

KIERUNEK: Automatyka i robotyka

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

Tytuł pracy:

Wybór i konfiguracja systemu wizyjnego dla
zadania Bin Picking cobota Doosan

Selection and configuration of the vision
system for the Bin Picking task of Doosan
cobot

AUTOR:

Paweł Łyszczarz

PROMOTOR:

dr inż. Katarzyna Zadarnowska

Spis treści

1	Wstęp	5
2	Zamysł projektu	7
2.1	Szczegółowy opis problemu Bin Picking	7
2.1.1	Zalety rozwiązania problemu Bin Picking	7
2.1.2	Środowisko do testowania rozwiązania problemu Bin Picking	8
2.2	Zestaw urządzeń wykorzystany do konstrukcji układu z systemem wizyjnym Photoneo	9
2.3	Struktura układu z systemem wizyjnym Photoneo	20
3	Konfiguracja parametrów układu z systemem wizyjnym Photoneo	21
3.1	Układ z systemem wizyjnym firmy Photoneo	21
3.1.1	Połączenie sieciowe	22
3.1.2	Dołożenie elementów manipulatora i środowiska roboczego do oprogramowania	23
4	Przeprowadzenie testów na systemie wizyjnym Photoneo	35
4.1	Symulacja	35
4.2	Rzeczywisty proces	36
4.3	Optymalizacja parametrów i ustawień systemu	37
4.4	Wyniki testów	38
5	Układ wykorzystujący alternatywny system wizyjny	41
5.1	Zestaw urządzeń wykorzystany do konstrukcji układu z systemem wizyjnym Robotiq	41
5.2	Struktura układu z systemem wizyjnym Robotiq	46
5.3	Konfiguracja systemu	47
5.4	Realizacja zadania Bin Picking i przeprowadzenie testów	49
6	Analiza porównawcza systemów wizyjnych	53
6.1	Zalety i wady systemu wizyjnego Photoneo	53
6.1.1	Zalety systemu wizyjnego Photoneo	53
6.1.2	Wady systemu wizyjnego Photoneo	54
6.2	Zalety i wady systemu wizyjnego Robotiq	54
6.2.1	Zalety systemu wizyjnego Robotiq	55
6.2.2	Wady systemu wizyjnego Robotiq	55
6.3	Cechy wspólne obu systemów wizyjnych	55
7	Podsumowanie	57

Bibliografia	59
Spis rysunków	62
Spis tabel	63

Rozdział 1

Wstęp

Automatyzacja z wykorzystaniem robotów stanowi kluczowy element ewolucji przemysłu, zdobywając coraz szersze zastosowanie. Roboty przemysłowe są nieodłączną częścią wielu procesów, obejmujących różnorodne zadania, takie jak manipulacja materiałami, obsługa maszyn, spawanie łukowe, spawanie punktowe, cięcie, malowanie czy klejenie. Efektywne wykonywanie tych zadań zależy w dużej mierze od optymalizacji czasu cyklu, co przekłada się na zwiększoną wydajność, lepsze wykorzystanie maszyn oraz zyskowność automatyzacji, zwłaszcza w obszarach, gdzie przepustowość i rentowność mają kluczowe znaczenie [1].

Współczesne postępy w dziedzinie robotyki skupiają się nie tylko na mechanicznych aspektach manipulatorów, lecz również na ich zdolności do interakcji z otoczeniem. Rozwój zaawansowanego czujnikowania stał się niezbędnym krokiem w tej ewolucji. Dostarczanie dodatkowych informacji z otoczenia umożliwia zastosowanie algorytmów decyzyjnych, często korzystających z technologii uczenia maszynowego, co czyni roboty bardziej zaawansowanymi i uniwersalnymi. W kontekście czujników, jednym z kluczowych elementów stają się sensory wizyjne. Elementy te umożliwiają robotowi analizę otoczenia poprzez percepcję wizualną, co pozwala na dynamiczne dostosowywanie się do zmieniających się warunków.

Wybór odpowiednich rodzajów kamer do zastosowania w systemach robotów z czujnikami wizyjnymi jest ściśle związany z konkretnymi wymaganiami danego zadania. W przypadku prostych zadań, gdzie istotne jest jedynie uzyskanie informacji o obecności obiektu w zasięgu kamery, mogą być używane kamery o niższej rozdzielczości, bardziej skoncentrowane na szybkości działania i zasięgu widzenia. Natomiast w przypadku bardziej złożonych zadań, gdzie konieczne jest przeprowadzenie analizy i przetworzenia obrazu w celu detekcji szczegółów czy identyfikacji obiektów, wybór kamer staje się bardziej wyspecjalizowany. Kamery o wyższej rozdzielczości, z zaawansowanymi funkcjami takimi jak detekcja kolorów czy głębokość pola wykonanego zdjęcia, stają się kluczowym elementem w systemach robotycznych. Dzięki temu możliwe jest dokładniejsze rozpoznawanie i reagowanie na różnorodne scenariusze, co wpływa bezpośrednio na zdolności adaptacyjne robota w zróżnicowanym środowisku produkcyjnym.

Celem niniejszej pracy jest dobór odpowiedniego systemu wizyjnego do zadania Bin Picking realizowanego z wykorzystaniem cobota Doosan. W szczególności, należy przeprowadzić proces konfiguracji i kalibracji wybranego systemu wizyjnego z rzeczywistym cobotem. Autor pracy porówna dwa rodzaje systemów wizyjnych: Photoneo i Robotiq oraz dokona identyfikacji optymalnych ustawień, parametrów, procedur, które mają wpływ na efektywność obu systemów w kontekście zadania Bin Picking. Podsumowaniem omówionych działań będzie przeprowadzenie analizy porównawczej obu systemów

oraz wyłonienie pozytywnych i negatywnych aspektów pod względem zastosowania ich w zależności od potrzeb zadania. **Celem dodatkowym projektu będzie opracowanie oraz montaż chwytaka, który skuteczniej będzie spełniał wymagania związane z zadaniem Bin Picking.**

Praca dyplomowa została podzielona na następujące rozdziały. W rozdziale 2 omówiono istotę problemu Bin Picking, jego charakterystyczne cechy, oraz przedstawiono zestaw urządzeń wykorzystywanych do testowania systemu wizyjnego Photoneo. Opisano tu manipulator M1013 firmy Doosan, na którym przeprowadzono testy oraz dwa rodzaje chwytaków: chwytak OnRobot RG6 oraz autorski chwytak wyposażony w elektromagnes. Następnie, w rozdziale 3, skoncentrowano się na procesie konfiguracji układu z systemem wizyjnym Photoneo, szczegółowo przedstawiając jego ustawienia i parametry konfiguracyjne. Rozdział 4 poświęcono opisowi przeprowadzonych testów na skonfigurowanym systemie wizyjnym Photoneo. Kolejny rozdział, 5, poświęcono alternatywnemu systemowi wizyjnemu, systemowi Robotiq, opisując jego konfigurację oraz przeprowadzone testy. Testy omawianego wyżej systemu wizyjnego przeprowadzono przy użyciu manipulatora UR3 firmy Universal Robots. Analizę porównawczą obu systemów wizyjnych przedstawiono w rozdziale 6, gdzie uwzględniono efektywność i precyzję wykonywanego zadania. Rozdział 7 stanowi podsumowanie projektu, prezentuje wnioski, implikacje praktyczne oraz sugestie dotyczące dalszych działań.

Rozdział 2

Zamysł projektu

Projekt zakłada rozwiązanie problemu związanego z pobieraniem losowo rozmieszczonych i zorientowanych elementów z pojemników, płaszczyzn czy chociażby innych elementów tworzących na przykład linię produkcyjną w ramach procesu Bin Picking. Celem projektu było wykorzystanie technologii systemów wizyjnych oraz robota typu cobot marki Doosan w celu optymalnego rozwiązania i wykonania wyżej postawionego zadania.

2.1 Szczegółowy opis problemu Bin Picking

Problem Bin Picking polega na automatycznym pobieraniu zróżnicowanych elementów ze zbiorników czy pojemników. Problem ten obejmuje zazwyczaj następujące kroki: pozyskanie początkowych danych, detekcję obiektów, oszacowanie pozycji, planowanie trasy (wolnej od kolizji), chwytanie i umieszczanie przedmiotów [2]. Bin Picking jest szczególnie istotny w przemyśle magazynowym, produkcyjnym oraz logistycznym, w których to ręczne przemieszczanie elementów przez operatorów jest znacznie bardziej czasochłonne, podatne na błędy, a przy tym kosztowne.

2.1.1 Zalety rozwiązania problemu Bin Picking

Do zalet zaproponowanego rozwiązania zdecydowanie należy zaliczyć następujące aspekty:

- Optymalizacja czasu wykonywania zadania - silnym atutem w tym rozwiązaniu jest fakt że ramię robota, którego pełna prędkość poruszania się sięga nawet kilku metrów na sekundę jest w stanie wykonać tę samą pracę co operator w znacznie krótszym czasie. Zaleta ta polepsza wydajność linii produkcyjnej oraz umożliwia praktyczne pozbycie się opóźnień, co mogłoby się wiązać z dodatkowymi kosztami.
- Precyzja i dokładność - dzięki silnikom o działaniu krokowym znajdującym się w przegubach ramienia cobota Doosan, rozwiązanie to jest w stanie dostarczyć bardzo dużą dokładność przy poborze i odkładaniu elementów, co skutkuje w zwiększeniu bezpieczeństwa poruszania się samego robota oraz jego obsługi, dzięki czemu możliwe jest uniknięcie uszkodzenia chociażby pobieranych części.
- Atut wirtualnej wizji - zastosowanie zaawansowanych systemów i algorytmów wizji komputerowej pomaga w rozpoznawaniu i lokalizowaniu w środowisku roboczym.

Jest to główne źródło informacji wejściowych z zewnątrz dla komputera nadzorującego cały proces. Dzięki temu można obliczyć możliwe ruchy, określić potencjalne zagrożenia kolizji itp.

- Niewrażliwość na zróżnicowanie rozmiarów, kształtów, położenia, orientacji, czy materiału z jakiego wytworzone są pobierane elementy - oprogramowanie takiego rozwiązania umożliwia. Względem wybranych przez klienta parametrów obiektów odbywa się rozpoznawanie i identyfikacja skanowanych przez kamerę elementów znajdujących się w środowisku roboczym. Odpowiednie algorytmy skanowania przestrzeni umożliwiają rozpoznawanie orientacji przedmiotów co jest kluczowe w planowaniu trajektorii podejścia efektora robota do przedmiotu. Cechy te są kluczowymi atutami czyniącymi to rozwiązanie elastycznym i konfigurowalnym.

2.1.2 Środowisko do testowania rozwiązania problemu Bin Picking

Aby odpowiednio przeprowadzić proces Bin Picking należy zadbać o konkretne warunki na miejscu pracy oraz skompletować niezbędne narzędzia:

- Stanowisko na którym odbywają się prace - powinno mieć odpowiednio dopasowane pole robocze. W polu roboczym oprócz symulowania rzeczywistego środowiska produkcyjnego należy zadbać o takie aspekty jak jego rozmiar, po to, by móc pomieścić wszystkie potrzebne elementy układu (pojemnik z częściami do podnoszenia itp.). Dalej, istotne jest zadbanie o stabilną konstrukcję utrzymującą manipulator w miejscu. Wreszcie istotny jest dobór właściwego ramienia robota oraz elementów do jego obsługi, nadzorowania i konfigurowania. Warto również zadbać o to, aby stanowisko, a jednocześnie miejsce pracy było odpowiednio wysokie a sama kamera znajdowała się w najwyższym punkcie tej strefy, aby uniknąć sytuacji w której kamera, z uwagi na zbyt małą odległość od elementów, nie może dokonać ich detekcji.
- Manipulator oraz konstrukcja go utrzymująca - bardzo istotnym kryterium jest trwałość konstrukcja, która nie ulega przemieszczeniom. Jako, że w testowanych systemach wizyjnych na początku definiuje się położenie manipulatora w wirtualnej przestrzeni, po zmianie jego położenia, podczas procesu wykonywania zadania, wskutek nieodpowiedniego montażu lub nietrwałej konstrukcji, podczas gwałtownego ruchu, może dojść do dekalibracji całego układu, który w efekcie będzie niepoprawnie funkcjonować. Sam manipulator powinien być wyposażony w teach-pendant oraz przyciski bezpieczeństwa, które umożliwią zaniechanie działań robota i jego kompletne unieruchomienie w sytuacjach zagrażających zdrowiu użytkowników lub uszkodzeniu układu oraz niemożności bezpiecznego manualnego manewrowania ramieniem.
- Komputer z oprogramowaniem pozwalającym na sterowanie robotem oraz systemem wizyjnym - część ta, będąca mózgiem całej operacji, jest jednym z najbardziej istotnych komponentów. To właśnie ten kontroler jest odpowiedzialny za analizę obrazów przesyłanych przez kamerę, ich przetworzenie za pomocą zaawansowanych algorytmów i odpowiednie przekazywanie komend do sterownika manipulatora.
- Stanowisko operatora/użytkownika - miejsce pracy powinno być wyposażone w przestrzeń w której bezpiecznie poruszać się może programista nadzorujący przebieg całego procesu. Stanowisko powinno zawierać centrum sterowania kontrolerem systemu wizyjnego, oprogramowaniem przetwarzającym dane z kamery jak również

samym manipulatorem, z wcześniej wspomnianymi przyciskami bezpieczeństwa i teach-pendant'em w zasięgu dłoni programisty. Dodatkowo niezbędne jest wyposażenie operatora pozwalające na przeprowadzanie stałej dokumentacji i raportów z przebiegu procesu co pozwala na późniejszą analizę skuteczności wykonanego zadania.

2.2 Zestaw urządzeń wykorzystany do konstrukcji układu z systemem wizyjnym Photoneo

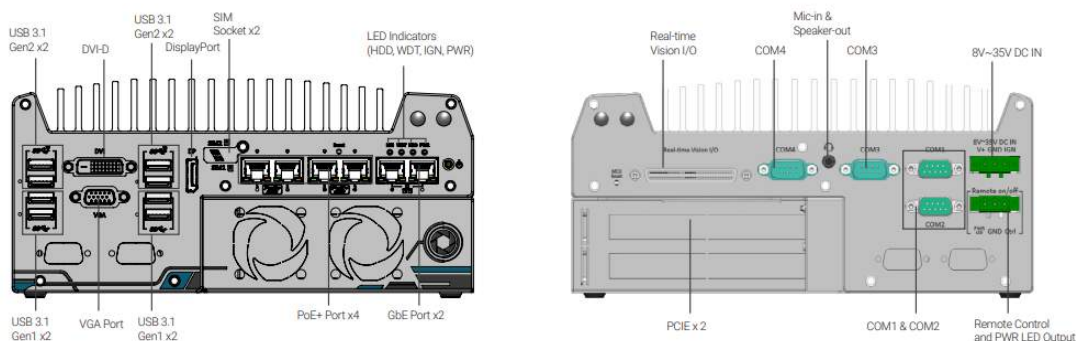
Do testów pierwszego z systemów wizyjnych posłużono się wyposażeniem dostarczanym przez firmę Photoneo. Do parametrów każdego z elementów należą:

1. **Industrial-grade Vision Controller serii Nuvis-7306RT** (patrz rys. 2.1 i 2.2) - zaawansowane urządzenie dedykowane przemysłowym zastosowaniom umożliwiające przetwarzanie i analizę obrazów w środowiskach produkcyjnych i nie tylko.



