwzględniać występowanie elementów różnego rodzaju w jednym ciągu produkcyjnym, gdyż elementy pochodzące z różnych wtryskarek są umieszczane na tym samym przenośniku taśmowym. Przykładowy element podlegający kontroli oraz powiększenie jego fragmentu zawierające wtrącenie przedstawiono na rys. 1.

2. Schemat metody

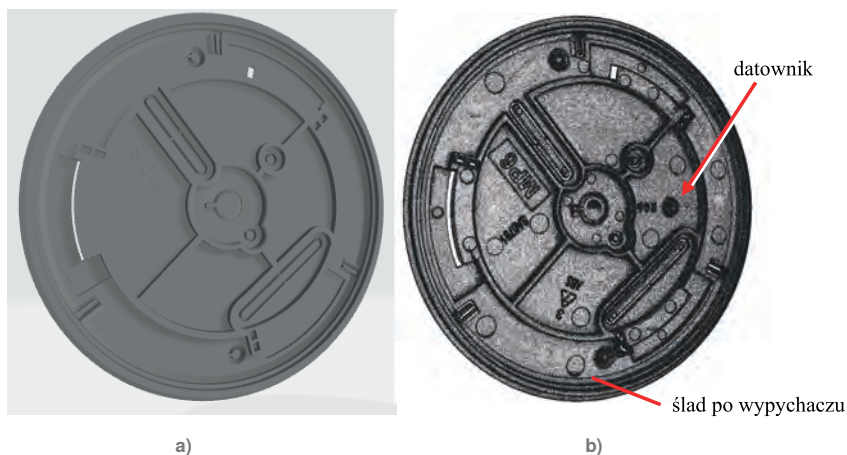
W przypadku białego elementu polimerowego wtrącenie jest widoczne jako ciemna plamka na jasnym tle. Jego wykrycie na jednorodnej powierzchni jest zatem pod względem algorytmicznym zadaniem bardzo prostym, które mogłoby być zrealizowane przy użyciu podstawowych metod analizy obrazu. W rzeczywistości jednak mamy do czynienia z elementami o złożonym kształcie. Duża liczba krawędzi i skomplikowana geometria badanych elementów powodują zarówno konieczność stosowania zaawansowanych algorytmów odpornych na występowanie krawędzi, jak również odpowiedniego systemu wizyjnego zapewniającego bezcieniowy obraz.

2.1. Etap 1: wyznaczenie maski krawędzi na podstawie modeli trójwymiarowych (off-line)

Pierwszym etapem na drodze do wyeliminowania krawędzi z dalszej analizy jest uzyskanie obrazu krawędzi. Może to zostać zrobione na podstawie dwuwymiarowego obrazu elementu przez zastosowanie detektora krawędzi, np. filtr Canny'ego [2], jednak otrzymany w ten sposób obraz krawędzi zawiera wiele zakłóceń, jest nieregularny i zależy od warunków, w których pozyskany był obraz oryginalny. Stąd po zaimplementowaniu i porównaniu obu metod zdecydowaliśmy się na wyznaczenie maski krawędzi na podstawie modeli trójwymiarowych. Dla zestawu kontrolowanych elementów dysponujemy dwoma rodzajami modeli trójwymiarowych:

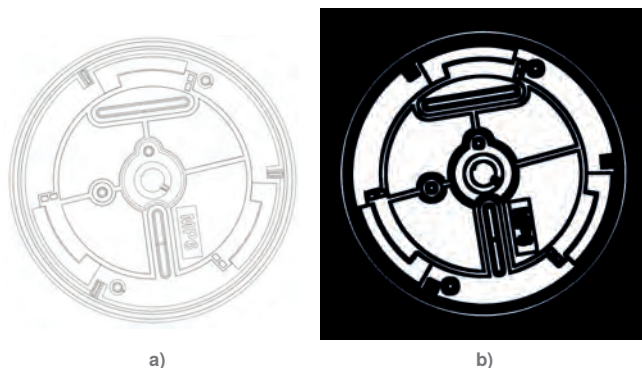
- modele CAD, na podstawie których produkowane są elementy (rys. 2a),
- modele uzyskane przez autorów przez zeskanowanie elementów za pomocą trójwymiarowego skanera GOM Atos Scanbox (rys. 2b).

