

# System decyzyjny do segregacji elementów wyciętych laserowo

Bartłomiej Szalwach, Maciej Mróz, Rafał Szygenda, Marta Drażkowska

Politechnika Poznańska, Instytut Automatyki i Robotyki, Piotrowo 3a, 61-138 Poznań

**Streszczenie:** W pracy omówiono projekt i weryfikację działania systemu decyzyjnego przeznaczonego do automatycznej segregacji elementów metalowych wyciętych za pomocą technologii laserowej. Wycinanie laserowe jest jedną z najbardziej precyzyjnych metod obróbki metalu, jednak etap ręcznego wyciągania i segregacji elementów ogranicza efektywność całego procesu. Zaproponowane rozwiązanie integruje manipulator KUKA KR 6 R900 sixx z chwytakiem podciśnieniowym oraz systemem wizyjnym, pozwalając na automatyzację transportu i klasyfikacji elementów. Istotnym elementem systemu jest algorytm decyzyjny, który na podstawie danych z kodu G-code określa punkty przyłożenia przyssawki, uwzględniając masę i wymiary elementów. W badaniach uwzględniono różnorodność materiałów i kształtów, takich jak stal konstrukcyjna i aluminium o różnych grubościach. Wyniki symulacji i eksperymentów potwierdziły skuteczność zaproponowanego rozwiązania przenoszenia i przydziału detali do miejsc składowania. Praca stanowi propozycję nowoczesnego systemu automatyzacji, który może znaleźć zastosowanie w przemyśle metalowym. Przedstawione rozwiązanie jest prototypem opracowanym w skali pomniejszonej, co pozwoliło zweryfikować działanie systemu wraz ze spełnieniem założeń.

**Słowa kluczowe:** system decyzyjny, automatyzacja procesu, wycinanie laserowe, segregacja elementów, manipulator KUKA, chwytak podciśnieniowy, przetwarzanie obrazu, kod G-code

## 1. Wprowadzenie

Współczesne systemy automatyzacji w przemyśle metalowym coraz częściej wykorzystują cięcie laserowe do szybkiego i precyzyjnego wycinania elementów z blachy. Jednak procesy postproducyjne, takie jak odbiór, segregacja i kontrola jakości, nadal stanowią wyzwanie. Kluczowym problemem jest opracowanie systemu, który automatycznie określi punkt pobrania przez chwytak, oceni jakość cięcia oraz sklasyfikuje elementy według kształtu.

W literaturze odnotowuje się szereg podejść do automatyzacji procesu pobierania elementów wyciętych laserowo. Metody planowania chwytu można ogólnie podzielić na jednoetapowe i dwuetapowe.

Metody dwuetapowe najpierw przeprowadzają segmentację obiektu i estymację jego pozycji, a następnie wyszukują punkty chwytu na docelowym obiekcie. Segmentacja może być realizowana za pomocą klasycznego dopasowywania szablonów w oparciu o zaprojektowane deskryptory (np. SIFT [10, 15]) lub z wykorzystaniem głębokich konwolucyjnych sieci neuronowych

(np. Mask R-CNN [6], YOLO [13] czy SegNet [2]). Na podstawie wyodrębnionych punktów możliwa jest estymacja pozycji obiektu za pomocą rejestracji chmur punktów, polegającej na znalezieniu transformacji przestrzennej dopasowującej do siebie dwie chmury [5].

W przeciwieństwie do metod dwuetapowych, metoda jednoetapowa, bezpośrednio przewiduje punkty pobrania elementu bez konieczności segmentacji obiektu czy estymacji jego pozycji. Podejście to jest preferowane w środowisku magazynowym ze względu na szybszą realizację niż metody dwuetapowe i jest najlepiej dostosowane do zastosowań czasu rzeczywistego [3].

Sergey Levine i współautorzy [9] byli jednymi z pierwszych, którzy zastosowali model spłotowej sieci neuronowej do bezpośredniego przewidywania prawdopodobieństwa powodzenia dla danego polecenia ruchu, w kontekście planowania chwytu na podstawie danych wizyjnych. Warto również wspomnieć o metodach wykorzystujących sieci neuronowe [1, 8, 12], które głównie polegają na generowaniu map afordancji (ang. *affordance map*), uwzględniających jakość chwytu zdefiniowaną dla każdego piksela obrazu.

Kolejnym istotnym aspektem procesu jest analiza jakości wyciętego elementu. Błędy technologiczne, takie jak niedocięcia, złe rozmieszczenie otworów lub deformacje materiału, mogą znacząco wpłynąć na możliwość dalszego przetwarzania elementu. W podejściu wykorzystującym systemy wizyjne, ocena jakości opiera się na analizie obrazów 2D lub danych trójwymiarowych, pozyskiwanych za pomocą kamer lub skanerów wizyjnych. W literaturze można znaleźć następujące aspekty tej oceny: analizę kształtu, detekcję defektów krawędzi, pomiary wymiarowe i ocenę kompletności wycięcia [14].

### Autor korespondujący:

Marta Drażkowska, marta.drazkowska@put.poznan.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 04.06.2025 r., przyjęty do druku 26.04.2026 r.



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

Pierwszym etapem oceny jakości wycięcia elementu jest jego segmentacja na obrazie z czujnika. Analiza kształtu opiera się na porównaniu otrzymanego kształtu wyciętego elementu z kształtem referencyjnym, zdefiniowanym na podstawie modelu CAD lub wzorca geometrycznego. W tym celu stosuje się m.in. metody oparte na punktach charakterystycznych, metody oparte na krzywych na płaszczyźnie [16], metody oparte na porównaniu konturów [4], a w przypadku bardziej złożonych kształtów – przez porównanie binarnej maski rzeczywistego obiektu z maską referencyjną [17].