Rysunek 2.1: Industrial-grade Vision Controller

Seria Nuvis-7306RT to wszechstronny i wydajny kontroler wizyjny, który zawiera wszystkie niezbędne funkcje do zastosowań związanych z wizją maszynową. Dzięki zasilaniu technologią Intel Core i7 dziewiątej generacji, Nuvis-7306RT dostarcza znaczącą moc obliczeniową do przetwarzania danych wizyjnych. Urządzenie to integruje sterownik oświetlenia stałoprądowego, izolowane wyjście wyzwalacza kamery 12 V, wejście enkodera do monitorowania pozycji oraz interfejs DIO do podłączenia czujników i siłowników. Zapewnia kontrolę wejścia/wyjścia w czasie rzeczywistym na poziomie mikrosekund, co gwarantuje wychwytywanie obrazów w określonym czasie lub pozycji. Nuvis-7306RT stanowi kontroler wizyjny dopasowany do potrzeb nowoczesnego przemysłu wizyjnego.



Rysunek 2.2: Nuvis-7306RT

Podstawowe dane techniczne kontrolera:

- Procesor: Intel Core i7-9700E,
- Grafika: Integrated Intel UHD graphics 630,
- Wymiary: 240 x 225 x 11 mm,
- Waga: 3.7 kg.

2. **Zestaw urządzeń do Cobota Doosan serii M** - Roboty współpracujące firmy Doosan dostarczane są z odpowiednim wyposażeniem, mającym za zadanie zapewnienie wysokiej klasy obsługi wszystkich jego komponentów. Każdy element tego cobota jest odpowiednio przygotowany i dostosowany do niezawodnej i efektywnej pracy. Przez to właśnie robot umożliwia zwiększenie produktywności i skrócenie czasu przygotowania urządzenia do pracy.



Rysunek 2.3: Zestaw Cobota Doosan serii M

Oto elementy zestawu Cobota Doosan serii M:

- Manipulator modelu M1013 (rys. 2.4 2.5)



Rysunek 2.4: Doosan M1013

M1013 to innowacyjny robot 6-osiowy, charakteryzujący się dużą czułością na siłę oraz zdolnością wykrywania kolizji. Poprzez zastosowanie 6 czujników momentu obrotowego w przegubach, ramię robota zapewnia wysokie bezpieczeństwo i precyzję pracy. Kompatybilność robota z szeroką gamą narzędzi programistycznych i oprogramowaniami ułatwia dostosowanie do konkretnych zastosowań. Jako, że jest to robot współpracujący, jego obsługa odbywa się z niezwykłą łatwością. W przypadku potrzeby nagłej zmiany ustawienia robota w dowolnym momencie, tak zwany kokpit manipulatora znajdujący się tuż za piątym przegubem (licząc od "dołu" ramienia) umożliwia poruszanie ramieniem manipulatora wzdłuż wybranej osi lub też w dowolnym kierunku względem kilku osi jednocześnie za pomocą siły rąk operatora.



Rysunek 2.5: Doosan M1013 w środowisku rzeczywistym

Rysunek 2.5 pokazuje jak prezentuje się Manipulator Doosan M1013 w środowisku rzeczywistym. Na załączonej fotografii widać, że wzdłuż ramienia robota poprowadzony jest przewód, który odpowiedzialny jest za przesyłanie komunikatów i instrukcji do chwytaka zamontowanego na manipulatorze. Przewód został zamontowany tak, by nie uniemożliwiać czy nie utrudniać ruchu samego ramienia oraz, by nie zasłaniać pola widzenia kamery.

Podstawowe parametry ramienia robota:

- Udźwig: 10 kg (22 lb)
- Zasięg ramienia: 1300 mm (51.1 inch)
- Waga: 33 kg (72.7 lb)
- Maksymalna prędkość efektora: 1 m/s
- Powtarzalność: ± 0.05 mm
- Temperatura pracy: 0 – 45°C
- Zasilanie: DC 24 V / Max. 3 A.

Tabela 2.1 przedstawia fizyczną ruchliwość ramienia.

Numer przegubu	Zasięg [°]	Maksymalna prędkość [°/s]
J1	360	120
J2	360	120
J3	160	180
J4	360	225
J5	360	225
J6	360	225

Tabela 2.1: Tabela ruchliwości przegubów Doosan M1013

Jak widać zasięg i ruchliwość każdego z przegubów różni się, w zależności od tego, gdzie się znajduje i jaką rolę pełni dany przegub. Można zauważyć, że przegub trzeci jest jedynym przegubem o ograniczonym zasięgu obrotu. Producenci zastosowali takie ograniczenie w celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy i uniknięcia potencjalnych kolizji. Poza tym aspekt optymalizacji wydajności i oszczędności energii również ma wpływ na to ograniczenie, które jednak w żaden sposób nie zabiera robotowi możliwości swobodnego poruszania się, głównie z uwagi na nieograniczone zasięgi pozostałych przegubów. Wzrost maksymalnej prędkości każdego z przegubów jest proporcjonalny do ich gabarytów. Maksymalne prędkości przegubów pierwszego i drugiego są najmniejsze, ponieważ te ogniwa podczas swojego ruchu poruszają praktycznie całym manipulatorem, a co za tym idzie też jego masą. Im bliżej efektora tym bardziej widoczny jest wzrost tej prędkości. Ostatnie przeguby, na których ciąży najmniejsza masa potrafią poruszać się ze znacznie większą prędkością.

- Urządzenie sterujące (ang. Control Box) (rys. 2.6) - komputer do sterowania manipulatorem. Urządzenie to obsługuje najnowsze technologie komunikacyjne, takie jak Ethernet, Fieldbus, port szeregowy itp., co umożliwia bezproblemową integrację z urządzeniami peryferyjnymi.



Rysunek 2.6: Urządzenie sterujące manipulatorem

Do podstawowych parametrów komputera należą:

- Wymiary: 490 x 390 x 287 mm
 - Waga: 8 kg
 - Zasilanie: DC 24 V
 - Komunikacja: Port szeregowy, TCP/IP, USB, Ethernet/IP, PROFINET
 - Wejścia/wyjścia: 16 wejść i wyjść cyfrowych oraz 2 wejścia i wyjścia analogowe.
- Tablet do programowania (ang. Teach Panel) (rys. 2.7) - tablet z oprogramowaniem DART pozwalającym na operowanie i programowanie robota. Urządzenie wyposażone jest w intuicyjny interfejs użytkownika, które pozwala na łatwe i szybkie zarządzanie robotem. Tablet oprócz zdalnego programowania pozwala również na programowanie za pomocą kodu w Pythonie jak i również metodą bardziej graficzną, co uważane jest za duży atut.



Rysunek 2.7: Tablet do programowania ??

Podstawowe parametry tabletu to:

- Wymiary: 264 x 218 x 42 mm
- Waga: 0.8 kg.

3. **Skaner PhoXi 3D Gen 2 rozmiar L** (rys. 2.8) - jest to skaner o dużym zasięgu, użyteczny do analizy obiektów. Urządzenie z racji swojej wszechstronności, dokładności i jakości wykonania znajduje szeroki wachlarz zastosowań, jednakże według

firmy, najczęściej kamery te wykorzystywane są na rynku motoryzacyjnym. Sam skaner to urządzenie służące do pomiaru trójwymiarowych struktur obiektów. Jego działanie polega na generowaniu światła strukturalnego wysyłanego w stronę obiektu, od którego emitowane światło się odbija i zostaje zarejestrowane przez kamerę znajdującą się na skanerze. Urządzenie poprzez odpowiednie algorytmy analizuje zmiany w strukturze odbitego światła i oblicza odległości pomiędzy wykrytymi obiektami. Oprogramowanie wytwarza trójwymiarowe odzwierciedlenie zeskanowanej przestrzeni, określając rozmiary, kształty i położenie. Tak przetworzone dane są przesyłane ze skanera do kontrolera, który zgodnie z jego algorytmami postępowania wysyła odpowiednie komendy do komputera odpowiedzialnego za ruch robota, który następnie porusza manipulatorem w odpowiedni sposób.

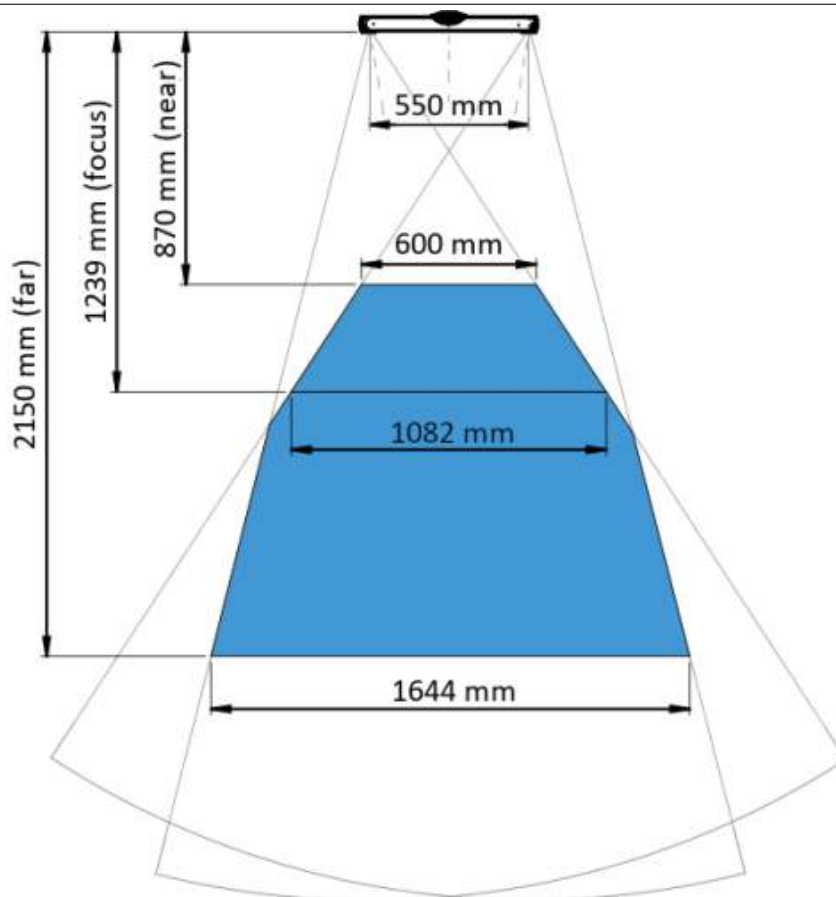


Rysunek 2.8: Skaner PhoXi 3D Gen2 ??

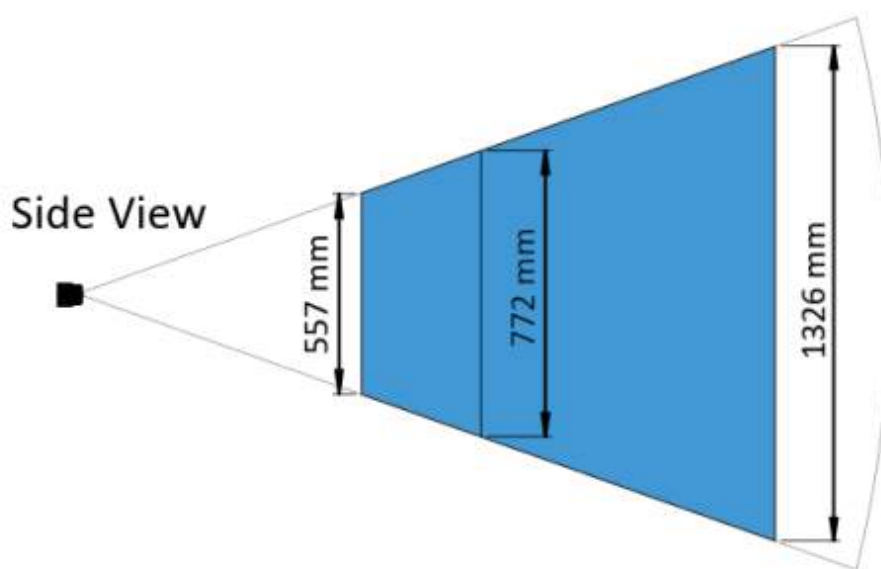
Do jego podstawowych parametrów należą:

- Zasięg skanowania: 870 - 2150 mm
- Optymalna odległość skanowania: 1239 mm
- Rozmiar skanowanego obszaru przy optymalnym dystansie kamery (sweet spot): 1082 x 772 mm
- Dokładność kalibracji: 0.2 mm
- Czas skanowania 250 - 2750 ms
- Wymiary: 77 x 68 x 616 mm
- Waga: 1.1 kg
- Procesor: NVIDIA Pascal™ Architecture GPU z 256 rdzeniami CUDA.
- Zasilanie: PoE (power over Ethernet) lub 24V
- Komunikacja: Ethernet (1Gbit)
- Temperatura pracy: 0 – 40°C.

Podczas samej kalibracji i testów dobierana była rzeczywista, optymalna odległość kamery od skanowanych elementów. Do pomiarów i ilustracji odpowiedniego położenia, przydatne okazały się ilustracje 2.9 i 2.10, które idealnie odzwierciedlają potencjalną przestrzeń skanowania.