Skany wykonane własnoręcznie dokładniej odwzorowują rzeczywistą geometrię elementów, gdyż istnieją pewne różnice pomiędzy modelami CAD stosowanymi do produkcji a wyprodukowanymi elementami, wynikające z procesu technologicznego. Do różnic można zaliczyć np. ślady po wtrysku, czyli miejsca, gdzie stopione tworzywo zostało wprowadzone do formy lub ślady po wypychaczach czyli drobne odkształcenia na wypraskach powstałe podczas wypychania detalu po zakończeniu cyklu. Modele CAD często nie określają również precyzyjnego umieszczenia i treści datowników oraz oznaczników identyfikujących numery gniazd w formie, rodzaj materiału i datę produkcji.



Rys. 2. Przykładowy model CAD wykorzystywany do produkcji elementu (a) oraz trójwymiarowy model otrzymany przez zeskanowanie elementu (b)

Fig. 2. Sample CAD model used for the production of the component (a) and the three-dimensional model obtained by scanning the element (b)



Rys. 3. Przykładowy model STL zrzutowany na płaszczyznę 2D (a) oraz wygenerowana na jego podstawie maska (b)

Fig. 3. An example STL model projected onto a 2D plane (a) and a mask generated based on it (b)

Przykładowe różnice przedstawiono na rys. 2b. Jednakże z drugiej strony, w skanach tych powierzchnie aproksymowane są dużą liczbą trójkątów (pliki zapisywane są w formacie STL), przez co trudniej jest wyodrębnić istotne krawędzie. Z tego powodu do określenia lokalizacji krawędzi w module detekcji wtrąceń wykorzystaliśmy modele CAD.

Procedura uzyskiwania maski krawędzi polega na zrzutowaniu modelu 3D na płaszczyznę 2D, równoległą do powierzchni, dla której generowana jest maska. Następnie krawędzie obrazu są pogrubiane za pomocą morfologicznej operacji dylatacji. Tak powstała maska jest obrazem binarnym, który po nałożeniu na analizowany obraz elementu z kamery wyklucza z analizy wtrąceń obszary reprezentowane przez czarne piksele, czyli krawędzie oraz tło. Przykład modelu STL zrzutowanego na płaszczyznę 2D i utworzoną z niego maskę obrazuje rys. 3.

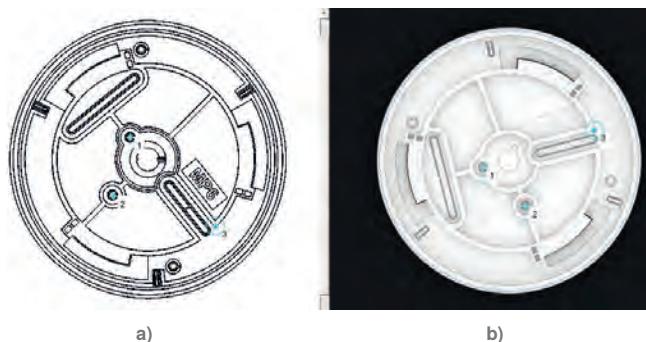
2.2. Etap 2: przygotowanie par referencyjnych (off-line)

W kolejnym kroku na podstawie trójwymiarowego modelu zapisanego w pliku STL przygotowujemy maskę krawędzi przez rzutowanie modelu na płaszczyznę. Istotnym problemem jest konieczność precyzyjnego nałożenia maski krawędzi na obraz z kamery w momencie kontrolowania elementu. Istnieją efektywne i stosunkowo odporne algorytmy automatycznego dopasowywania obrazów (ang. *image registration*) wykorzystujące lokalne deskryptory obrazu typu SIFT [7] czy SURF [1], wymagają one jednak do prawidłowego działania

na wejściu dwóch obrazów w skali szarości, nie są natomiast w stanie efektywnie dopasować obraz w skali szarości do binarnego obrazu krawędzi.