System wizyjny może wykrywać lokalne uszkodzenia krawędzi, takie jak zadziorności, przetopienia czy przerwania ciągłości cięcia. W tym celu opisuje się nieregularny kontur za pomocą cech geometrycznych, takich jak długość, średnica czy odległość [4]. W ten sposób kontur może zostać odwzorowany w jednowymiarowej przestrzeni cech, co umożliwi wykorzystanie analizy gradientu lub lokalnych wzorców binarnych [11] do wykrywania defektów konturu.

Na rynku istnieją gotowe systemy, np. SortFLEX [A2], które automatyzują odbiór i segregację elementów. Niemniej jednak, większość z dostępnych na rynku rozwiązań charakteryzuje się wysokim kosztem wdrożenia i ograniczoną funkcjonalnością dotyczącą kontroli jakości wyciętych detali.

W odpowiedzi na te wyzwania, określono hipotezę badawczą, zgodnie z którą zastosowanie analizy obrazu w połączeniu z interpretacją G-code pozwala na skuteczną klasyfikację i ocenę jakości elementów wyciętych laserowo przez porównanie rzeczywistych elementów z ich wzorcami projektowymi. Problem ten jest istotny z punktu widzenia praktyki przemysłowej, gdyż pozwala na ograniczenie udziału operatora w procesie kontroli jakości oraz zwiększenie efektywności i niezawodności systemów zaautomatyzowanych. Szczegółowy opis działania kompleksowego systemu decyzyjnego do automatycznej segregacji zawarto w kolejnym rozdziale.

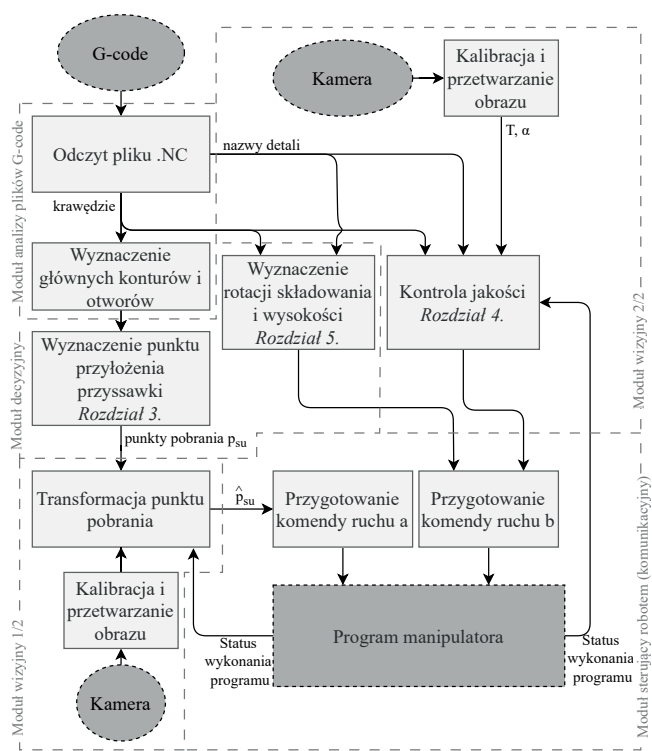
## 2. Przyjęta metodyka

Przedstawienie koncepcji i schematu działania zaproponowanego systemu decyzyjnego wymaga określenia kluczowych założeń projektowych. Przyjęto, że masa pojedynczego detalu nie przekracza 1200 g, a jego minimalny format to 40 mm × 40 mm – zgodnie z ograniczeniami manipulatora i chwytaka podciśnieniowego. Dane wejściowe obejmują pliki G-code (z informacjami o ścieżkach cięcia, grubości i rodzaju blachy) oraz sygnały z systemu wizyjnego.

Architektura systemu obejmuje moduł analizy plików G-code, moduł wizyjny, moduł decyzyjny oraz moduł sterujący robotem (komunikacyjny). Schemat koncepcyjny działania systemu zamieszczono na rys. 1. Moduł analizy G-code umożliwia wczytanie pliku z rozszerzeniem .NC, wyodrębnienie ścieżek cięcia i rozpoznanie nazw, które pozwolą na segregację detali według kategorii. Dane o rzeczywistej pozycji arkusza na stanowisku dostarcza moduł wizyjny. Umożliwia on korektę pozycji i orientacji detali względem początku układu współrzędnych manipulatora. Następnie moduł decyzyjny wyznacza punkt pobrania  $p_{su}$  na podstawie geometrii elementu i z uwzględnieniem ograniczeń masy oraz wymiarów. Moduł sterowania robotem odpowiedzialny jest za komunikację oraz wysyłanie komend (flag) ruchu oraz oczekiwanie na informację zwrotną o zakończeniu operacji podnoszenia oraz odkładania detalu.

System pracuje w trybie cyklicznym, analizując kolejno każdy detal. Po zakończeniu obsługi jednego elementu proces powtarza się dla następnego, aż do wyczerpania wszystkich detali w arkuszu.

System decyzyjny zaimplementowano w języku Python na komputerze PC. W części wizyjnej wykorzystano bibliotekę OpenCV oraz zestaw autorskich funkcji do przetwarzania