Rysunek 2.9: Zasięg skanowania z widokiem z góry



Rysunek 2.10: Zasięg skanowania z widokiem z boku

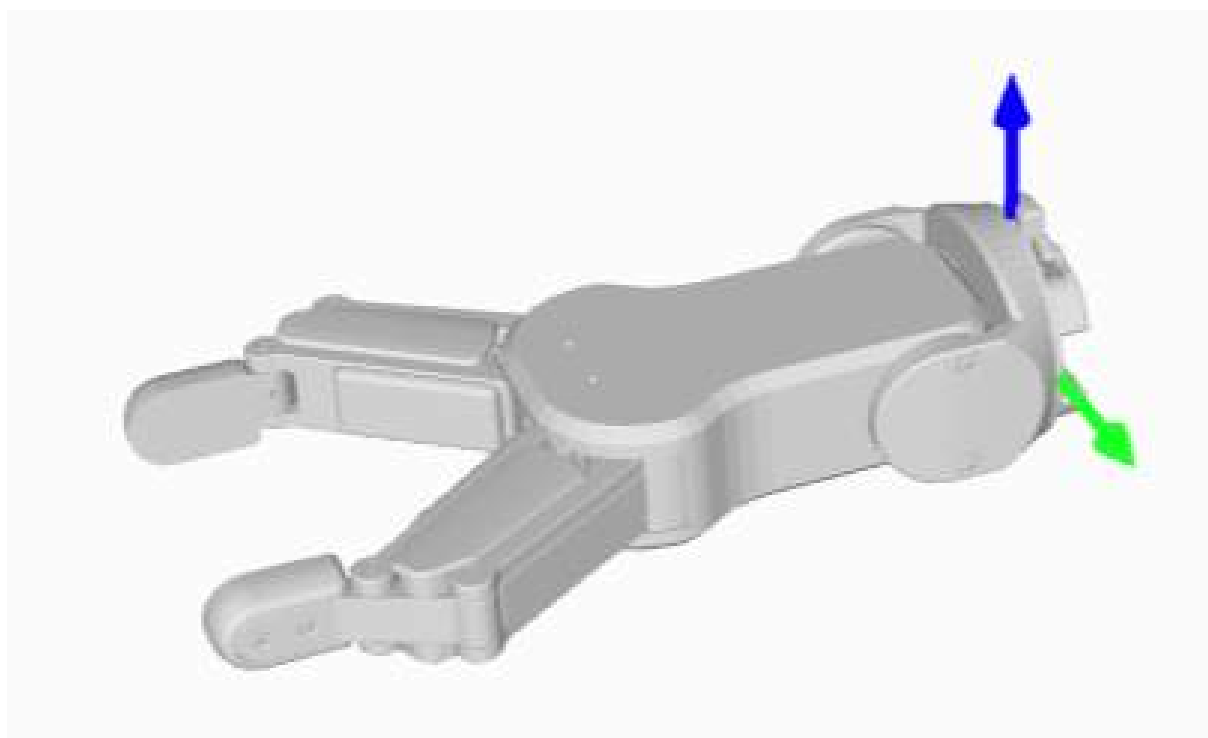
Podążając metodą eksperymentalną została dobrana optymalna odległość skanera od przestrzeni skanowanej. W eksperymencie rozstrzygano na podstawie ilości

bezbłędnie zeskanowanych elementów oraz wielkości przestrzeni jaką kamera pozostawiała manipulatorowi do swobodnego manewrowania w przestrzeni roboczej.

4. Chwytnik - efektor manipulatora

Z racji różnorodności elementów używanych do realizacji zadania, w celu usprawnienia i polepszenia funkcjonalności procesu podnoszenia elementów, zastosowano różne chwytaki.

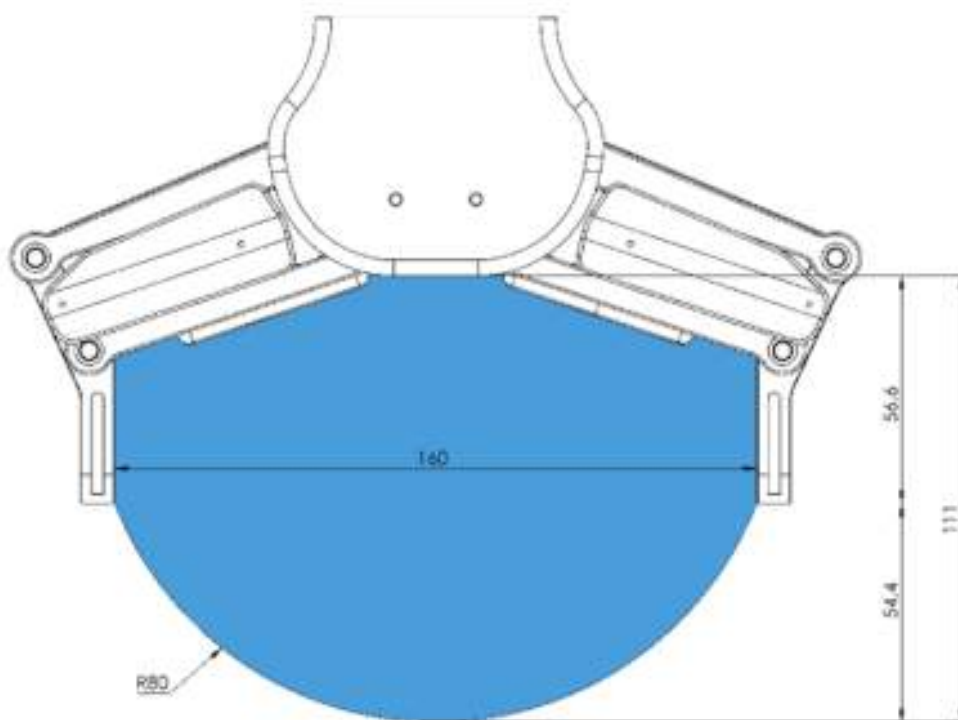
- Chwytnik OnRobot RG6 (rys. 2.11) - wszechstronne narzędzie zaprojektowane do efektywnego współdziałania z robotami przemysłowymi. Ten elastyczny chwytak wyposażony jest w mechanizm szybkiej wymiany. Dodatkowe elementy gumy symulujące opuszki palców zapewniają dużą elastyczność i delikatność chwytania.



Rysunek 2.11: Model chwytaka OnRobot RG6

Chwytnik ten jest bardzo zaawansowanym urządzeniem produkcji renomowanej firmy OnRobot. Do jego zalet należą:

- Możliwość chwytania różnorodnych elementów - poprzez bardzo szeroki zakres ruchu palców chwytaka 2.12,

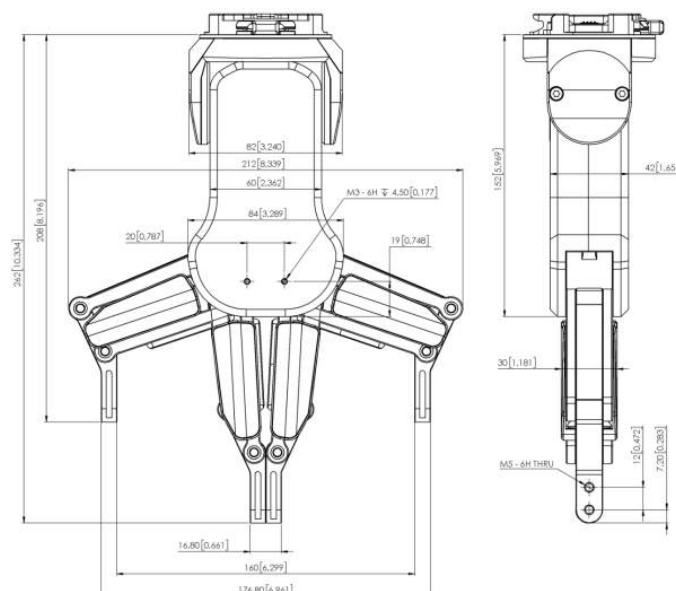


Rysunek 2.12: Zakres pracy chwytaka OnRobot RG6

- Mechanizm szybkiej wymiany - ze względu na zastosowaną metodę mechanizmu szybkiej wymiany, zmiana chwytaka na inny jest kwestią sekund.
- Inteligentne oprogramowanie i wyposażenie - chwytak wyposażony w czujniki siły wraz z odpowiednim oprogramowaniem pozwala na konfigurację z jaką szerokością palce chwytaka mają podejść pod podnoszony element, do jakiej szerokości mają się zamknąć oraz z jaką siłą na podnoszony element mają naciskać jego palce.

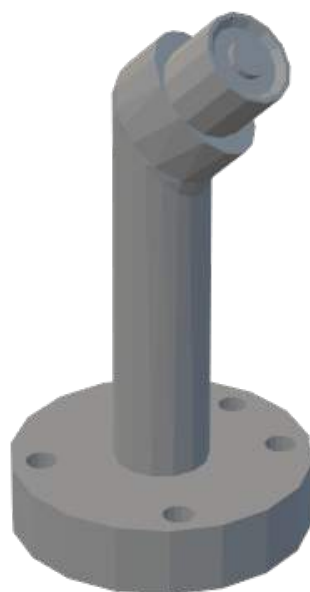
Do wad natomiast należy zaliczyć:

- Złożoność konfiguracji - z uwagi na dużą gamę możliwości oprogramowania, jego dostosowywanie i integracja z kontrolerem robota potrafi być bardziej skomplikowana niż w przypadku prostszych narzędzi.
- Gabaryty chwytaka - model RG6 charakteryzuje się dosyć sporymi wymiarami 2.13 co przy stosunkowo dużych elementach do podnoszenia zdawało się być nieszkodliwe. Natomiast gdy testy zostały przeprowadzone na elementach mniejszych, jak na przykład rolka o średnicy 40 mm, okazało się, że chwytak ze względu na swój rozmiar i kształt jest powodem, dla którego oprogramowanie wykrywało potencjalne kolizje przy symulowanym podejściu po mniejsze elementy.



Rysunek 2.13: Wymiary chwytaka w milimetrach

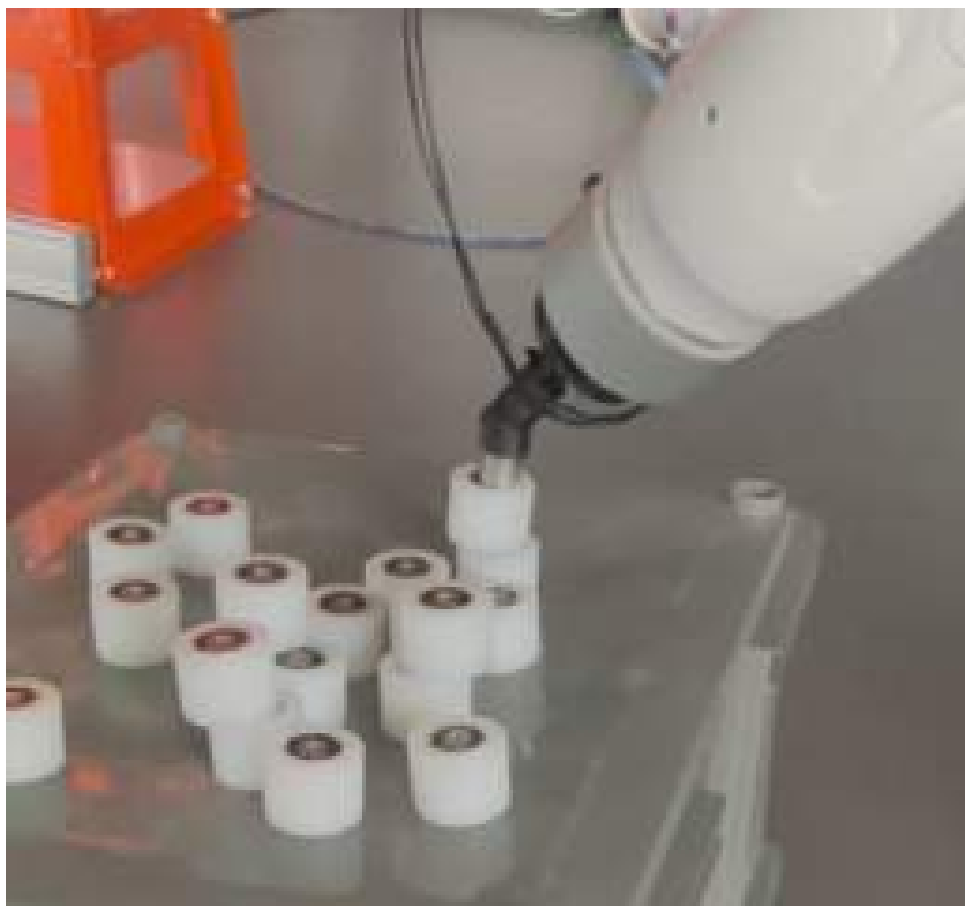
Ze względu na problem związany z rozmiarami chwytaka OnRobot zaprojektowano odpowiadający gabarytami i kształtem chwytak z elektromagnesem (patrz rys. 2.14).



Rysunek 2.14: Model chwytaka z elektromagnesem

Chwytak ten został specjalnie zaprojektowany i wydrukowany przez drukarkę 3D. Jego specyficzny kształt w postaci rurki zakończonej zgięciem przy końcówce został zaprojektowany w celu umożliwienia mniej kolizyjnego podejścia pod element. W przypadku gdyby to zgięcie nie istniało, podejście pod element leżący na przykład bokiem, mogło skutkować kolizją z pudełkiem lub innymi elementami. Dzięki zagięciu samo ramię nie musi tak nisko schodzić po element co ograniczyło strefę zagrożoną kolizją 2.15. Na końcu chwytaka został

zamontowany elektromagnes 24 VDC. Przez niewielkie skomplikowanie obsługi takiego magnesu, jego zastosowanie nie tylko umożliwiło większą swobodę w ruchach manipulatora, ale również uprościło korzystanie z samego chwytaka.



Rysunek 2.15: Przykład podejścia pod element za pomocą zaprojektowanego chwytaka

Zaprojektowany chwytak okazał się być optymalny dla wielu rodzajów elementów używanych w testach. Do zalet chwytaka należy zaliczyć:

- Małe rozmiary i waga - skromne rozmiary nowo zaprojektowanego chwytaka pozwoliły na bardziej swobodne poruszanie się efektora wśród przeszkód. Dzięki niemu niektóre rodzaje elementów niemożliwych wcześniej do podniesienia przez chwytak OnRobot, teraz nie sprawiały najmniejszego problemu.
- Łatwość obsługi i użytkowania - poprzez najprostszy elektromagnes przemysłowy zamontowany na końcu nowego chwytaka, skomplikowanie kodu przy wydawaniu poleceń złapania lub opuszczania elementu znacznie zmalało. Z elektromagnesu wyprowadzono wyłącznie dwa przewody (plus i minus), wystarczyło więc minus mieć stale podpięty do masy i manipulować jedynie stanem wysokim przy interakcji z podnoszonym przedmiotem.

2.3 Struktura układu z systemem wizyjnym Photoneo

Schemat 2.16 przedstawia architekturę połączeń i komunikacji pomiędzy użytymi elementami układu.



Rysunek 2.16: Topologia modelu

Przedstawiona na rysunku 2.16 struktura umożliwia optymalne funkcjonowanie skonfigurowanego systemu, jednak konieczne jest dokładne skonfigurowanie połączeń, włączając w to konfigurację sieciową. Poprzez odpowiednie ustawienia i konfiguracje możliwe jest efektywne komunikowanie się poszczególnych elementów systemu. Oprogramowanie kontrolera umożliwia proste przypisanie odpowiednich adresów każdemu z elementów.

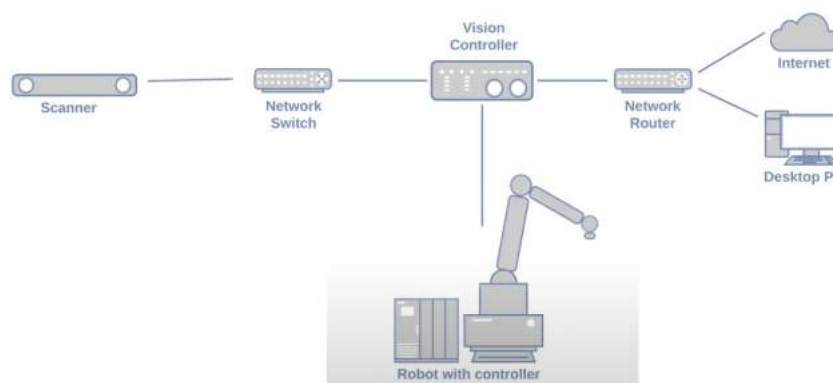
Rozdział 3

Konfiguracja parametrów układu z systemem wizyjnym Photoneo

Poniższy rozdział przedstawia szczegółowy opis struktury projektowej, obejmując konfigurację parametrów mających na celu zintegrowanie wszystkich urządzeń wchodzących w skład układu. Oprogramowanie firmy Photoneo, podobnie jak środowisko programowania UR3, które zostanie opisane w dalszej części pracy, charakteryzuje się intuicyjnością, co sprawia, że konfiguracja jest stosunkowo łatwa.