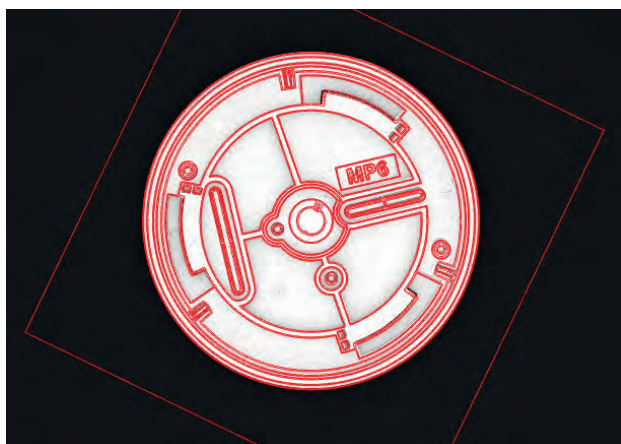
Zaproponowaliśmy zatem podejście oparte na parach obrazów, nazwanych w dalszej części artykułu parami referencyjnymi. W skład każdej pary wchodzi: obraz w skali szarości, podobny do tego, który widzi kamera w trakcie procesu kontroli jakości, nazywany w dalszej części obrazem referencyjnym oraz obraz krawędzi uzyskany przez rzutowanie krawędzi trójwymiarowego modelu elementu. Krawędzie poddane są operacji dylatacji elementem strukturalnym o kształcie koła o promieniu d , dzięki czemu maska obejmuje obszary leżące w bezpośrednim sąsiedztwie krawędzi. Obydwa obrazy wchodzące w skład pary referencyjnej są dopasowane off-line i przechowywane w bazie danych.

Proces tworzenia pary referencyjnej pokazano na rys. 4. Użytkownik zaznacza kilka par odpowiadających sobie punktów na obu obrazach: obrazie krawędzi wyznaczonym z modelu 3D (rys. 4a) i obrazie elementu pochodzącym z kamery (rys. 4b). W celu osiągnięcia większej dokładności użytkownik może korzystać z funkcji *zoom*. Na podstawie par punktów wskazanych przez użytkownika wyznaczona jest transformacja zapewniająca nałożenie na siebie obu obrazów. Obraz krawędzi po zastosowaniu tej transformacji zostaje zapisany w bazie danych wraz z obrazem pochodzącym z kamery jako para referencyjna. Dzięki temu podczas procesu kontroli jakości nałożenie maski krawędzi na obraz kamery może być dokonane automatycznie. Najpierw na obraz podlegający kontroli nakładany jest obraz referencyjny elementu (rys. 4b), a następnie na podstawie zna-



Rys. 4. Obraz krawędzi wyznaczony bezpośrednio z modelu 3D (a) i obraz elementu (b)

Fig. 4. The edges determined directly from the 3D model (a) and the image of the element (b)



Rys. 5. Nałożone na siebie obrazy pary referencyjnej: krawędzie z modelu CAD (czerwone linie) oraz zapisany w bazie danych obraz elementu

Fig. 5. Superimposed images of the reference pair: edges from the CAD model (red lines) and the image of the element stored in the database

leżonych parametrów transformacji na obraz z kamery nakładana jest maska krawędzi. Obrazy pary referencyjnej nałożone na siebie przy zastosowaniu wyznaczonej transformacji przedstawiono na rys. 5.

2.3. Etap 3: klasyfikacja

W procesie produkcyjnym elementy z różnych wtryskarek, a więc różnego kształtu, mogą być umieszczane na wspólnym taśmociągu. Z tego względu pierwszym etapem jest klasyfikacja elementu, która pozwoli na wybór odpowiedniej pary referencyjnej zawierającej maskę krawędzi dla konkretnego typu elementu. Klasyfikator wykonany jest w formie odrębnego modułu, na który składa się kamera Basler ace acA2440-35uc wyposażona w 5 MPx matrycę CMOS oraz wykonany w ramach projektu oświetlacz kopułowy (szczegóły i ilustracja w [10]), co zapewnia równomierne oświetlenie badanego obiektu [5, 6].

Klasyfikacja jest dokonywana w oparciu o konwolucyjną sieć neuronową typu SqueezeNet [4]. Wybór takiej architektury sieci został podyktowany jej stosunkowo dużą szybkością przy niewielkich wymaganiach sprzętowych – sieć SqueezeNet osiąga wydajność porównywalną z AlexNet przy zaledwie 5 MB pamięci na parametry (wagi). Czynniki te były istotne, gdyż sieć została zaimplementowana na mikrokomputerze Raspberry Pi 4, który jest znacznie mniej wydajny niż standardowe komputery klasy PC.