Rys. 1. Schemat koncepcyjny projektu

Fig. 1. Conceptual diagram of the project

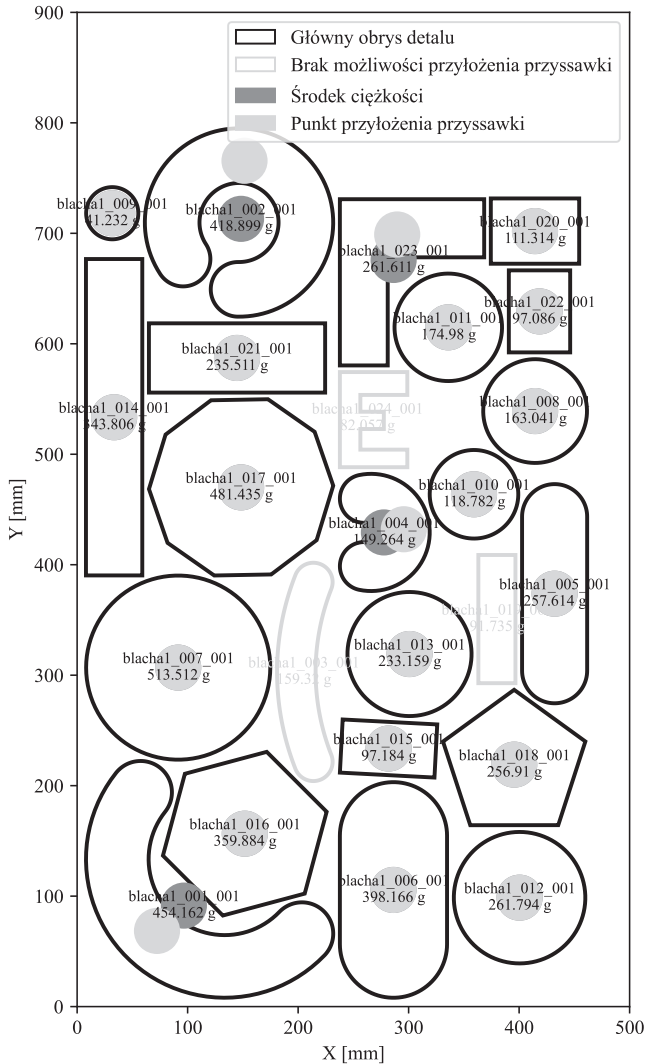
obrazu i analizy geometrii detalu (m.in. wyznaczenie centroidów i pól konturów, separację konturu głównego i otworów, estymację masy na podstawie powierzchni i grubości materiału). Moduł komunikacyjny korzysta z biblioteki socket do zestawienia połączenia TCP/IP ze sterownikiem KUKA KR C4. Wymiana danych realizowana jest pakietem KUKA EthernetKRL, konfigurowanym plikami EKI. Po stronie robota przygotowano procedury w KRL wywołujące funkcje EKI\_Open() oraz EKI\_Send(). System wizyjny zrealizowano przy użyciu kamer podłączonych do PC za pomocą USB.

## 3. Wyznaczenie punktu pobrania

Precyzyjne wyznaczenie punktu pobrania elementu jest kluczowe dla bezpiecznego chwytu i płynności transportu detali. Odpowiedni wybór miejsca przyłożenia chwytaka podciśnieniowego minimalizuje ryzyko przechyłów podczas przenoszenia. Opisywana metoda wykorzystuje algorytmy określające optymalny punkt pobrania na podstawie danych z G-kodu, zawierającego informacje o ruchach głowicy podczas cięcia laserowego, oraz danych z systemu wizyjnego.

G-kod stanowi standardowy język sterowania numerycznego maszyn CNC, w którym poszczególne instrukcje definiują trajektorie ruchu narzędzia oraz operacje technologiczne. Komendy G01, G02 oraz G03 [A1], odpowiedzialne są za ruch prostoliniowy i interpolację łukową głowicy wycinarki laserowej, natomiast M10 oraz M11 kolejno włączenie oraz wyłączenie wiązki lasera. Dzięki temu możliwe jest odwzorowanie geometrii wycinanego elementu na podstawie danych sterujących, bez konieczności odwoływania się do plików CAD.

Wynikiem analizy G-kodu jest zestaw punktów tworzących główny kontur elementu oraz otworów, jeśli takie występują (oznaczony jako krawędzie na rys. 1). System dokonuje również estymacji masy detalu, uwzględniając grubość blachy i gęstość materiału. Pozwala to wstępnie wykluczyć elementy, których masa przekracza założony limit. Wynik procesu odczytu i wstępnego przygotowania danych z kodu G (wraz z estymacją mas detali) został zilustrowany na rys. 2.



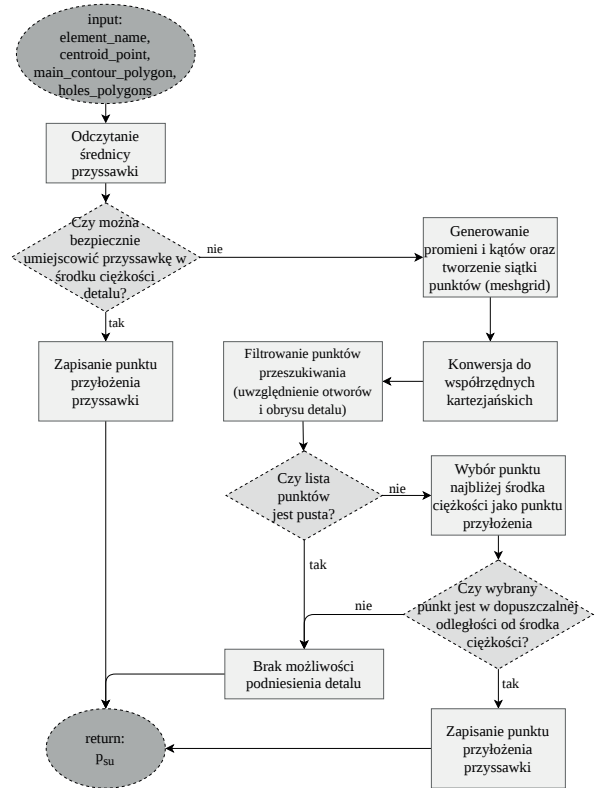
Rys. 2. Przykład odczytu G-code oraz obliczania masy detali  
Fig. 2. Example of G-code parsing and part-mass calculation