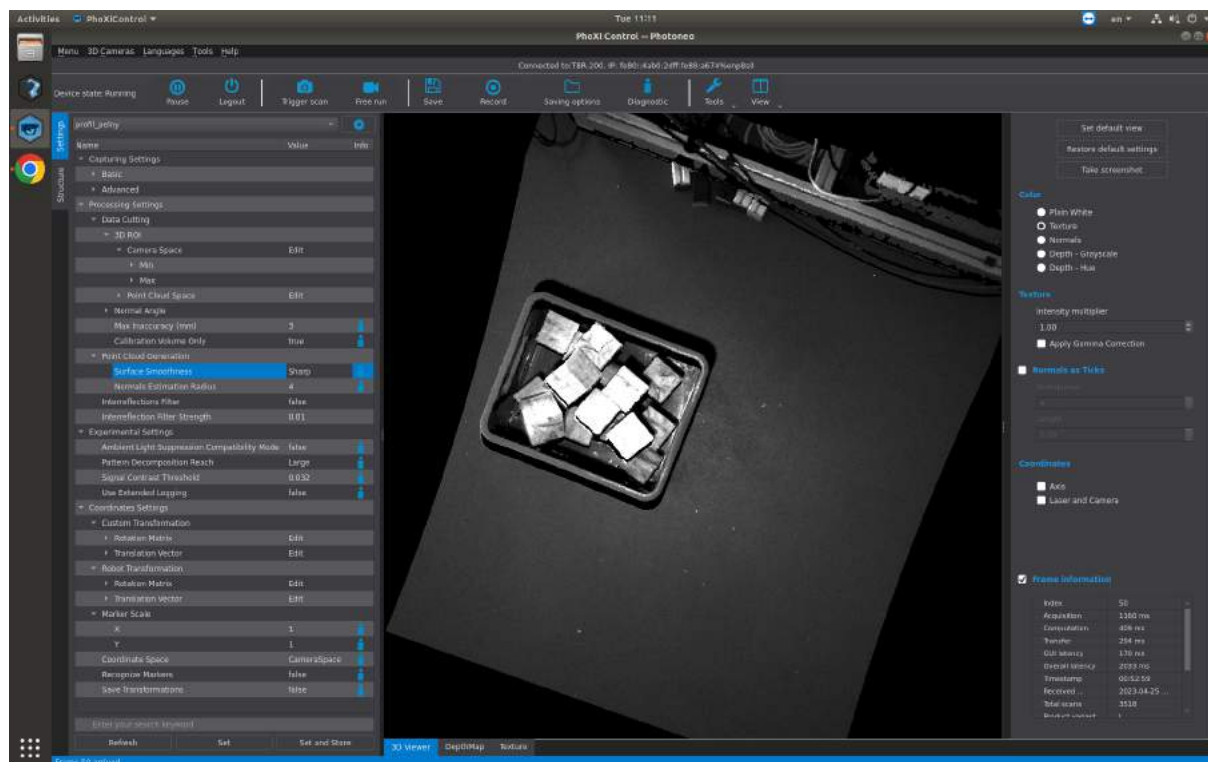
3.1 Układ z systemem wizyjnym firmy Photoneo

Aby właściwie skonfigurować pierwszy układ do realizacji rozwiązania zadania Bin Picking, konieczne było odpowiednie połączenie i skomunikowanie poszczególnych elementów schematu 3.1.



Rysunek 3.1: Schemat połączeń elementów układu

Dla zapewnienia pełnej funkcjonalności całego systemu, konieczne było podłączenie do głównej jednostki kontrolnej systemu wizyjnego monitora, a także peryferiów umożliwiających kontrolę pulpitu takich jak myszka i klawiatura, jak również samego skanera za pomocą przewodów dostarczonych przez producenta. Na tym etapie, po prawidłowym podłączeniu urządzeń oraz wyborze modelu urządzenia skanującego możliwy był podgląd widoku podłączonego skanera w dedykowanej aplikacji 3.2 zainstalowanej na systemie operacyjnym sterownika o nazwie PhoXiControl. Na rysunku 3.2 pokazano widok okna aplikacji z widoczną fotografią z kamery oraz różnorodnymi ustawieniami.



Rysunek 3.2: Widok kamery w aplikacji PhoXiControl

Oprócz połączenia skanera i stanowiska użytkownika z kontrolerem wizyjnym, należało również podłączyć robota oraz jego jednostkę centralną do kontrolera systemu wizyjnego jak i sieci. Następnie, odpowiedni chwytak połączyć z jego sterownikiem, a ten z kolei połączyć z komputerem robota.

3.1.1 Połączenie sieciowe

Początkowym jak i podstawowym etapem jest konfiguracja interfejsów sieciowych kontrolera. Za pośrednictwem tych interfejsów kontroler wizyjny nawiązuje komunikację ze wszystkimi urządzeniami zawartymi w zestawie. Poprawne skonfigurowanie sieci stanowi kluczowy element zapewnienia prawidłowego funkcjonowania całego układu.

Network

Save

Robot interface

No changes are allowed while you are running following process: Deployment

IPv4 address*

192.168.67.130

Subnet mask <1, 32>*

24

Action Request Server port <1024, 65535>*

None

Robot controller

IPv4 address*

192.168.67.128

Robot State Server port <1024, 65535>*

None

Test connection

Scanner interface

No changes are allowed while you are running following process: Deployment

Static IP

IPv4 address*

192.168.0.2

Subnet mask <1, 32>*

24

Network interface

DHCP client

IPv4 address*

10.6.112.159

Subnet mask <1, 32>*

16

Gateway*

10.6.0.1

Primary DNS server*

Secondary DNS server*

Rysunek 3.3: Konfiguracja połączenia sieciowego

Po lewej stronie okna ustawień połączeń sieciowych (rys. 3.3) widoczne są dwie sekcje dotyczące robota, służące do konfiguracji interfejsu, przez który sterownik skanera komunikuje się ze sterownikiem robota.

- Robot interface - ustawienia sieciowe portu Ethernet sterownika skanera,
- Robot controller - ustawienie adresu IP kontrolera robota.

Po środku widoczna jest sekcja ustawień sieciowych skanera. Każdy dostarczany przez dostawcę skaner ma swój sugerowany adres IPv4, który jest konfigurowalny.

Ostatnią sekcją jest sekcja ustawień sieciowych sieci zewnętrznej, przez którą kontroler wizyjny łączy się z internetem i innymi urządzeniami w sieci. Interfejs można skonfigurować poprzez statyczny adres IP albo poprzez dynamiczne nadawanie adresu przez DHCP.

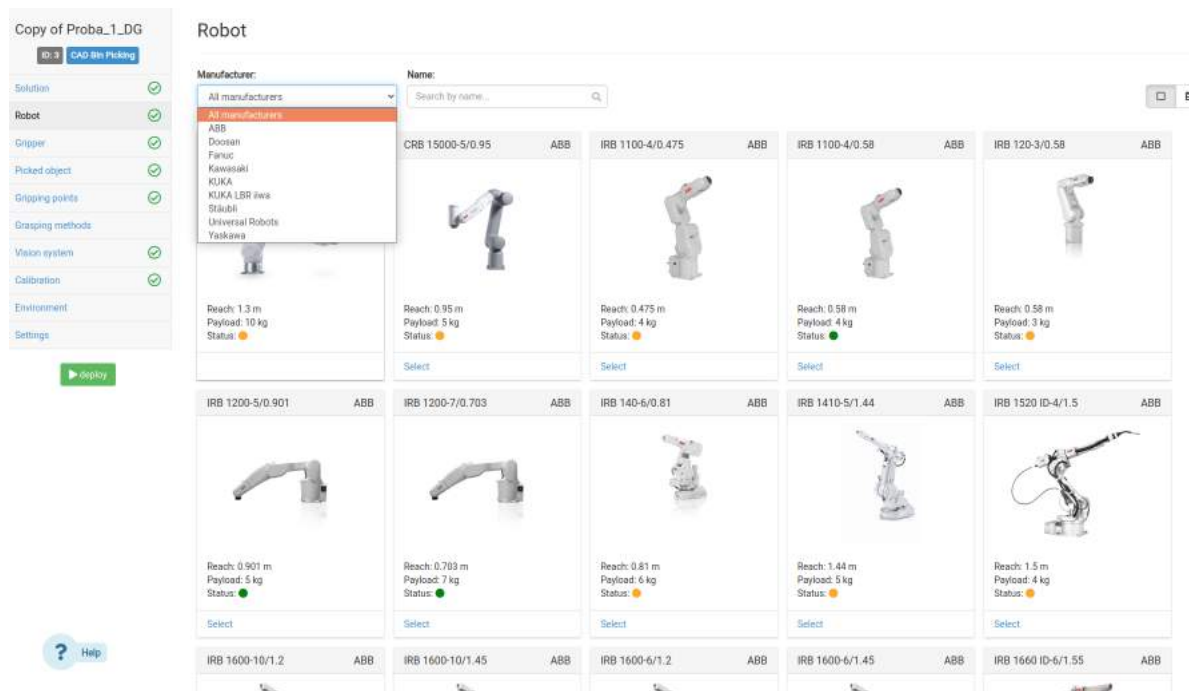
3.1.2 Dołożenie elementów manipulatora i środowiska roboczego do oprogramowania

Po konfiguracji sieciowej środowiska oprogramowanie Bin Picking Studio do kompletnej konfiguracji potrzebuje przejścia przez szereg etapów związanych z importowaniem modeli przedmiotów znajdujących się w środowisku pracy, zdefiniowaniem metod przeprowadzania procesu, kalibracji i ustawień ogólnych (patrz rys. 3.4).

Robot	✓
Gripper	✓
Picked object	✓
Gripping points	✓
Grasping methods	
Vision system	✓
Calibration	✓
Environment	
Settings	

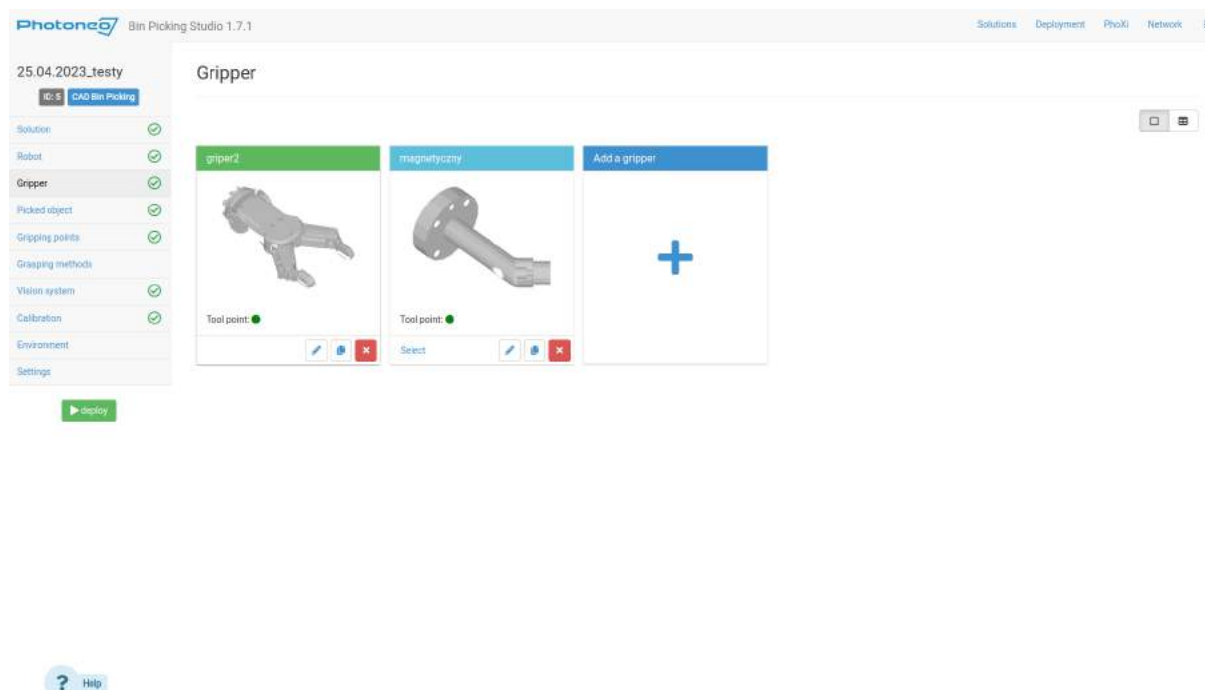
Rysunek 3.4: Etapy postępowania w oprogramowaniu Bin Picking Studio

1. **Model robota** - pierwszym z tych etapów jest dobór modelu manipulatora wykorzystywanego w projekcie. W przypadku tego układu będzie to Doosan model M1013 z parametrami zdefiniowanymi w tabeli 2.1, który jest dostępny na liście 3.5. Na liście widnieje szerokie spektrum producentów manipulatorów oraz ich modeli.



Rysunek 3.5: Wybór modelu robota

2. **Modele chwytaków** - następnym z elementów do zaimportowania był model chwytaka. Jak już wspomniano w rozdziale 2, w rozwiązaniu skorzystano z dwóch różnych rodzajów chwytaków: chwytaka mechanicznego oraz chwytaka magnetycznego. W celu dobrowolnego przełączania się pomiędzy chwytakami od strony oprogramowania, wygodnym było posiadanie zaimportowanych obu modeli chwytaków.