Sieć została zmodyfikowana tak, aby rozpoznawała zadaną przez klienta liczbę klas. Wykorzystano uczenie transferowe, w którym model SqueezeNet wstępnie wytrenowany na zbiorze ponad miliona obrazów z bazy ImageNet został użyty jako punkt wyjścia do procesu uczenia na zestawie zarejestrowanych obrazów 15 typów dwustronnych elementów, czyli 30 klas. Zastosowano także augmentację danych – zestaw treningowy, który obejmował 10 obrazów na klasę, poprzez zastosowanie losowej rotacji i translacji został rozszerzony do 1000 obrazów w każdej klasie. Dane uczące i testowe podzielono w stosunku 70:30.

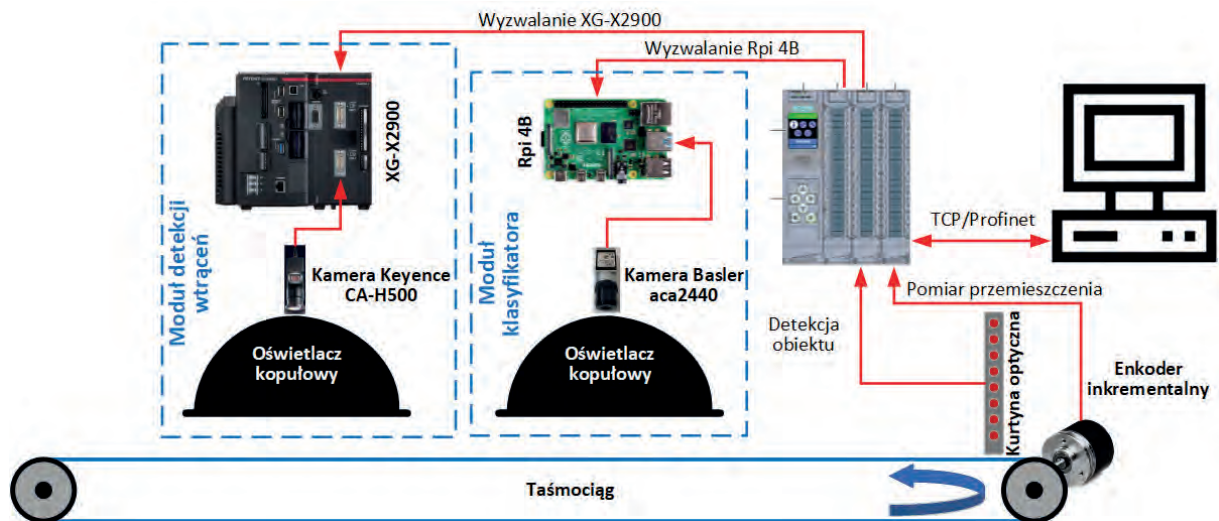
2.4. Etap 4: maskowanie krawędzi i wykrywanie wtrąceń

Po dokonaniu klasyfikacji z bazy danych wybierana jest odpowiednia para referencyjna. Należący do tej pary obraz w skali szarości jest nakładany na obraz elementu znajdującego się na taśmociągu. Dopasowanie przebiega w oparciu o metodę SIFT i wykorzystuje transformację obejmującą przesunięcie, skalowanie i obrót. W następnym kroku parametry transformacji wyznaczone przez to dopasowanie wykorzystane są do nałożenia maski referencyjnej na analizowany element, co zapewnia wyeliminowanie krawędzi z dalszych obliczeń.

Przed przystąpieniem do właściwej detekcji wtrąceń obraz badanego elementu jest poddany filtracji medianowej w celu usunięcia drobnych szumów. Detekcja polega na wykryciu obszarów o dużej lokalnej zmienności intensywności obrazu. W tym celu każdemu pikselowi obrazu o współrzędnych (x, y) , za wyjątkiem pikseli oddalonych o mniej niż d od krawędzi obrazu, przypisana jest wartość odchylenia standardowego intensywności obrazu obliczana dla obszaru ograniczonego kwadratem $[(x-d, y+d), (x+d, y+d)]$, przy czym przyjęliśmy $d = 5$. Obszary tak otrzymanego obrazu, które przekraczają ustaloną wartość progową θ i równocześnie nie znajdują się w obszarze maski krawędzi uznawane są za wtrącenia.