Następnym krokiem jest wyznaczenie środka ciężkości każdego detalu. Algorytm na podstawie zbioru punktów opisujących kontury wyciętego detalu (główny kształt wraz z otworami) oblicza powierzchnię całkowitą na podstawie różnicy pola konturu i pól otworów. Detale są definiowane jako obiekty typu wielokąt. Następnie wyznaczany jest geometryczny środek ciężkości rozpatrywanego detalu oznaczony jako  $(x_c, y_c)$ . Jeśli obliczony punkt znajduje się w obszarze otworu bądź poza głównym obrysem, algorytm dokonuje korekty, poszukując najbliższego bezpiecznego punktu pobrania przez wygenerowanie siatki kandydatów w układzie biegunowym wokół środka ciężkości. W tym celu definiuje się maksymalny promień przeszukiwania  $R$ , a następnie dzieli się go na  $k$  dyskretnych wartości  $(r_1, r_2, \dots, r_k)$ . Dodatkowo zakres kątów od 0 do  $2\pi$  przyjmuje  $n$  równych podziałów  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ . Każdy punkt  $(r_i, \theta_j)$  przekształca się na współrzędne kartezjańskie względem środka  $(x_c, y_c)$ , korzystając z przekształceń:

$$x = x_c + r_i \cos(\theta_j), \quad y = y_c + r_i \sin(\theta_j), \quad (1)$$

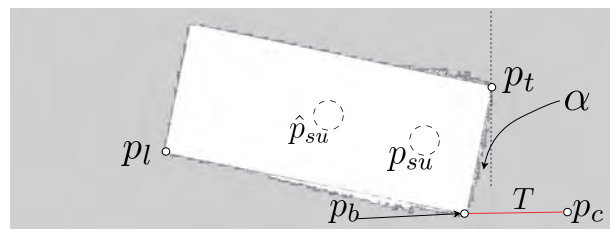
dla  $i = 1, \dots, k$  oraz  $j = 1, \dots, n$ .

Uzyskany zbiór kandydatów poddaje się weryfikacji, odrzucając pozycje, w których okrąg o promieniu przyssawki nachodzi na otwór lub wykracza poza główny obrys. Z zestawu punktów spełniających kryteria wybiera się ostatecznie współrzędne  $p_{su}$ , które opisują kandydata znajdującego się najbliżej środka ciężkości, zgodnie z algorytmem z rys. 3. Przykładowe wyznaczone punkty  $p_{su}$  wraz ze środkami ciężkości detali, przedstawiono na rys. 2.



Rys. 3. Schemat blokowy przedstawiający algorytm wyboru punktu przyłożenia przyssawki  
Fig. 3. Block diagram illustrating the algorithm for selecting the suction-cup application point

Zbiór punktów przyłożeń  $p_{su}$  opisany jest w układzie współrzędnych blachy, bez uwzględnienia jej ewentualnego przesunięcia na stole roboczym. W celu zapewnienia prawidłowej współpracy z manipulatorem, zastosowano system wizyjny monitorujący położenie blachy. Przyjmując jej prostokątny kształt, wyznaczane są wierzchołki konturu:  $p_t$ ,  $p_b$ ,  $p_l$  – odpowiednio górny prawy, dolny prawy i dolny lewy róg. Na tej podstawie obliczane są translacja  $T$  i rotacja  $\alpha$  układu współrzędnych blachy względem układu manipulatora (rys. 4).



Rys. 4. Przykładowy przetworzony obraz blachy w przestrzeni roboczej

Fig. 4. Example of processed sheet metal image in workspace

Następnie punkty  $p_{su}$  zostają przekształcone na  $\hat{p}_{su}$  zgodnie z równaniem 2.

$$\hat{p}_{su} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot p_{su} + T. \quad (2)$$

Ostatecznie każdy detal na arkuszu blachy ma przypisany odpowiadający mu punkt pobrania  $\hat{p}_{su}$ , zgodnie ze schematem z rys. 1.

## 4. Kontrola jakości

Każdy element po pobraniu przez manipulator trafia na osobny stół kontroli jakości opartej na systemie wizyjnym. Celem jest wykrycie błędnego kształtu, źle ulokowanych otworów oraz niedokładności konturów.

Algorytm kontroli jakości składa się z dwóch etapów: analizy kształtu i konturu. W pierwszym etapie porównuje się idealny kształt  $I_{gc}$  (na podstawie G-code) z rzeczywistym kształtem  $I_{obj}$  (z kamery). Na tej podstawie obliczany jest współczynnik kształtu  $S_e$ :

$$S_e = (1 - Q(I_{gc}, I_{obj})) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

gdzie  $Q(I_{gc}, I_{obj})$  jest sumą różnic momentów obrazów obliczaną zgodnie ze wzorem:

$$Q(A, B) = \sum_{i=1..7} \left| \frac{1}{m_{A_i}} - \frac{1}{m_{B_i}} \right|, \quad (4)$$

gdzie  $m_{A_i} = \text{sign}(h_{A_i}) \cdot \log(h_{A_i})$  jest przeskalowanym  $i$ -tym momentem  $h_{A_i}$  obrazu  $A$  [7], a  $m_{B_i}$  obrazu  $B$ . Metodę tę zastosowano ze względu na niskie zapotrzebowanie obliczeniowe  $O(1)$ , które pozwoli szybko odrzucić elementy o dużym odkształceniu względem oryginału.

W drugim etapie analizowany jest kontur detalu. Obraz  $I_{obj}$  zostaje obrócony, by dopasować go do  $I_{gc}$ , a następnie wyodrębniane są punkty konturu  $P_e$ . Na podstawie G-code generowane są prymitywy (linie i okręgi), a punkty  $P_e$  są z nimi porównywane. Kolejno wyznaczana jest  $\rho$  oznaczająca liczbę punktów konturu, dla których różnica pozycji od wzorca jest większa niż 1 px. Wartość progowa 1 px wynika z dyskretyzacji rzeczywistych punktów obrysu zgodnie z rozdzielczością zdjęcia. Ostatecznie obliczana jest miara dokładności  $A_e$ :

$$A_e = \frac{\rho}{m} \cdot 100 \%, \quad (5)$$











gdzie  $m$  jest liczbą punktów konturu  $P_e$ .