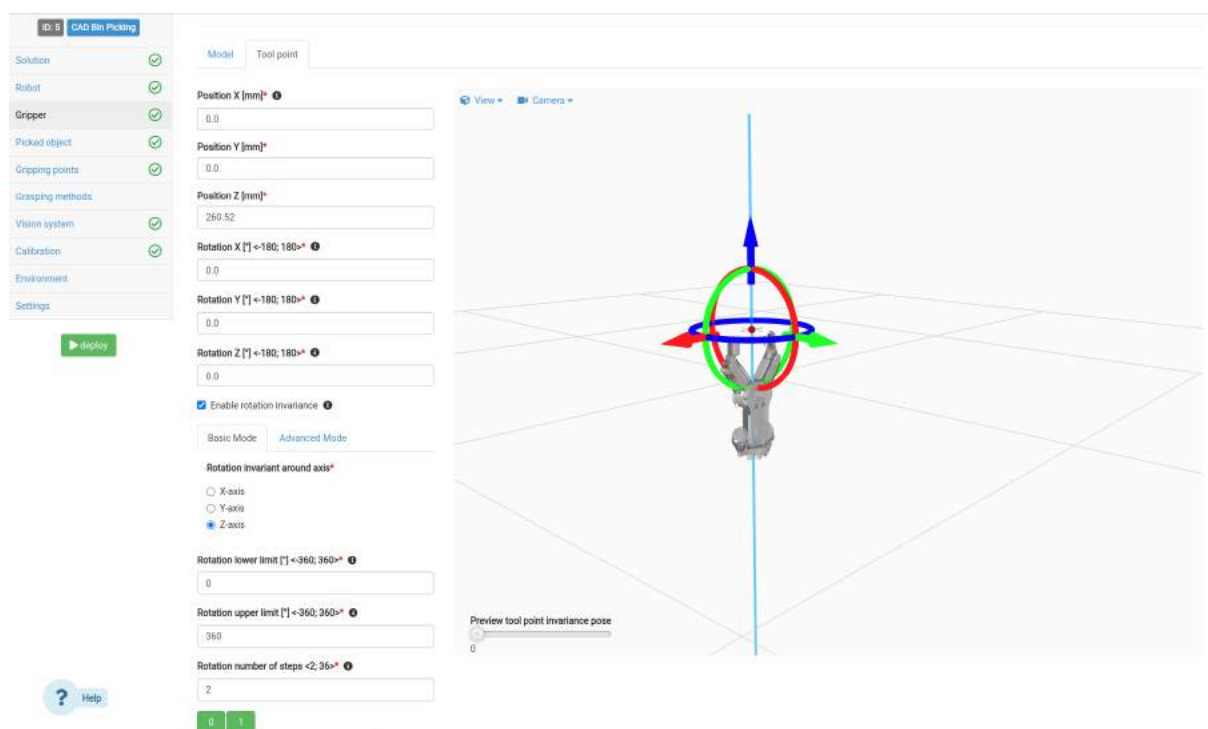


Rysunek 3.6: Zaimportowane modele chwytaków

W przypadku chwytaka OnRobot RG6 2.11, producent efektora dostarcza jego mo-

del w kilku wersjach w zależności od ilości detali i szczegółów. Z uwagi na limit wielkości wgrywanego modelu do oprogramowania, zdecydowano się na najbardziej uproszczony model. W przypadku modelu chwytaka z elektromagnesem 2.14, model CAD został własnoręcznie skonstruowany i dodany do oprogramowania. Z racji jego niewielkiego poziomu skomplikowania, oprogramowanie nie miało problemu z rozmiarem pliku CAD.

W tym etapie należało również zdefiniować punkt TCP (Tool Center Point) narzędzia. Punkt TCP jest kluczowym elementem w programowaniu i kontroli manipulatora lub robota, ponieważ definiuje on miejsce, w którym narzędzie lub chwytak fizycznie łączy się z podnoszonym elementem lub przedmiotem, co jest kluczowe dla precyzyjnej operacji. Dzięki punktowi TCP kontrolujemy pozycję i orientację narzędzia względem podnoszonego obiektu. W przypadku tego oprogramowania, ustawienie punktu TCP jest o tyle łatwe, że polega jedynie na odpowiednim przesunięciu układu współrzędnych względem modelu efektora (patrz 3.7).



Rysunek 3.7: Pozycjonowanie TCP

W przypadku chwytaka mechanicznego punkt TCP znajduje się minimalnie nad poziomem palców efektora w podstawowej jego formacji w modelu. Powodem tego było wydłużanie się chwytaka przy zamykaniu palców. Natomiast jeśli chodzi o chwytak magnetyczny - punkt TCP znajdował się tuż przy końcówce elektromagnesu.

3. **Modele pobieranych elementów** - kolejną częścią środowiska pracy, której mode-
łów wymagało oprogramowanie były pobierane w zadaniu Bin Picking przedmioty.
Wymagało to stworzenia modeli CAD elementów które miał być lokalizowane przez
skaner. Lokalizacja takiego elementu polega na oszacowaniu orientacji i położenia
obiektu w przestrzeni. Aplikacja pozwala na zdefiniowanie do 4 różnych przedmio-
tów. Co ważne, do każdego ze zdefiniowanych elementów musi również zostać zde-

finiowany osobny profil w aplikacji PhoXiControl, który został wytłumaczony w etapie *Vision System* (rys. 3.4) w szóstym punkcie niniejszego podrozdziału.

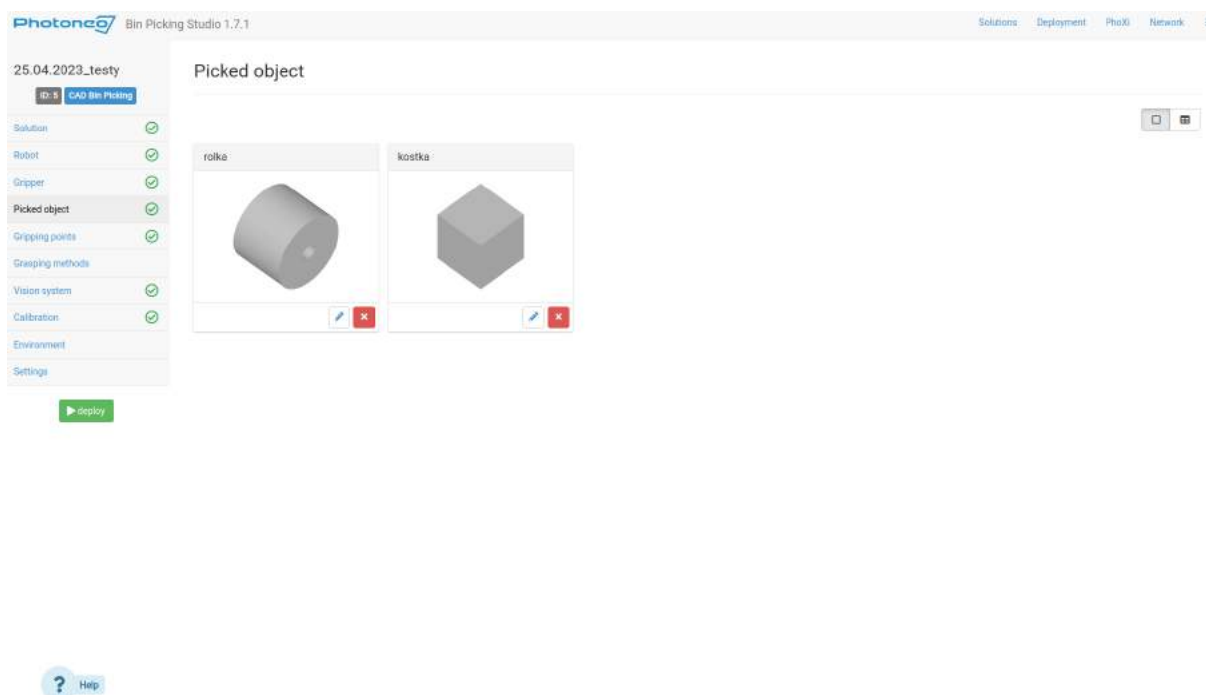


Rysunek 3.8: Rolki



Rysunek 3.9: Kostki

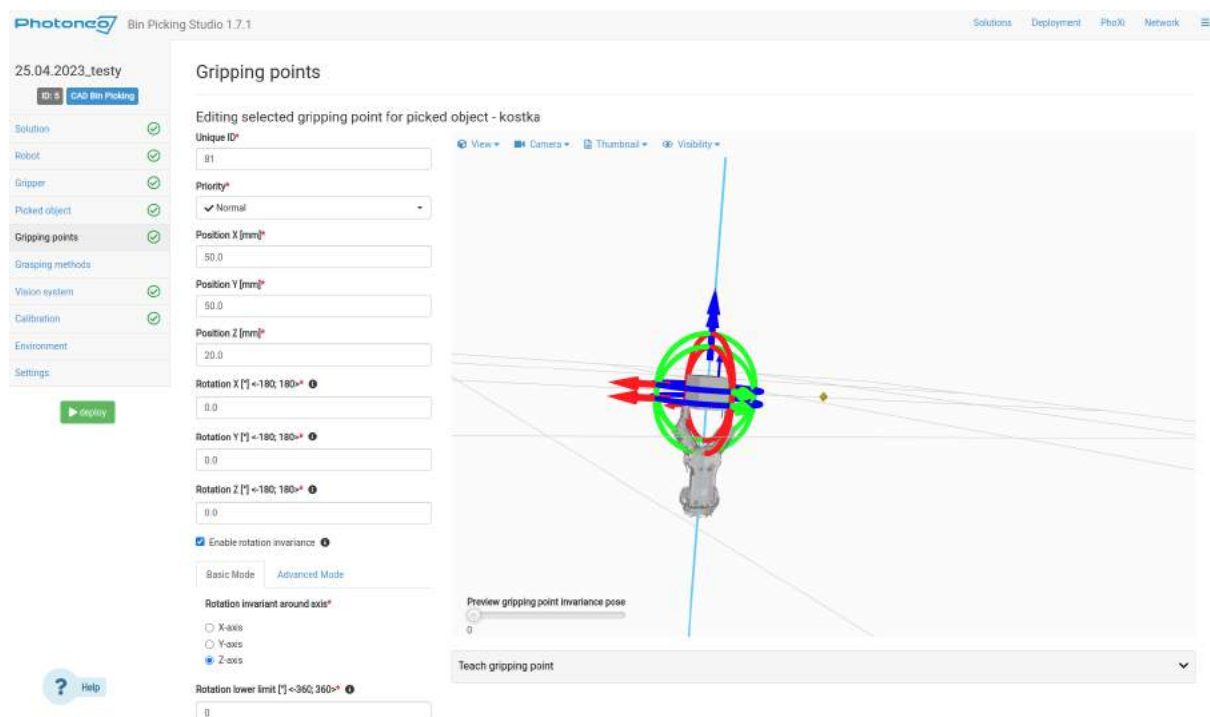
Rysunek 3.10 prezentuje wgrane do oprogramowania modele elementów ze zdjęcia 3.9.



Rysunek 3.10: Modele podnoszonych elementów

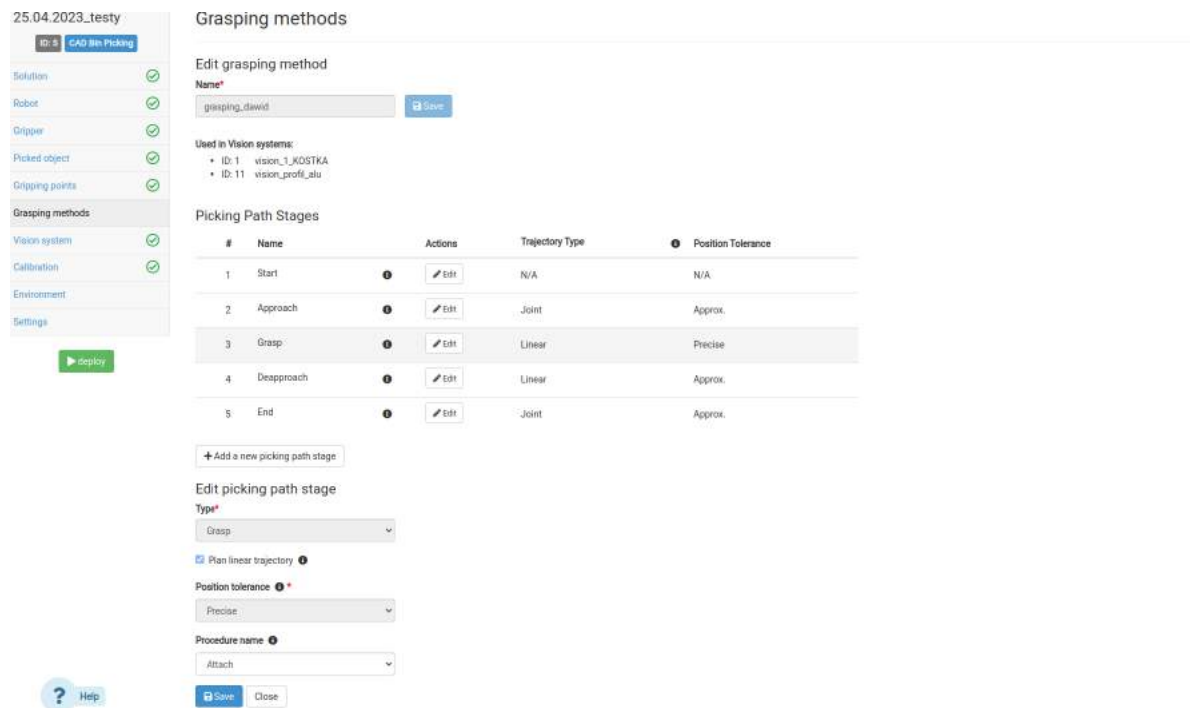
4. **Metody chwytania przedmiotów** (rys. 3.11) - następnym etapem było zdefiniowanie różnych metod chwytania przedmiotów. Dla każdego elementu należało skonfigurować osobne metody chwytania dla różnych chwytaków. Dodatkowo, w

przypadku elementów, które miały regularne kształty jak na przykład kostka z rysunku 3.9, zamiast definiowania osobnej metody chwytu dla każdej z osi z obu stron, oprogramowanie umożliwiało ustawienie opcji nazwanej *niezmiennością rotacji*. Parametr ten pozwalał na ustalenie kąta oraz osi, względem której chwytak mógł dostosowywać swoją orientację względem podnoszonego elementu we wskazanym przedziale kątowym. Następnie należało wybrać ilość punktów pośrednich w tym przedziale, w których mógł pozycjonować się chwytak. Dla przykładu podczas definiowania metod chwytania kostki o wymiarach sześcianu wystarczyło wybrać jedną oś, na przykład Z, następnie wybrać kąt możliwej rotacji chwytaka w okół kostki, najlepiej 360° oraz 4 punkty pośrednie. W ten sposób oprogramowanie po zlokalizowaniu takiej kostki rozważało 4 metody ustawienia chwytaka dla każdej z bocznych ścian.



Rysunek 3.11: Definiowanie metody chwytu

5. **Schemat wykonywanych ruchów podczas wykonywania procesu pobierania elementu** - ważnym krokiem konfiguracji systemu jest definicja i dostosowanie schematu kolejności wykonywania etapów trajektorii w celu podniesienia detalu. Oprogramowanie wymaga co najmniej 5 pośrednich punktów, które są już początkowo zdefiniowane (rys. 3.12).