3. Implementacja

W implementacji przyjęto założenie, że system będzie działał w czasie rzeczywistym przy prędkości taśmociągu wynoszącej 20 cm/s. Prototyp musiał także spełniać wymagania związane z pracą w środowisku przemysłowym. Ogólny schemat systemu przedstawiono na rys. 6. Do kontroli pracy poszczegól-



Rys. 6. Schemat systemu detekcji wtrąceń
Fig. 6. Diagram of the inclusion detection system

gólnych elementów systemu wizyjnego wykorzystano sterownik PLC Siemens S7-1500. Podłączono do niego czujnik detekcji obecności elementu na taśmociągu (kurtyna świetlna), enkoder inkrementalny do pomiaru przemieszczenia elementów na taśmociągu oraz sygnały wyzwalania pomiarów przez podsystemy klasyfikatora i detekcji wtrąceń. Rozdzielczość pomiaru enkodera wynosi 60 000 impulsów na obrót, co przy średnicy wałka 39,7887 mm, umieszczonego na taśmociągu, daje rozdzielczość pomiaru przemieszczenia 2,08 μm. Znając położenie osi kamer modułów klasyfikacji i detekcji wtrąceń względem kurtyny optycznej określono położenia, dla których generowane były sygnały wyzwalające dla RPi 4B i XG-X2900.

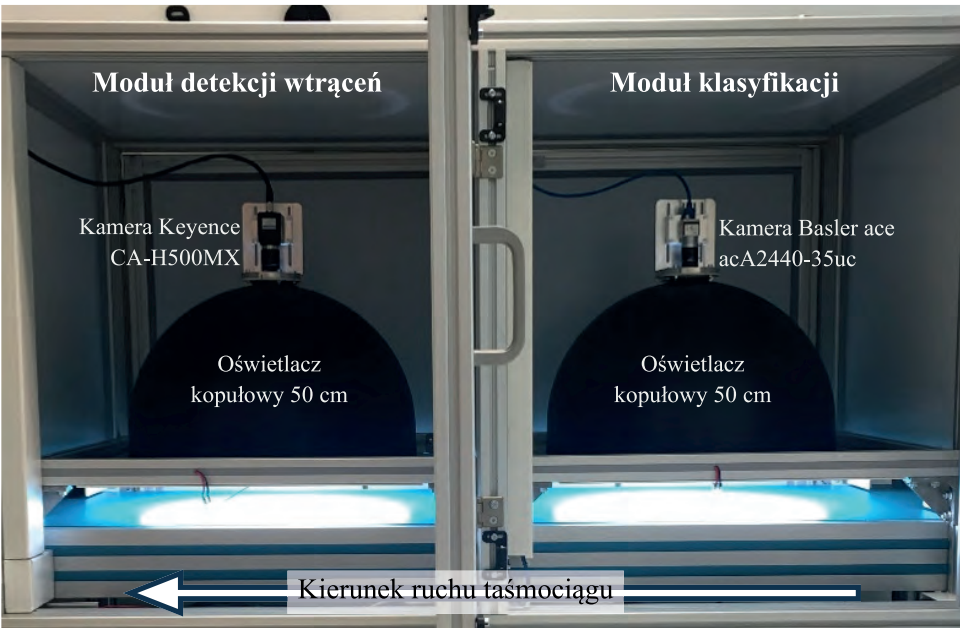
Po wyzwoleniu modułu klasyfikatora przez sterownik PLC następuje identyfikacja typu elementu aktualnie znajdującego się w polu widzenia kamery Basler aca2440. Informacja o typie rozpoznanego elementu zostaje wysłana łączem kablowym Ethernet (TCP/IP) do sterownika Keyence XG-X2900. Pozwala to na załadowanie właściwego obrazu referencyjnego, po wyzwoleniu

przez sterownik modułu detekcji wtrąceń. W efekcie działania tego ostatniego modułu do S7-1500 przesyłana jest informacja o akceptacji lub odrzuceniu badanego elementu. Wszystkie istotne informacje o działaniu systemu, łącznie ze zdjęciami z kamer, przesyłane są do komputera.

Zdjęcie prototypu systemu z wyróżnionymi sekcjami klasyfikatora i detekcji wtrąceń przedstawiono na rys. 7.