Tak zaprojektowany system kontroli jakości poddano testom symulacyjnym, których wyniki przedstawiono w Tabeli 1. Testy te wykonano na wygenerowanych zdjęciach elementów wzorcowych pochodzących z G-code, porównując je do tych samych zdjęć z naniesionym błędem wycięcia. Dodatkowo, dla każdego z elementów obliczono pierwiastek z błędu średniokwadratowego

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \rho_i^2}.$$

Tabela 1. Przykładowe wyniki symulacyjne systemu kontroli jakości

Table 1. Example simulation results of a quality control system

Wzorzec	Element z defektem	$S$	$A_e$	$RMSE$
		100 %	100 %	0,342
		97,4 %	93,26 %	5,87
		100 %	97,86 %	10,91
		99 %	64,66 %	7,849
		100 %	99,26 %	0,422

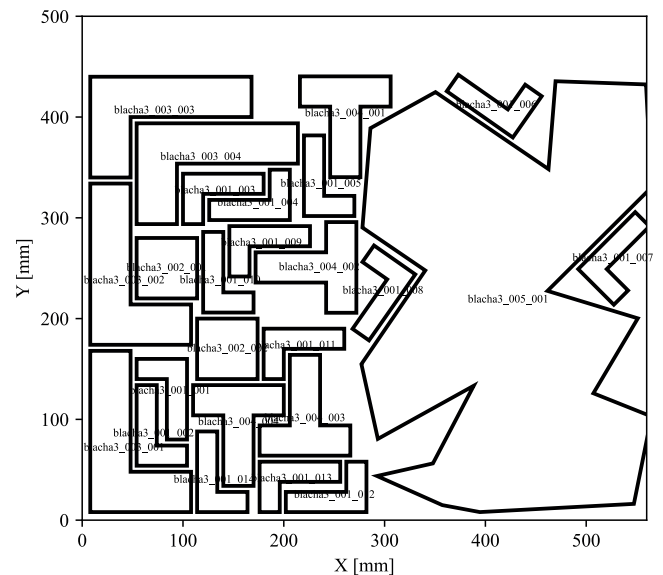
Można zauważyć, iż dla pierwszego elementu, który został poprawnie wycięty, kontrola jakości zwróciła wynik  $S_e = 100\%$ ,  $A_e = 100\%$ . Przykładowe błędnie wycięte elementy pokazują różne przypadki niezgodności. W trzecim przykładzie, mimo dodatkowego otworu, analiza kształtu dała  $S_e = 100\%$ , lecz analiza konturu wykazała obniżoną wartość  $A_e = 97,86\%$ . Wynika to z faktu, że porównanie kształtu uwzględnia jedynie główny obrys, pomijając detale wewnętrzne, co uzasadnia zastosowanie dwuetapowej kontroli.

Ostatecznie moduł kontroli jakości zwraca wartość binarną  $c_e = 1$  dla elementów wyciętych poprawnie ( $S_e > 99\%$  oraz  $A_e > 99,5\%$ ) oraz  $c_e = 0$  dla pozostałych. Wartość  $c_e$  wpływa na wybór punktu odkładania elementu (rys. 1).

## 5. Wyznaczenie rotacji składowania i wysokości

Elementy, które zostały sklasyfikowane jako poprawnie wycięte, zostają odłożone na miejsce składowania, przy założeniu, że wszystkie elementy o jednakowym kształcie będą odkładane jeden na drugim, z uwzględnieniem nakładania orientacji elementu. Zaproponowany algorytm wykorzystuje rozszerzenie oryginalnej nazwy detalu o numer powtórzenia, zgodnie ze schematem nazwa\_elementu\_numer\_powtorzenia. Dzięki

tej konwencji kolejne wystąpienia detalu o tych samych wymiarach i właściwościach otrzymują unikatowe identyfikatory, co umożliwia ich późniejszą separację i analizę. Przykładowy arkusz blachy wraz z nadanymi nazwami, uwzględniającymi powtórzenia elementów, przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Przykładowy arkusz z elementami w różnych rotacjach  
Fig. 5. Example sheet containing parts at different rotations

Tabela 2. Obróty końcowe elementów z przykładowego arkusza  
Table 2. Final rotations of elements in the sample sheet

Nazwa elementu	Numer powt.	$\beta$ [°]
blacha3_001	_002	180
	_003	270
	_004	90
	_005	180
	_006	125
	_007	225
	_008	35
	_009	270
	_010	180
	_011	270
	_012	90
	_013	270
	_014	180
	blacha3_002	_002
blacha3_003	_002	0
	_003	90
	_004	90
blacha3_004	_002	90
	_003	180
	_004	0

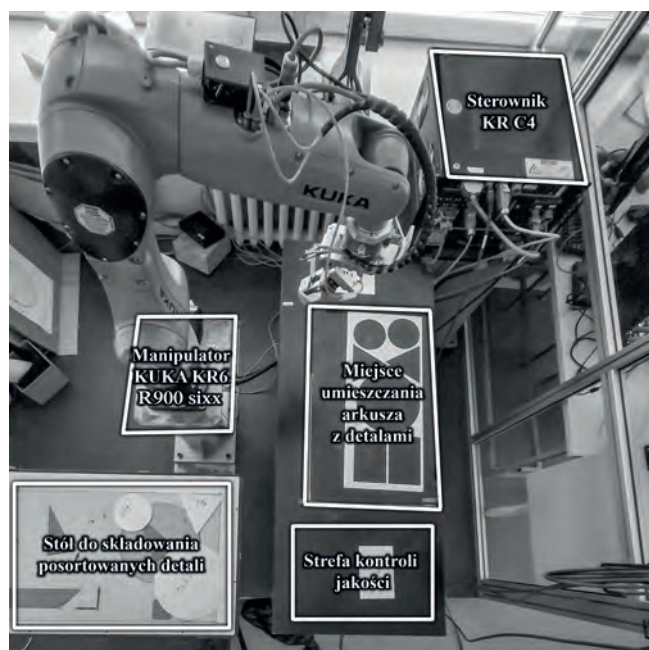
W fazie inicjalizacji tworzona jest lista dostępnych lokalizacji. Dla każdego detalu odczytywana jest jego rozszerzona nazwa, a następnie sprawdzane jest, czy detal o tej samej nazwie bazowej został już przypisany do konkretnego miejsca. Jeśli tak, element trafia do przypisanej lokalizacji; w przeciwnym razie rezerwowane jest kolejne wolne miejsce. Wysokość odkładania jest aktualizowana na podstawie liczby wcześniej zdeponowanych elementów, co zapobiega kolizjom. Dzięki temu detale tej samej klasy trafiają zawsze w to samo miejsce.