Rysunek 3.12: Definiowanie etapów trajektorii

Oprócz początkowo zdefiniowanych etapów oraz możliwości ich edycji istnieje możliwość dodawania własnych, które umożliwiały np. operować chwytakiem podczas wykonywania części trajektorii czy też precyzyjnie przemieszczać ramię robota wedle potrzeb procesu. Do podstawowych etapów wykonywania trajektorii zaliczamy:

- (a) Etap startu - jest to pozycja początkowa każdej osobnej trajektorii wykonywanej podczas całego procesu. Ważne jest, aby ten punkt znajdował się poza zasięgiem skanowania skanera, by skaner nie miał przysłoniętego przez ramię robota widoku. Sugerowanym w tej pozycji jest również ustawienie chwytaka w gotowości do pobrania kolejnego elementu: w przypadku chwytaka mechanicznego - rozszerzenie palców, natomiast magnetycznego - ustawienie stanu niskiego wyjścia cyfrowego (uniknąć w ten sposób można nieplanowanego chwycenia metalowych elementów, do których może się zbliżyć chwytak podczas ruchu).
- (b) Etap podchodzenia pod element - stadium zbliżania się (ang. Approach) do wykrytego elementu. Ruch na tym etapie odbywa się pomiędzy położeniem, w którym znajdował się TCP w trakcie poprzedniego etapu trajektorii, a punktem zdefiniowanym w etapie *Approach*. Punkt końcowy tego etapu definiowany jest poprzez relatywny offset w osi Z względem danego detalu. Na tym etapie istnieje możliwość ustalenia tolerancji dla precyzji chwytaka znajdującego się przy elemencie. Bezpiecznym jest zaznaczanie opcji przybliżonej tolerancji ze względu na brak potrzeby dużej precyzji. Dodatkowo, na tym etapie dla zabezpieczenia uruchamiana jest procedura ustawiająca chwytak w konfiguracji gotowości do poboru elementu (rozszerzenie palców / niski stan wyjścia cyfrowego).
- (c) Etap chwytania - z ang. Grasp jest to faza, w której wykonywany jest ruch od punktu ustalonego w *Approach* do miejsca, w którym detal znajduje się w

optymalnym dla chwytaka miejscu do pochwycenia go. W przypadku tej konfiguracji jest to po prostu przesunięcie się wzdłuż osi Z o wcześniej zdefiniowany offset. Nieodłączną częścią tego etapu jest oczywiście załączenie chwytaka do pochwycenia detalu (zamknięcie palców / wysoki stan wyjścia cyfrowego).

- (d) Etap odejścia - (ang. Deapproach) to faza, w której robot wraz z chwytakiem i chwyconym elementem bezpiecznie oddalają się od miejsca pobrania detalu. Punkt, do którego robot porusza się ruchem liniowym jest identyczny do tego w etapie *Approach*, z tym, że przemieszczenie do niego odbywa się w tym samym kierunku lecz z przeciwnym zwrotem.
- (e) Etap zakończenia - jest to etap całkowitego oddalenia się od strefy skanowanej do miejsca odkładania pobranego przedmiotu.

W zależności od typu etapu można edytować następujące elementy:

- Punkt odniesienia dla offsetu z wyborem robota lub położenie znalezionej elementu do pobrania,
- Relatywny offset względem osi X, Y lub Z,
- Rodzaj trajektorii - liniowej lub w przestrzeni konfiguracyjnej,
- Tolerancję pozycjonowania TCP,
- Dowolną procedurę, która ma zostać wykonana po zakończeniu ruchu w ramach danego etapu.

6. **System wizyjny** - etap ten pozwala na skonfigurowanie systemu wizyjnego, odpowiednio dostosowując go do potrzeb i wymagań środowiska.

- Ustawienia profilu systemu (rys. 3.13) - pierwszym krokiem tuż po zaznaczeniu modelu oraz id skanera oraz pobieranego elementu jest wgranie odpowiedniego profilu lokalizacji skanowania. Należy zaznaczyć, że dla każdego elementu powinien być zdefiniowany osobny profil. Plikiem definiującym profile skanowania jest plik utworzony wcześniej w aplikacji PhoXiControl 3.2. Profil ten zawiera następujące definicje ustawień dla wykrywania przedmiotu:
 - Maksymalna niedokładność pomiaru rozmiaru elementu,
 - Ustawienia filtra przeciw odbiciom światła,
 - Gładkość powierzchni wykrywanego obiektu itp.

Vision system

25.04.2023_testy

ID: 5 CAD Bins Picking

Solution ☒

Robot ☒

Gripper ☒

Picked object ☒

Grasping points ☒

Grasping methods ☒

Vision system ☒

Calibration ☒

Environment ☐

Settings ☐

Save **Reset to defaults**

Name* vision_1_KOSTKA

Unique ID* 1

Scanner ID* TBR-200 Available scanners -

Scanner model* PhoXi 3D Scanner L

Scanner mount position* Robotic cell

Picked object* kostka

Grasping method* grasping_fawid

Localization profile* **Create new** **Upload other** **Edit current**

Scanning profile type* Custom

Scanning profile* **Show...**

Calibration matrix

-0.983427	-0.021179	0.178605	415.928916
-0.022446	0.998461	0.050711	173.537644
-0.179911	0.045861	-0.982613	1025.613094
0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

[Edit matrix](#) [Copy to clipboard](#)

Vision system settings

Selected settings sections are applied to this Vision system. The same sections of the Global Vision system settings are overridden.

Gripper and Object collision checking ☒

Gripper

Gripper collision checking type* Volumetric

Gripper collision sensitivity [%] <0: 100> 5.0

Object

Object symmetry axis ☐

Binspicking memory ☐

Path planning ☒

Path planning type* Plan joint and linear trajectories

Path planning timeout [s] <0: 1: 10> 3.0

Path planning attempts <1: 5>

Picking priority ☐

Gripper angle ☒

Angular threshold between the tool point and the reference vector [°] <0: 90> 90.0

Reference vector X <-1.0: 1.0> 0.0

Reference vector Y <-1.0: 1.0> 0.0

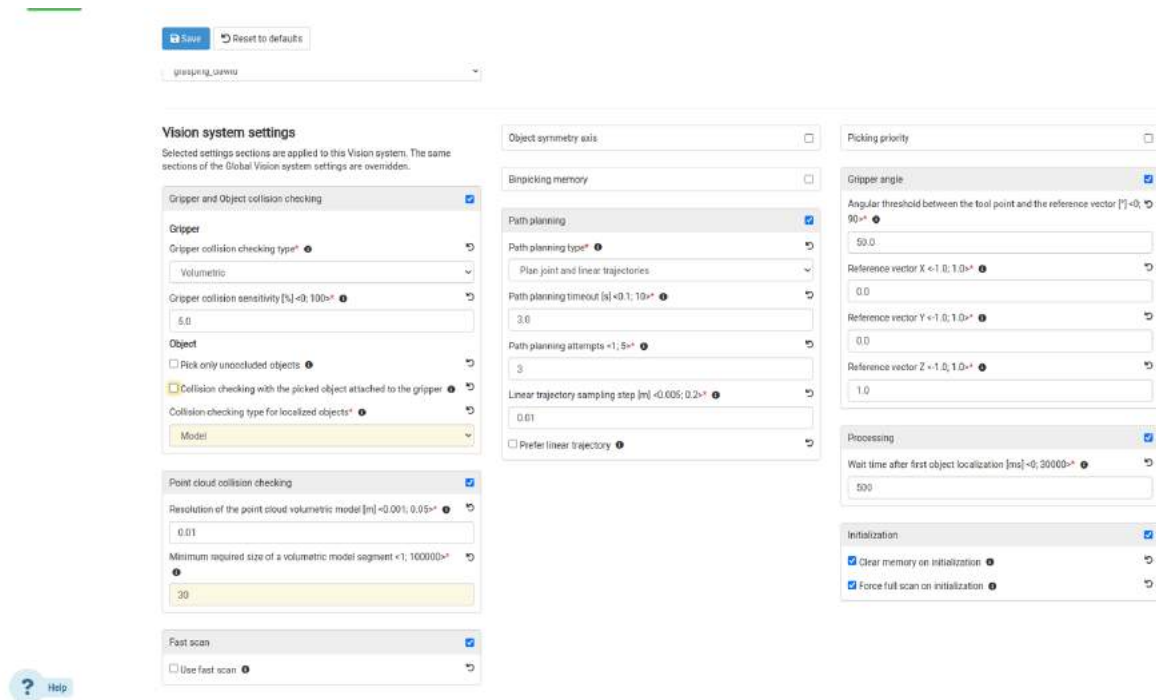
Rysunek 3.13: Ustawienia systemu wizyjnego

- Macierz kalibracji - w ustawieniach systemu wizyjnego widoczna w prawym górnym rogu ekranu 3.13 jest również macierz kalibracji. Oczywiście jest ona dostępna do wglądu i edycji dopiero po wykonaniu kalibracji omawianej w siódmym punkcie niniejszego rozdziału. Macierz ta jest rozmiarów 4x4. Zawarta w niej macierz rotacji 3x3 zawiera informacje o orientacji między układem współrzędnych skanera, a układem współrzędnych robota. Natomiast wektor 3x1 znajdujący się w ostatniej kolumnie macierzy kalibracji to współrzędne skanera w układzie współrzędnych robota.
- Ustawienia ogólne systemu wizyjnego - w tej sekcji udostępnia się wiele opcji związanych z metodami i zakresami możliwości poszczególnych elementów systemu.

W obrębie tych ustawień (rys. 3.14) można wyróżnić kilka pól konfiguracji:

- Ustawienia chwytaka i sprawdzania kolizji. Do istotnych ustawień z tego pola zaliczyć można:

- * Typ sprawdzania kolizji chwytaka - Volumetric lub Model. Pierwszy charakteryzuje się wykorzystywaniem trójwymiarowej reprezentacji przestrzeni chwytaka, zwanej także przestrzenią chwytania, aby określić, gdzie i jakie obiekty mogą być skutecznie złapane przez chwytak. Do zalet takiego rozwiązania należy brak potrzeby wgranych dokładnych modeli geometrycznych obiektów, co sprawia, że jest bardziej elastyczny i odporny na różnorodność kształtów. Wadą takiego rozwiązania może być fakt, iż jest ono bardziej kosztowne obliczeniowo, a wyniki mogą być mniej precyzyjne niż w przypadku dokładnych modeli. Typ Model natomiast charakteryzuje się wykorzystywaniem dokładnych modeli geometrycznych obiektów do symulacji procesu chwytania. Może obejmować również analizę sił i momentów, aby oszacować stabilność chwytu. Oferuje on precyzyjne i kontrolowane chwyt,



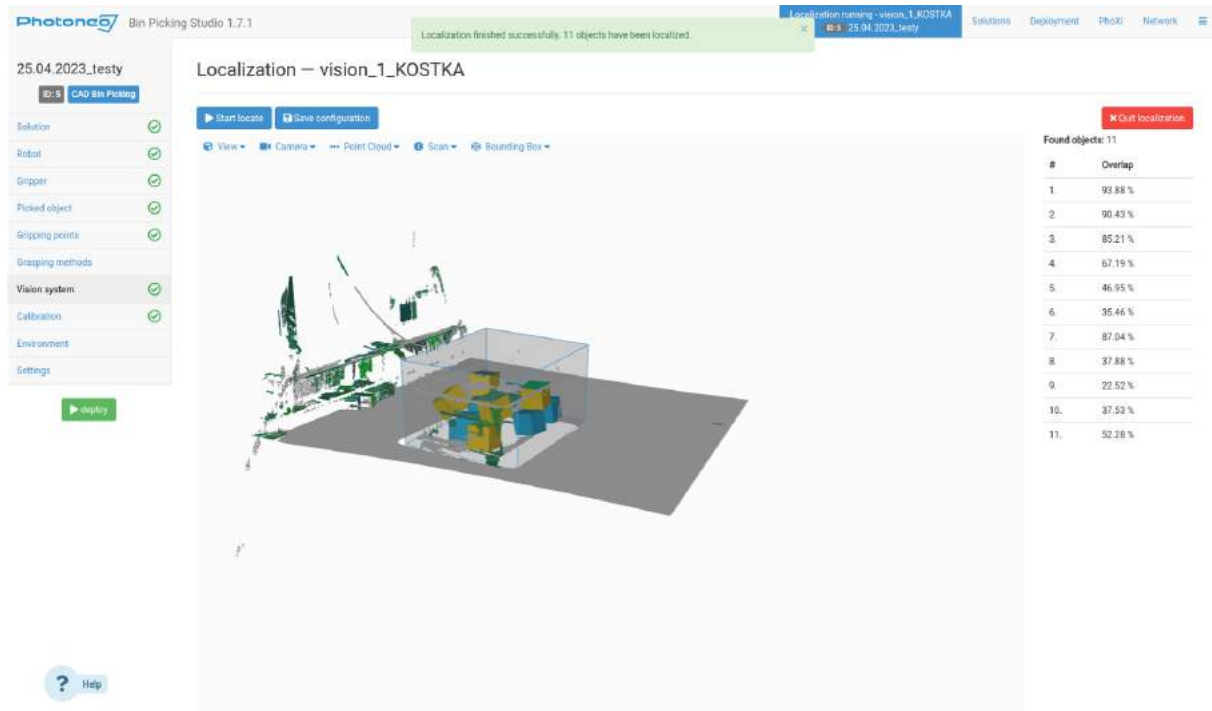
Rysunek 3.14: Ustawienia systemu wizyjnego

zwłaszcza w przypadku obiektów o określonych kształtach i właściwościach fizycznych.

- * Procentowa czułość na kolizję - w tym miejscu, najlepiej metodą doświadczalną dobrać odpowiednią wartość czułości. Zbyt duża może doprowadzić system do interpretacji procesu podnoszenia elementu wydającego się całkowicie bezpiecznym i pozbawionym kolizji jako niebezpiecznego i niemożliwego do zrealizowania. Zbyt mała natomiast może doprowadzić do zignorowania realnego ryzyka kolizji co skutkować może uszkodzeniem środowiska roboczego i jego elementów.
- * Opcja podnoszenia tylko niezakrytych innymi elementami detali.
- * Opcja sprawdzania kolizji biorąc pod uwagę chwycony już obiekt.
- * Typ sprawdzania kolizji zlokalizowanych już obiektów - możliwości identyczne jak przy wyborze typu sprawdzania kolizji chwytaka.
- Ustawienia planowania trajektorii. Do istotnych ustawień z tego pola zaliczyć można:
 - * Rodzaj planowanych trajektorii z wyborem ruchów tylko liniowych, tylko w przestrzeni konfiguracyjnej oraz z możliwością obu rodzajów ruchu.
 - * Długość przerwy pomiędzy planowaniem trajektorii.
 - * Ilość prób planowania trajektorii przed wywołaniem błędu niepowodzenia procesu.
 - * Długość próbnych kroków wykonywanych przy planowaniu trajektorii.
- Ustawienia kątów chwytaka. Tutaj można ustawić np. granicę kąta pod jakim chwytak może podejść pod element.
- Inne ustawienia takie jak korzystanie z odpowiednich pamięci sterownika, czas przerwy po wykryciu pierwszego elementu, czyszczenie pamięci

podręcznej, opcja szybkiego skanowania i inne.