4. Testy systemu i wnioski

Przed wykonaniem testów dostrojono parametry algorytmu (w szczególności: wartość progową Q i wielkość otoczenia d), kierując się zasadą, iż przepuszczenie wadliwych elementów (ang. *false negative*) obniża wartość systemu w znacznie większym stopniu niż sygnalizowanie wtrąceń w prawidłowo wykonanych elementach (ang. *false positive*). W tym ostatnim przypadku odrzucone elementy mogą zostać ponownie



Rys. 7. Prototyp systemu detekcji wtrąceń. Po prawej stronie moduł klasyfikacji (elementy poruszają się od prawej do lewej), po lewej stronie właściwy moduł detekcji wtrąceń
Fig. 7. Prototype of the inclusion detection system. On the right side, the classification module (components move from right to left), and on the left side, the actual inclusion detection module

skontrolowane przez pracowników, a incydentalne przypadki odrzucenia prawidłowych elementów nie stanowią dużej straty, natomiast wystąpienie nawet pojedynczych wadliwych elementów może skutkować odrzuceniem przez klienta całej partii towaru, co skutkuje dużymi stratami zarówno materialnymi jak wizerunkowymi.

Po odpowiednim dostrojeniu parametrów system był testowany na 79 elementach, na których eksperci z Centrum Badań i Rozwoju Technologii dla Przemysłu wskazali łącznie 261 wtrąceń. Wszystkie te wtrącenia zostały poprawnie wykryte przez system. Dodatkowo system wykrył 40 wtrąceń, których eksperci nie zasygnalizowali. Są to miejsca, w których występują lokalne różnice w barwie powierzchni, jednak na tyle małe pod względem obszaru lub różnicy w stopniu szarości, że w większości przypadków nie stanowiłyby powodu do odrzucenia produktu. System jest w stanie wykrywać wtrącenia o średnicy od 0,35 mm, jak również nieznaczne zmiany stopnia szarości, trudno dostrzegalne gołym okiem. Przyjęto więc założenie, że nieregularności, które nie zostały zauważone i zaklasyfikowane przez ekspertów jako wtrącenia można uznać za fałszywe wykrycia. Wyznaczone na tej podstawie wartości precyzji (ang. *precision*) i czułości (ang. *recall*) wynoszą odpowiednio: 87 i 100. Są to wartości akceptowalne w zastosowaniach przemysłowych.

Podziękowania

Badania były częściowo finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, grant nr POIR.01.01.01-00-0116/20-00 oraz Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego z subwencji 11.11.120.815. Dziękujemy zespołowi badaczy i inżynierów CBRTP S.A. za współpracę podczas budowy prototypu oraz firmie Hanplast sp. z o.o. za konstruktywne dyskusje, przekazanie próbek wadliwych elementów i szczegółowe prezentacje linii produkcyjnych.

Bibliografia

1. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L., *Speeded-Up Robust Features (SURF)*, "Computer Vision and Image Understanding", Vol. 110, No. 3, 2008, 346–359, DOI: 10.1016/j.cviu.2007.09.014.

2. Canny J., *A Computational Approach To Edge Detection*, "IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence", Vol. PAMI-8, No. 6, 1986, 679–698, DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
3. Chen Y., Ding Y., Zhao F., Zhang E., Wu Z., Shao L., *Surface defect detection methods for industrial products: A review*, "Applied Sciences", Vol. 11, No. 16, 2021, DOI: 10.3390/app11167657.
4. Iandola F.N., Moskewicz M.W., Ashraf K., Han S., Dally W.J., Keutzer K., *SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and <1MB model size*, ICLR, (2017).
5. Li B., Wang J., Gao Z., Gao N., *Light Source Layout Optimization Strategy Based on Improved Artificial Bee Colony Algorithm*, "Mathematical Problems in Engineering", 2021, DOI: 10.1155/2021/8099757.
6. Liu L., Wang H., Yu B., Xu Y., Shen J., *Improved algorithm of light scattering by a coated sphere*, "China Particology", Vol. 5, No. 3, 2007, 230–236, DOI: 10.1016/j.cpart.2007.03.003.
7. Lowe D.G., *Object recognition from local scale-invariant features*, International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Corfu, 1999, DOI: 10.1109/ICCV.1999.790410.
8. Luo Q., Fang X., Su J., Zhou J., Zhou B., Yang C., Liu L., Gui W., Tian L., *Automated Visual Defect Classification for Flat Steel Surface: A Survey*, "IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement", Vol. 69, No. 12, 2020, 9329–9349, DOI: 10.1109/TIM.2020.3030167.
9. Ren Z., Fang F., Yan N., Wu Y., *State of the Art in Defect Detection Based on Machine Vision*, "International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology", Vol. 9, 2021, 661–691, DOI: 10.1007/s40684-021-00343-6.
10. Rotter P., Klemiato M., Knapik D., Rosół M., Putynkowski G., *Modułowy system wieloaspektowej optycznej kontroli jakości elementów polimerowych*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, Nr 4, 2024, 97–102, DOI: 10.14313/PAR_254/97.