Aby zapewnić poprawne ułożenie elementów, w końcowej fazie segregacji, wyznaczana jest ich orientacja. Dla każdej klasy tworzony jest wzorec na podstawie pierwszego detalu, przechowywany w słowniku z nazwą klasy jako kluczem. Kolejne detale tej klasy są obracane iteracyjnie co  $1^\circ$ , aż do uzyskania najlepszego dopasowania. Ostateczny kąt obrotu  $\beta$  (zgodny z ruchem wskazówek zegara) przyjmowany jest jako końcowy. Wyniki testów dla elementów z rys. 5 przedstawiono w tabeli 2; pominięto klasy występujące jednokrotnie. Wszystkie analizowane elementy zostały poprawnie przypisane do właściwego punktu odłożenia, a kąty rotacji zostały wyznaczone zgodnie z rzeczywistym położeniem elementów wzorca. Wyniki te jednoznacznie potwierdzają skuteczność zaproponowanej metody zarówno w przypadku elementów o symetrii, jak i bez niej. Prawidłowe dopasowanie rotacji i położenia można odczytać przez porównanie z detalami oznaczonymi na rys. 5, gdzie przedstawiono przykłady elementów o tym samym kształcie.

Podsumowując, zaproponowany system umożliwia skuteczne przypisywanie i składowanie detali na podstawie unikatowych identyfikatorów oraz dopasowanej orientacji, co zapewnia uporządkowaną segregację i unikanie kolizji w dalszych etapach procesu.

## 6. Integracja systemu

Badania przeprowadzono na stanowisku z manipulatorem KUKA KR 6 R900 sixx, którego zdjęcie przedstawiono na rys. 6. Na pierwszym stole, pełniącym rolę stołu zewnętrznego

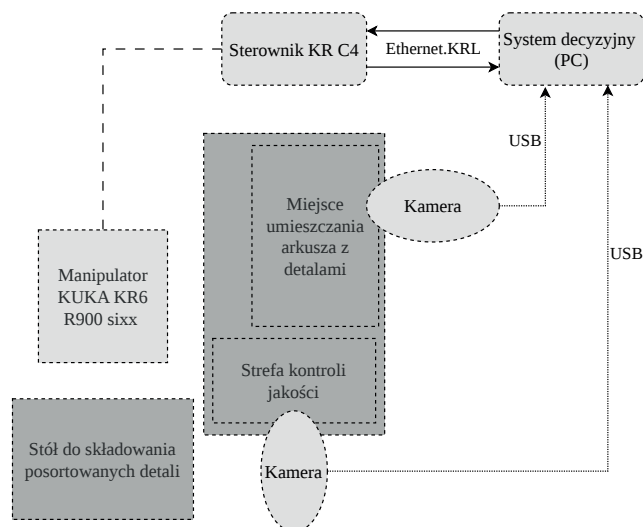


Rys. 6. Zdjęcie przestrzeni roboczej podczas przeprowadzania badań eksperymentalnych

Fig. 6. Photograph of the workspace during experimental testing

wycinarki, znajdowały się arkusze z wyciętymi detalami, natomiast drugi stół służył do segregacji skontrolowanych i posortowanych elementów. Nad stołem z arkuszem zamontowano dwie kamery. Pierwsza odpowiadała za pomiar przesunięcia i rotacji blachy, natomiast druga, umieszczona w wydzielonej strefie kontroli jakości, weryfikowała kształt oraz kontur detali pod względem jakości wykonania.

Za sterowanie robotem odpowiadał kontroler KUKA KR C4, z którym komputer PC komunikował się za pomocą protokołu TCP/IP. Komunikacja realizowana była za pomocą pakietu KUKA.EthernetKRL, umożliwiającego wymianę informacji o współrzędnych punktów pobrania, statusach wykonania oraz potwierdzeniach odbioru danych. Schemat koncepcyjny komunikacji i połączeń systemu został zamieszczony na rys. 7. Elementy chwytano zaprojektowaną konstrukcją chwytaka podciśnieniowego. Przyssawka o średnicy 40 mm umożliwiała bezpieczne podnoszenie detali o masie do 1200 g.



Rys. 7. Schemat komunikacji i połączeń systemu

Fig. 7. System communication and connection diagram

Zaimplementowany system integrował cztery podstawowe moduły:

1. Moduł analizy G-code – odpowiedzialny za odczyt ścieżek cięcia, identyfikację nazw detali i obliczenie punktów pobrania,
2. Moduł wizyjny – realizujący korekcję położenia arkusza względem układu współrzędnych robota,
3. Moduł decyzyjny – łączący dane z analizy G-code i systemu wizyjnego w celu wyznaczenia optymalnych punktów pobrania,
4. Moduł komunikacyjny – odpowiadający za wymianę informacji z kontrolerem robota i synchronizację cyklu pracy.

Dane z systemu wizyjnego były przetwarzane w czasie rzeczywistym i przekazywane do jednostki PC, gdzie moduł decyzyjny obliczał punkt pobrania i przesyłał go do kontrolera robota. Odpowiedzi robota w postaci flag statusowych były rejestrowane w buforze odbiorczym i wykorzystywane do synchronizacji kolejnych etapów pracy.

W celu oceny niezawodności komunikacji monitorowano parametry transmisji TCP/IP. Analiza logów potwierdziła brak utraty pakietów i brak zauważalnych opóźnień w wymianie danych między modułem wizyjnym, jednostką PC i sterownikiem robota. Uzyskane wyniki potwierdzają prawidłową integrację systemu oraz stabilność jego działania w warunkach rzeczywistych.