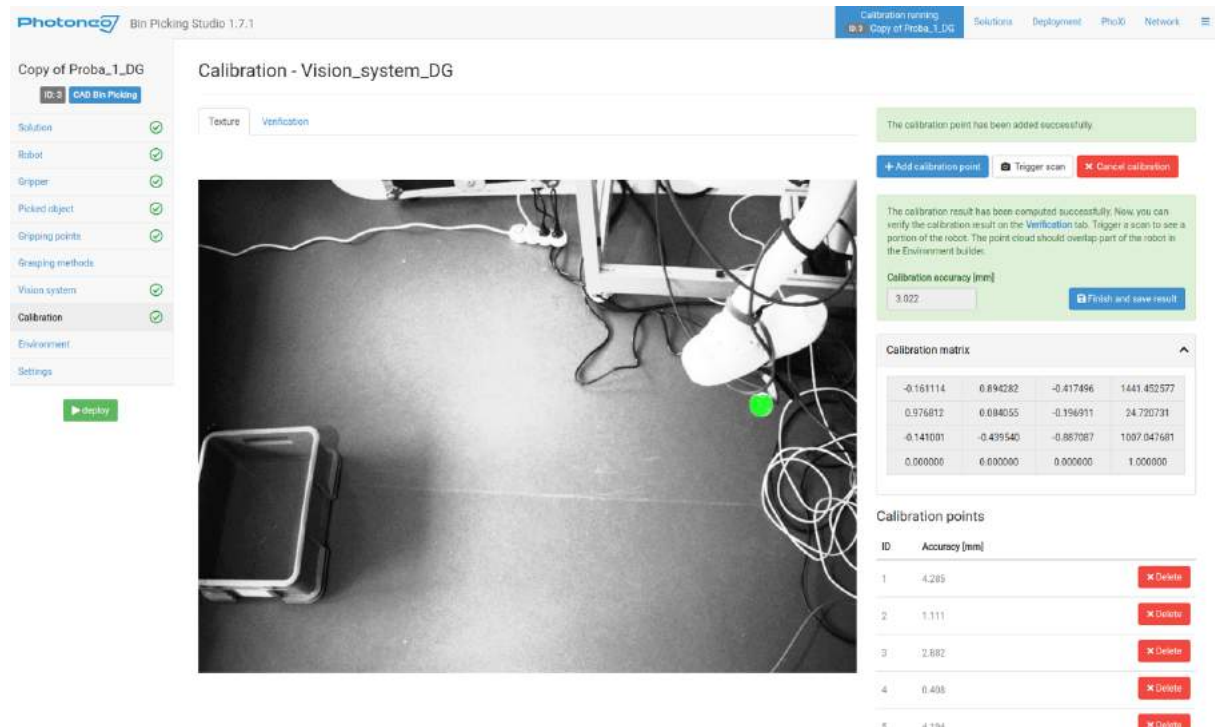
- Lokalizacja przestrzeni skanowania (rys. 3.15). Ostatnią częścią ustawień systemu wizyjnego jest ustalenie przestrzeni, na której mogą być lokalizowane elementy do podnoszenia.



Rysunek 3.15: Lokalizacja przestrzeni skanowania

Przestrzeń ta może zostać zdefiniowana poprzez zmianę pozycji i rozmiaru elementu zwanego Bouding Boxem w symulowanej przestrzeni widocznej przez skaner, stworzonej poprzez plik zawierający profil skanera 3.2. Poprzez zmianę położenia i rozmiaru graniastosłupa tak, aby znajdowała się w nim tylko ta przestrzeń, z której pobierane będą elementy, uniknąć można sytuacji, w której skaner błędnie lokalizuje łudząco podobny przedmiot do tego, który finalnie ma być pobrany, co może doprowadzić do uszkodzeń środowiska skutkując niepowodzeniem procesu. Przykładem z przeprowadzonych doświadczeń błędnie zlokalizowanego elementu jest sytuacja, w której Bounding Box nie był poprawnie zlokalizowany, a skaner zdiagnozował przedłużacz jako profil aluminiowy. Na szczęście dzięki zadbanie o bezpieczeństwo na stanowisku pracy, możliwe było nagłe zatrzymanie procesu i unieruchomienie robota, co zapobiegło uszkodzeniu komponentów. Dodatkowo, po prawej stronie okna 3.15 widoczne są statystyki poprawnie zlokalizowanych detali oraz procent pokrycia się zlokalizowanego modelu elementu z modelem wcześniej określonym.

7. **Kalibracja** (rys. 3.16) - jest jednym z najważniejszych i wymagających precyzji oraz dokładności przeprowadzenia etapów, od którego w dużej mierze zależy niezawodności całego procesu Bin Picking. Chodzi u o niezawodność pod względem komunikacji i współpracy samego robota jak i jego kontrolera ze sterownikiem systemu wizyjnego. Kalibracja to proces dostosowywania parametrów kamery w systemie wizyjnym oraz parametrów manipulatora w celu zapewnienia poprawnej korelacji między danymi wizyjnymi a rzeczywistymi ruchami manipulatora.



Rysunek 3.16: Kalibracja

Cały proces kalibracji polega na odpowiednim przygotowaniu manipulatora poprzez przypięcie do chwytaka specjalnego klipsa z czerwoną kulką wielkości kuli do snookera widocznej na fotografii 2.5 oraz edycji programu kalibracyjnego poprzez dodanie dziewięciu różnych od siebie pozycji manipulatora, w których widoczną dla skanera była przyczepiona na klipsie kula (patrz listing poniżej).

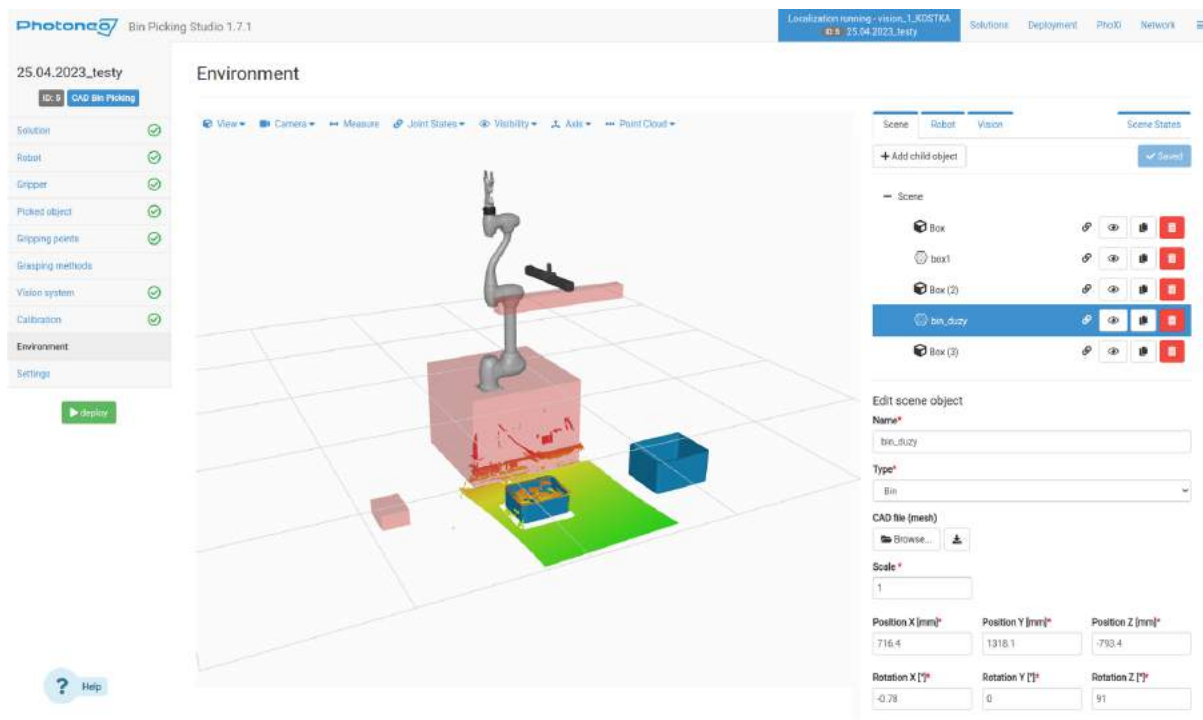
```

1
2 # calibration_positions should be uncommented and adjusted
   according to the scene
3
4 calibration_positions = [
5   posj ( -176.0 , -84.0 , -65.0 , -183.0 , -22.0 , -83.0 ) ,
6   posj ( -200.0 , -70.0 , -113.0 , -253.0 , -25.0 , -83.0 ) ,
7   posj ( -152.0 , -70.0 , -75.0 , -150.0 , -22.0 , -85.0 ) ,
8   posj ( -142.0 , -93.0 , -41.0 , -276.0 , 7.0 , 19.0 ) ,
9   posj ( -164.0 , -85.0 , -96.0 , -187.0 , -62.0 , -159.0 ) ,
10  posj ( -164.0 , -13.0 , -121.0 , -164.0 , 12.0 , -83.0 ) ,
11  posj ( -172.0 , -80.0 , -87.0 , -224.0 , -28.0 , -83.0 ) ,
12  posj ( -144.0 , -93.0 , -63.0 , -191.0 , -73.0 , -15.0 ) ,
13  posj ( -179.0 , -91.0 , -72.0 , -358.0 , 59.0 , 78.0 )
14 ]
15
```

Listing 3.1: Część kodu kalibracyjnego

Tak edytowany program po uruchomieniu przemieszczał robota do każdej z wyznaczonych pozycji, w każdej z nich po zatrzymaniu robota wywoływał skan, a oprogramowanie weryfikowało zdjęcie pod względem widoczności kuli na klipsie i przechodził do kolejnego punktu powtarzając sekwencję. Po tym jak wszystkie punkty zostały zatwierdzone przez oprogramowanie tworzyła się wcześniej wspomniana już macierz kalibracji oraz jej przybliżona dokładność. Najlepszą dokładność jaką udało się otrzymać to $2.121mm$.

8. **Modelowanie środowiska otoczenia** (rys. 3.17) - etap ten obejmuje tworzenie wirtualnych przeszkód w modelowanym środowisku trójwymiarowym, które określają obszary, w których robot nie jest uprawniony do poruszania się. Dodatkowo, istnieje możliwość integracji modeli CAD, na przykład pojemników, w celu dokładnego odwzorowania rzeczywistych obiektów w symulacji.



Rysunek 3.17: Modelowanie środowiska

Ważnym jest dokładne umiejscowienie przestrzeni ograniczających oraz modeli elementów znajdujących się w otoczeniu miejsca podnoszenia detali, gdyż nawet małe niedokładności mogą spowodować detekcję kolizji przez sterownik podczas procesu. Dokładne pozycjonowanie ułatwia możliwość nałożenia zeskanowanej przestrzeni, np. w pliku profilu skanera, na modelowane otoczenie. W ten sposób, na widoczny zeskanowany rzeczywisty pojemnik możemy precyzyjnie nałożyć jego model CAD.

9. **Globalne ustawienia systemu wizyjnego** - ostatnim etapem konfiguracji jest okno z globalnymi ustawieniami systemu wizyjnego. Oprócz ustawień identycznych jak w ustawieniach ogólnych systemu wizyjnego, dostępne są również opcje:

- ustawienia pamięci Bin Picking'u,
- ustawienia priorytetu podnoszenia elementów,
- ilość kroków pośrednich podczas procesu,
- długość przerwy na komunikację z robotem przed wywołaniem błędu.

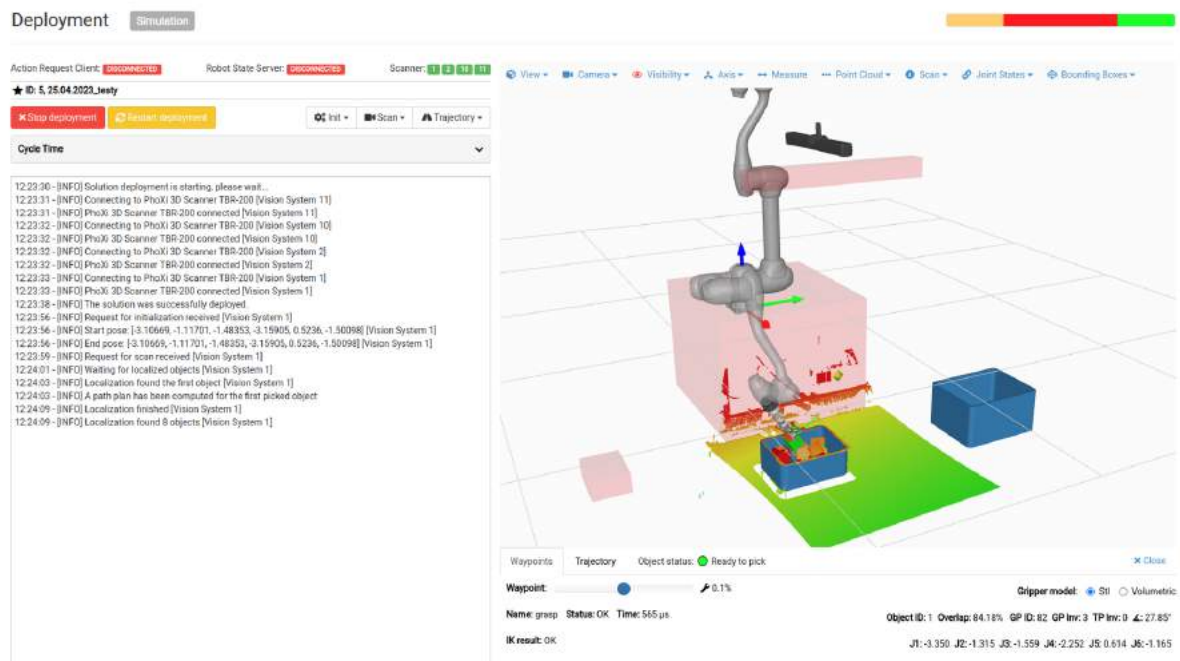
Rozdział 4

Przeprowadzenie testów na systemie wizyjnym Photoneo

Po poprawnie przeprowadzonej konfiguracji oprogramowanie finalnie umożliwia przeprowadzenie procesu Bin Picking. Wchodząc w zakładkę *Deploy* ujawnia się możliwość przeprowadzenia symulacji komputerowej na zeskanowanej przez skaner powierzchni bez udziału robota oraz uruchomienie rzeczywistego procesu już wraz z robotem.

4.1 Symulacja

Oprogramowanie Bin Picking Studio dostarcza bardzo wygodną i bezpieczną operację symulującą zadanie Bin Picking na modelu zeskanowanej przestrzeni nie angażując do tego robota, co pozwala na bezawaryjne przeanalizowanie krok po kroku zachowania manipulatora oraz pozostałej części układu (fot. 4.1).