Computer Vision System for the Detection of Inclusions in Plastic Components with the Use of 3D Models

Abstract: The article presents the concept of a system for the detection of inclusions, which are defects appearing as local discolorations on the surface of plastic components manufactured using high-pressure injection molding. This system is a part of a broader optical quality control system for polymer components, which also includes geometric inspection. Inclusions can be effectively detected as areas of non-uniform brightness. However, as the first step the object edges must be excluded from the analyzed image. The edge image is determined based on CAD models of the manufactured components, and the proposed reference pair method ensures precise alignment of the edge mask with the image of the inspected product. The algorithm was implemented in the prototype of a modular quality control system. After appropriate parameter tuning, all inclusions in the test dataset were successfully detected, with the false alarm rate maintained at a level acceptable for industrial applications.

Keywords: optical quality control, injection molded parts, inclusion detection, 3D scanning, laser profilometer

dr hab. inż. Paweł Rotter, prof. AGH

rotter@agh.edu.pl

ORCID: 0000-0002-1556-6539

Zatrudniony na stanowisku profesora uczelni na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, w Katedrze Automatyki i Robotyki. W przeszłości pracował w Laboratorium Sztucznej Inteligencji i Analizy Danych Uniwersytetu Arystotelesa w Salonikach, na Politechnice Krakowskiej oraz we Wspólnotowym Centrum Badawczym (JRC) w Sewilli. Jego zainteresowania badawcze obejmują przetwarzanie i analizę obrazu, uczenie maszynowe i sztuczną inteligencję.



dr inż. Maciej Klemiato

mkl@agh.edu.pl

ORCID: 0000-0003-0052-7083

Uzyskał stopień doktora w dyscyplinie Automatyka i Robotyka na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w 2001 r. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Automatyki i Robotyki AGH. Jego zainteresowania badawcze koncentrują się na algorytmach sterowania, uczeniu maszynowym w zastosowaniach przemysłowych i systemach wizyjnych.



dr inż. Grzegorz Putynkowski

grzegorz.putynkowski@cbtrp.pl

ORCID: 0000-0003-0261-6194

Uzyskał tytuł magistra w zakresie systemów teleinformatycznych oraz elektroenergetyki przemysłowej na Uniwersytecie Technologiczno-Humanistycznym w Radomiu i Uniwersytecie Technologiczno-Rolniczym w Bydgoszczy. Doktorant w Instytucie Mechatroniki i Systemów Informatycznych Politechniki Łódzkiej. Autor i współautor licznych publikacji z zakresu rynku energii, odnawialnych źródeł energii i nanostruktur. Posiada kilkunastoletnie doświadczenie w zarządzaniu projektami badawczo-rozwojowymi w Polsce i za granicą oraz komercjalizacji wyników badań.



dr inż. Maciej Rosół

mr@agh.edu.pl

ORCID: 0000-0003-1176-7904

Pracuje jako adiunkt na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Jego obszary badawcze obejmują modelowanie i sterowanie nieliniowymi procesami dynamicznymi w czasie rzeczywistym; opracowywanie algorytmów sterowania w oparciu o model procesu; uczenie maszynowe, projektowanie systemów wbudowanych w aplikacjach pomiarowych/sterujących oraz sterowanie rozproszone z wykorzystaniem przemysłowych sieci Ethernet.



dr inż. Dawid Knapik

knapik@agh.edu.pl

ORCID: 0000-0002-3029-886X

Uzyskał stopień doktora w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne w 2024 r. Obecnie pracuje w Katedrze Automatyki i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej. Jego główne zainteresowania badawcze obejmują sterowania zdecentralizowane, sterowanie w czasie rzeczywistym oraz systemy wbudowane.