## 7. Eksperymenty

Algorytm sterujący rozpoczynał pracę od wczytania pliku G-code, z którego wydobywał pełne kontury i nazwy detali. Przed wysłaniem pierwszej komendy do robota program filtrował elementy według masy i wymiarów – odrzucając te, które przekraczały dopuszczalną masę lub miały krótszy bok mniejszy niż 40 mm, odpowiadający średnicy przyssawki.

W eksperymentalnym zestawie 52 detali (odpowiadających trzem arkuszom blachy) kryteria te spowodowały eliminację jednej sztuki z powodu nadmiernej masy i siedmiu z powodu niedostatecznego rozmiaru. Dla pozostałych elementów algorytm w układzie biegunowym dobierał punkt przyłożenia przyssawki możliwie najbliższej środka ciężkości, jednocześnie omijając otwory, co gwarantowało bezpieczne uniesienie detalu.

Po umieszczeniu detalu w strefie wizyjnej, kamera wykonywała kontrolę jakości opisaną w rozdziale 4. Jakość oceniano na podstawie zgodności konturu detalu z danymi geometrycznymi pochodzącymi z pliku G-code. System wizyjny nie wykrył błędów w żadnym z testowanych przypadków, co potwierdziło wysoką dokładność procesu wycinania. Podczas testów wykonano 44 cykle pobrania i odkładania, wszystkie zakończone sukcesem. Nie odnotowano żadnych błędów przyssawki ani przerwania sekwencji.

Dodatkowo stwierdzono, że obrót elementów po odłożeniu mieścił się w rozdzielczości pomiarowej systemu wizyjnego, wynoszącej 1°, co potwierdza wysoką precyzję orientacji uzyskaną w procesie manipulacji. Nie wystąpiła również kolizja z wcześniejszymi odłożonymi elementami, zatem można wnioskować o precyzję działania systemu.

Wyniki eksperymentów pokazują, że opracowany system pozwala w pełni zautomatyzować rozładunek arkuszy po cięciu laserowym, przy zachowaniu wysokiej powtarzalności pozycjonowania oraz skutecznej weryfikacji jakości detali. Wszystkie testowane elementy były poprawnie wycięte, dlatego moduł kontroli jakości nie odrzucił żadnego z nich. System decyzyjny, wizja maszynowa i komunikacja sieciowa współpracowały stabilnie, co potwierdza praktyczną użyteczność zaproponowanego rozwiązania w warunkach przemysłowych.

## 8. Podsumowanie

Opracowany system decyzyjny do automatycznej segregacji elementów wycinanych laserowo integruje analizę G-code, kontrolę jakości, proces paletyzacji oraz dedykowany chwytak podciśnieniowy współpracujący z manipulatorem KUKA. Rozwiązanie umożliwia pełną automatyzację procesu, poprawę bezpieczeństwa i jakości produkcji oraz ograniczenie błędów i strat materiałowych. W pracy zweryfikowano skuteczność zaproponowanego podejścia zarówno w zakresie prawidłowej identyfikacji i klasyfikacji detali, jak i w procesie ich bezpiecznego przenoszenia.

System decyzyjny ma budowę modułową, co umożliwia jego implementację w różnych środowiskach produkcyjnych. Główna część algorytmu działa na komputerze PC, który komunikuje się ze sterownikiem robota za pomocą protokołu TCP/IP. Umożliwia to współpracę nie tylko z robotami firmy KUKA, lecz także z manipulatorami innych producentów – po odpowiednim dostosowaniu parametrów transmisji i formatu wymiany danych.

Zaprojektowany system jest również kompatybilny z różnymi systemami wizyjnymi. Kamery podłączone do jednostki PC za pomocą interfejsu USB mogą być łatwo wymieniane. Dzięki zaimplementowanej funkcji automatycznej kalibracji, zmiana kamery wymaga jedynie przeprowadzenia początkowej procedury kalibracyjnej. Takie rozwiązanie pozwala na stosowanie opracowanego systemu nie tylko w procesach segregacji elementów wycinanych laserowo, ale również w innych zadaniach inspekcji i manipulacji detali o zróżnicowanych kształtach i materiałach.

### Finansowanie

Publikacja została sfinansowana z subwencji badawczej (SBAD) przyznanej na Wydziale Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki Politechniki Poznańskiej, nr grantu 0211/SBAD/0125.

### Bibliografia

1. Araki R., Hirakawa T., Yamashita T., Fujiyoshi H., *MT-DSSD: Multi-Task Deconvolutional Single Shot Detector for object detection, segmentation, and grasping detection*, “Advanced Robotics”, Vol. 36, No. 8, 2022, 373–387, DOI: 10.1080/01691864.2022.2043183.
2. Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R., *SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation*, “IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence”, Vol. 39, No. 12, 2017, 2481–2495, DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2644615.
3. Caldera S., Rassau A., Chai D., *Review of Deep Learning Methods in Robotic Grasp Detection*, “Multimodal Technologies and Interaction”, Vol. 2, No. 3, 2018, DOI: 10.3390/mti2030057.
4. Chen H., Cui Y., Qiu R., Chen P., Liu W., Liu K., *Image-Alignment Based Matching for Irregular Contour Defects Detection*, “IEEE Access”, Vol. 6, 2018, 68749–68759, DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2879861.
5. Dong Z., Liu S., Zhou T., Cheng H., Zeng L., Yu X., Liu H., *PPR-Net: Point-wise Pose Regression Network for Instance Segmentation and 6D Pose Estimation in Bin-picking Scenarios*, [In:] IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2019, 1773–1780, DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8967895.
6. He K., Gkioxari, G. Dollár P., Girshick R., *Mask R-CNN*, [In:] 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2017, 2980–2988, DOI: 10.1109/ICCV.2017.322.
7. Hu M.-K., *Visual pattern recognition by moment invariants*, “IRE Transactions on Information Theory”, Vol. 8, No. 2, 1962, 179–187, DOI: 10.1109/TIT.1962.1057692.
8. Jiang P., Ishihara Y., Sugiyama N., Oaki J., Tokura S., Sugahara A., Ogawa A., *Depth Image-Based Deep Learning of Grasp Planning for Textureless Planar-Faced Objects in Vision-Guided Robotic Bin-Picking*, “Sensors”, Vol. 20, No. 3, 2020, DOI: 10.3390/s20030706.
9. Levine S., Pastor P., Krizhevsky A., Ibarz J., Quillen D., *Learning hand-eye coordination for robotic grasping with deep learning and large-scale data collection*, “The International Journal of Robotics Research”, Vol. 37, No. 4-5, 2018, 421–436, DOI: 10.1177/0278364917710318.
10. Lowe D., *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*, “International Journal of Computer Vision”, Vol. 60, 2004, 91–110, DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
11. Ojala T., Pietikäinen M., Harwood D., *A Comparative Study of Texture Measures with Classification Based on Feature Distributions*, “Pattern Recognition”, Vol. 29, No. 1, 1996, 51–59, DOI: 10.1016/0031-3203(95)00067-4.
12. Patter S.P., Hirakawa T., Yamashita T., Sawanobori T., Fujiyoshi H., *Single Suction Grasp Detection for Symmetric Objects Using Shallow Networks Trained with Synthetic Data*, “IEICE Transactions on Information”, Vol. E105-D, No. 9, 2022, 1600–1609, DOI: 10.1587/transinf.2022EDK0001.
13. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A., *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*, [In:] IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016, 779–788, DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
14. 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, 2022, 661–691, DOI: 10.1007/s40684-021-00343-6.
15. Suga A., Fukuda K., Takiguchi T., Ariki Y., *Object recognition and segmentation using SIFT and Graph Cuts*, [In:] 19th International Conference on Pattern Recognition, 2008, DOI: 10.1109/ICPR.2008.4761400.
16. Turaga P., Chellappa R., Srivastava A., *Chapter 7 – Statistical Methods on Special Manifolds for Image and Video Understanding*, “Handbook of Statistics”, Vol. 31 2013, 178–201, DOI: 10.1016/B978-0-444-53859-8.00007-2.
17. Wu Y., Ma W., Gong M., Su L., Jiao L., *A Novel Point-Matching Algorithm Based on Fast Sample Consensus for Image Registration*, “IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters”, Vol. 12, No. 1, 2015, 43–47, DOI: 10.1109/LGRS.2014.2325970.

### Inne źródła

- A1. I. O. for Standardization, *ISO 6983*, [www.iso.org/standard/34608.html#lifecycle], 2009.
- A2. Remmert GmbH, SortFLEX - W pełni automatyczne sortowanie i paletyzacja części wycinanych laserowo, [www.remmert.pl/produkty/automatyzacja/robotyka-pick-place/sortflex].

# Decision System for Automatic Sorting of Laser-cut Elements

**Abstract:** The objective of this study is to design and verify a decision system intended for the automatic sorting of metal components cut using laser technology. Laser cutting is one of the most precise methods of metal processing; however, the manual extraction and sorting of cut components limit the overall efficiency of the process. The proposed system integrates a KUKA KR 6 R900 sixx robotic manipulator equipped with a vacuum gripper and a vision system, enabling automation of the transportation and classification of parts. A key component of the system is a decision algorithm that, based on G-code data, determines the suction cup attachment points while taking into account the mass and dimensions of the components. The study considers a variety of materials and shapes, such as structural steel and aluminum of different thicknesses. Simulation and experimental results confirmed the effectiveness of the proposed solution in transferring and assigning components to storage locations. This work presents a proposal for a modern automation system that can be applied in the metalworking industry. The presented solution is a prototype developed on a reduced scale, which allowed for verification of system performance while meeting the design assumptions.

**Keywords:** decision algorithm, process automation, laser cutting, part sorting, KUKA manipulator, vacuum gripper, image analysis, G-code

## inż. Bartłomiej Szalwach

bszalwach@interia.pl

ORCID: 0009-0005-5435-6699

Absolwent kierunku Automatyka i Robotyka Politechniki Poznańskiej oraz student studiów magisterskich (specjalność Systemy Wizyjne). Zawodowo związany z automatyką przemysłową, programowaniem PLC oraz przetwarzaniem danych (Python). Obecnie pracuje w Hitachi Rail GTS Polska, gdzie zajmuje się automatyzacją procesów i przygotowaniem danych aplikacji kolejowych.



## inż. Maciej Mróz

maciej\_mroz@outlook.com

ORCID: 0009-0002-5608-8817

Absolwent studiów inżynierskich na kierunku Automatyka i Robotyka na Politechnice Poznańskiej, aktualnie student studiów magisterskich (Automatyka i Robotyka, specjalność Systemy Wizyjne). Ma doświadczenie w automatyce przemysłowej oraz w sektorze energetycznym, gdzie zajmował się przetwarzaniem danych oraz wykonywaniem pomiarów i opracowywaniem raportów odnośnie wpływu urządzeń energetycznych na sieć dystrybucyjną.



## inż. Rafał Szygenda

kszygenda12@gmail.com

ORCID: 0009-0008-3627-9580

Absolwent studiów inżynierskich na kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki. W trakcie specjalizacji Internet Przedmiotów na Wydziale Informatyki i Telekomunikacji. Zawodowo inżynier oprogramowania rozwiązań internetowych.



## dr inż. Marta Drażkowska

marta.drazkowska@put.poznan.pl

ORCID: 0000-0002-9438-9533

Adiunkt w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Poznańskiej. Obszarem zainteresowań naukowych jest zastosowanie sieci neuronowych w zagadnieniach sterowania robotów, w szczególności w obszarach, takich jak percepcja (analiza i przetwarzanie obrazów), modelowanie systemów (np. identyfikacja parametrów), predykcja oraz projektowanie algorytmów sterowania.