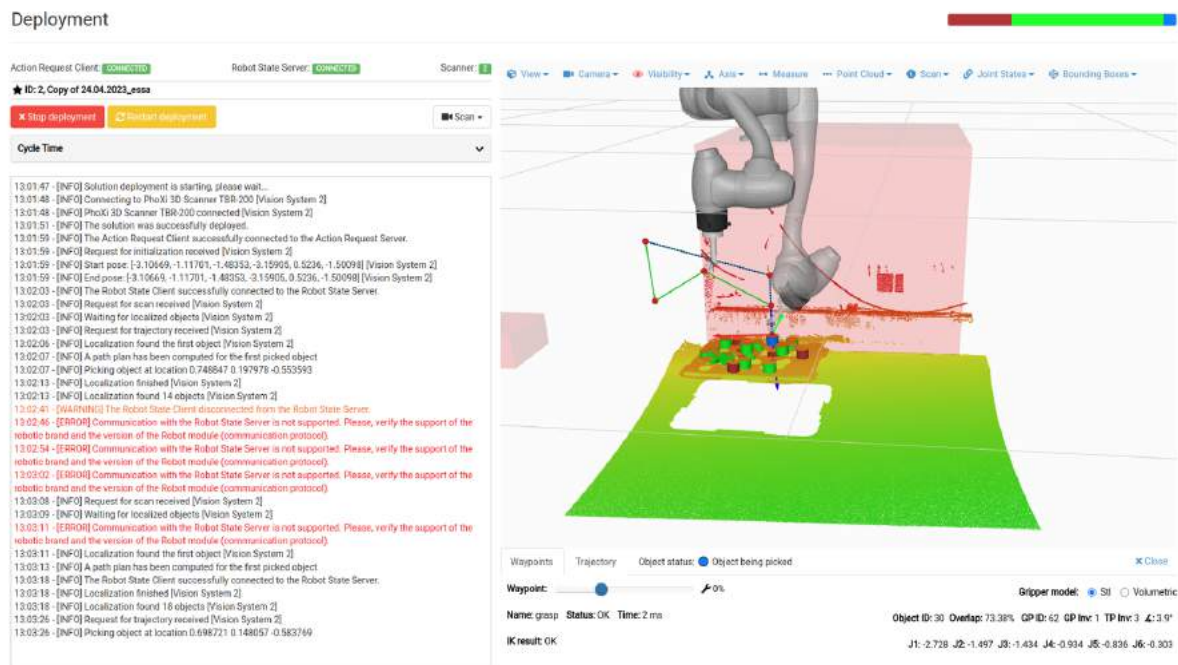
Rysunek 4.1: Symulacja Bin Picking

Po lewej stronie okna symulacji 4.1 widoczne są komunikaty zwrotne od różnych ele-

mentów układu, które informują o aktualnym stanie symulacji, błędach, aktualnych przesłanieniach, skanach oraz lokalizacji detali i innych. Po prawej stronie natomiast widoczne jest okno symulacji trójwymiarowej zamodelowanego środowiska. Widoczne jest na nim zaprojektowane wcześniej otoczenie, wirtualny model poruszającego się ramienia w szaro-przeźroczystym kolorze oraz podświetlane na różne kolory elementy do podniesienia w zeskanowanej przestrzeni. Kolor tych elementów zależy od ich jakości wykrycia, aktualnej dostępności do podniesienia oraz tego czy jest aktualnie podnoszony. Czerwony oznacza brak możliwości podniesienia, zielony - gotowy do podniesienia oraz niebieski jako aktualnie podnoszony detal. Pod oknem przedstawiającym trójwymiarowe środowisko znajdują się poręczne narzędzia m.in. do przechodzenia przez symulację krok po kroku z możliwością cofania się w czasie jak również wiele istotnych informacji o samym robocie i elementach.

4.2 Rzeczywisty proces

Poprzez wybór uruchomienia rzeczywistego procesu, system inicjalizuje wszystkie elementy systemu po czym oczekuje na uruchomienie programu procesu Bin picking na panelu sterującym robota. Głównym zadaniem tego programu było wprowadzenie procesu w pętlę kończącą się w przypadku nie wykrycia następnego dostępnego do pobrania elementu. Pojedynczy cykl takiej pętli zawiera wysłanie prośby o skan do systemu wizyjnego, następnie wysłanie prośby o zaplanowaną trajektorię pod wybrany element, a następnie odpowiednie jej wykonanie i powrót do pozycji startowej. Podobnie jak w symulacji, oprogramowanie podświetla zeskanowane elementy na tej samej zasadzie, tzn. niebieskim kolorem jest oznaczony aktualnie pobierany element.



Rysunek 4.2: Wizualizacja procesu Bin Picking

W trójwymiarowej wizualizacji przebiegu procesu (rys. 4.2) oprócz właściwego modelu manipulatora jest również widoczny ten szaro-przeźroczysty z symulacji. Przedstawia on

przewidywaną trajektorię rzeczywistego robota, którą można prześledzić zanim manipulator się tam znajdzie, co pozwala na przewidzenie i zaniechanie kolizji przy ustawionym niskim progu wykrywania kolizji podczas dobierania parametrów ustawień.

4.3 Optymalizacja parametrów i ustawień systemu

Początkowo dobrane ustawienia systemu pozwalają na odpowiednie lokalizowanie i podnoszenie elementów znajdujących się w obszarze skanowania skanera. Z reguły jest to niezadowalająca jakość ustawień z uwagi na niedoprecyzowanie parametrów. Warto zaznaczyć że każdy rodzaj podnoszonych elementów wymaga innych ustawień w celu zwiększenia wydajności procesu, dlatego też istotnym jest zapisywanie profili ustawień dla każdego z nich z osobna. Spośród ogromnej ilości opcji zarówno w globalnych ustawieniach systemu wizyjnego jak i w ustawieniach profilu systemu wizyjnego do najbardziej istotnych i wpływowych należą:

- Typ sprawdzania kolizji chwytaka oraz jego czułość na kolizję - parametry te mają duże znaczenie dla procesów podnoszenia elementów z użyciem chwytaka mechanicznego. Ze względu na jego duże gabaryty stosowanym typem był *Volumetric*. Czułość dostosowywano eksperymentalnie. Z uwagi na to, że pobierane przez chwytak mechaniczny elementy były większych rozmiarów, należało również upewnić się, że system sprawdza prawdopodobieństwo kolizji uwzględniając uchwycony już element. Dla chwytaka magnetycznego natomiast lepszym rozwiązaniem był typ *Model*, co skracało obliczenia i usprawniało proces. Czułość w tym przypadku mogła być mniejsza, co zwiększało produktywność.
- Ustawienia gładkości powierzchni detalu oraz jego odbijalność światła - ustawienia te odnoszą się bezpośrednio do podnoszonych elementów i mają duże znaczenie w zwiększaniu ilości wykrytych przez skaner detali. Wybór rodzaju powierzchni, np. kostki jako przedmiotu o ostrej krawędzi, zwiększył ilość wykrywanych elementów przez skaner do zadowalającej ilości. W przypadku rolki wartość łagodnej powierzchni również wpłynęła na optymalizację ich wykrywania. Odbijalność światła dla drewnianej kostki nie była znacząca, w niewielkim stopniu miała jednak wpływ na rolę z metalowym łożyskiem. Eksperymentalnie złagodzono ten efekt dobierając odpowiednią wartość filtru. Parametr ten mógłby mieć duże znaczenie w przypadku detali utworzonych z materiału takiego jak profil aluminiowy.
- Kąt nachylenia chwytaka - ten parametr definiuje maksymalny kąt do jakiego może się przechylić chwytak względem którejś z osi podnoszonego elementu. W przypadku drewnianej kostki i chwytaka mechanicznego, zwiększenie tego parametru wielokrotnie zwiększało ilość rozwiązań przy podnoszeniu kostki, jako że kostka która była zasłonięta od boków lub frontu ścianą lub innymi elementami, mogła być podniesiona pod ustalonym kątem, co w przypadku nie ustalenia tego parametru eliminowałoby dostępność tego detalu do pobrania. W przypadku rolki i chwytaka magnetycznego parametr ten nie grał zbyt dużej roli z racji tego, że rolka mogła być podniesiona tylko z dwóch stron - tam gdzie wystawała część metalowego łożyska.

4.4 Wyniki testów

Początkowo, przed optymalizacją i doбором odpowiednich parametrów systemu wizyjnego Photoneo, proces Bin picking'u był bardzo mało skuteczny. Duża część elementów znajdujących się w obszarze skanowania kamery nie była nawet wykrywana. Natomiast spośród tych wykrytych większość nie była dostępna do pobrania ze względu na wykrywaną przez oprogramowanie potencjalną kolizję, która całkowicie dyskwalifikowała ten element. Efektem tych początkowych testów było przerywanie procesu często jeszcze zanim zrealizowano połowę pobrań z informacją, iż proces się zakończył, ponieważ nie może być dalej kontynuowany 4.3.



Rysunek 4.3: Brak możliwości kontynuowania procesu

Po przeprowadzeniu eksperymentów i naniesieniu korekt w ustawieniach parametrów omawianych w podrozdziale optymalizacji, efekty przeprowadzonych testów znacznie się polepszyły. W przypadku konfiguracji sprzętu z chwytakiem mechanicznym, podnoszona była większość drewnianych klocków z wyjątkiem tych, znajdujących się tuż przy rogu pojemnika, w którym brakowało miejsca aby zmieściły się tam palce chwytaka. W przypadku konfiguracji z chwytakiem magnetycznym i rolkami jako podnoszonymi elementami, system miał bardzo dużą skuteczność. Z uwagi na specyficzne zakrzywienie chwytaka, postanowiono rolki umieścić na odwróconym pojemniku tak, aby ramię robota zniżając się po element nie powodował kolizji ze ścianami pojemnika. Uwzględniając ten fakt oraz dobrze sparametryzowane modele podnoszonych przedmiotów, skaner nie miał problemu

z wykrywaniem rolek z małymi wyjątkami. Jedynym problemem były rolki obrócone bokiem (bez widocznego łożyska) do skanera, w takim przypadku skaner często traktował rolkę jako graniastosłup niebędący elementem gotowym do pobrania.

Rozdział 5

Układ wykorzystujący alternatywny system wizyjny

Do testów drugiego systemu wizyjnego posłużono się cobotem UR3 firmy Universal Robots oraz skanerem Wrist Camera firmy Robotiq

5.1 Zestaw urządzeń wykorzystany do konstrukcji układu z systemem wizyjnym Robotiq

1. **Zestaw urządzeń do modelu UR3 Cobota Universal Robots** (rys. 5.1)- coboty firmy Universal Robots, wraz z kompletnym wyposażeniem, są dostarczane w celu zapewnienia wysokiej jakości obsługi wszystkich ich komponentów. Każdy element tego robota został precyzyjnie dostosowany, aby zapewnić niezawodność i efektywność w każdym aspekcie pracy. Dzięki temu ten robot umożliwia zwiększenie wydajności i skrócenie czasu przygotowania do zadania, co przekłada się na szybką i efektywną pracę w różnych aplikacjach przemysłowych.



Rysunek 5.1: Zestaw Cobota firmy Universal Robots: manipulator UR3 wraz z szafą sterowniczą i panelem uczenia

Oto elementy składowe zestawu badanego robota firmy Universal Robots:

- Manipulator UR3 (rys. 5.2)



Rysunek 5.2: Manipulator UR3

Robot UR3, będący najmniejszym członem rodziny UR, idealnie sprawdza się w lekkich zadaniach montażowych, charakteryzujących się potrzebą dużej precyzji. Jego uniwersalność znajduje zastosowanie w różnych obszarach, takich jak formowanie wtryskowe, analiza laboratoryjna, polerowanie, wkręcanie śrub, klejenie, dozowanie i spawanie. UR3 został skonstruowany z wytrzymałego aluminium i tworzyw polipropylenowych, co umożliwia mu pracę w różnych warunkach temperaturowych. Jego klasa szczelności pozwala na zastosowanie w trudnych środowiskach. Dodatkowe zalety obejmują szybką konfigurację i łatwe programowanie. Dzięki możliwości obrotu o 360° we wszystkich 6 przegubach oraz nieskończonemu obrotowi w końcowym złączu, model UR3 wyróżnia się jako najbardziej elastyczny i uniwersalny robot w rodzinie Universal Robots, zdolny do zwiększenia efektywności w różnorodnych zastosowaniach przemysłowych.

Podstawowe parametry robota:

- Udźwig: 3 kg (6.6 lb)
- Zasięg ramienia: 500 mm (19.7 inch)
- Waga: 11.2 kg (24.7 lb)
- Maksymalna prędkość efektora: 1 m/s
- Powtarzalność: ± 0.03 mm
- Temperatura pracy: $0 - 50^\circ C$
- Zasilanie: 12/24 V / 600 mA
- Hałas: Poniżej 60 dB
- Długość przewodu robota: 6 m.

Numer przegubu	Zasięg [°]	Maksymalna prędkość [°/s]
Podstawa	360	180
Bark	360	180
Łokieć	360	180
Nadgarstek 1	360	360
Nadgarstek 2	360	360
Nadgarstek 3	Nieograniczony	360

Tabela 5.1: Tabela ruchliwości przegubów UR3

Tabela 5.1 prezentuje maksymalny zasięg i ruchliwość każdego z przegubów. Jak widać, osiągi są o wiele lepsze niż w przypadku większości tego typu manipulatorów. Widoczną jest mniejsza prędkość pierwszych trzech przegubów (licząc od podstawy) co może być, podobnie jak w poprzednio omawianym przypadku, kwestią gabarytów i wagi tej części ramienia. Charakterystyczną cechą robota jest również nieograniczony zasięg ostatniego z przegubów (tego na którym zamontowany jest efektor). Daje to przewagę temu manipulatorowi w porównaniu do innych cobotów tej klasy, np. w zadaniach polegający na wkręcaniu/wykręcaniu itp.

- Szafa sterownicza robota UR3 firmy Universal Robots (rys. 5.1) - zaawansowany komputer sterujący zarządzający ruchami manipulatora. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych interfejsów komunikacyjnych, skrzynia sterowania UR3 umożliwia efektywną wymianę informacji między robotem a innymi elementami systemu. Zintegrowane technologie pozwalają na elastyczną współpracę z różnymi urządzeniami automatyki, co zwiększa wszechstronność i funkcjonalność robota.

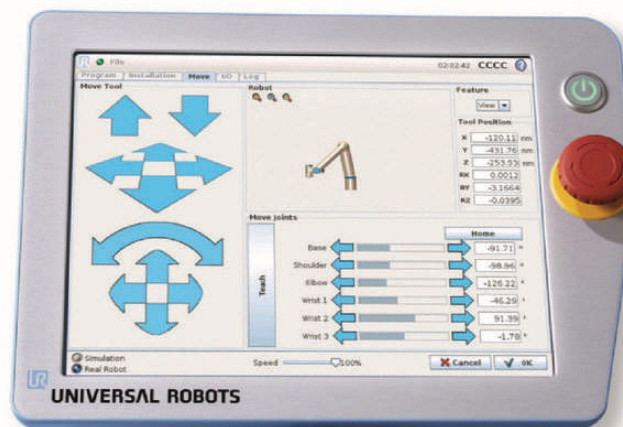


Rysunek 5.3: Urządzenie sterujące cobotem UR3

Do podstawowych parametrów komputera należą:

- Wymiary: 460 x 449 x 254 mm
- Waga: 12 kg
- Zasilanie: 24V 2A

- Komunikacja: Modbus TCP, PROFINET, Ethernet/IP, USB 2.0, USB 3.0, częstotliwość sterowania 500 Hz
- Wejścia/wyjścia: 16 wejść i wyjść cyfrowych, 2 wejścia i wyjścia analogowe oraz 4 kwadraturowe wejścia cyfrowe.
- Temperatura pracy: 0 – 50°C.
- Panel uczenia robota (ang. Teach Panel) (rys. 5.4) - Tablet z oprogramowaniem umożliwiającym obsługę i programowanie robota charakteryzuje się intuicyjnym interfejsem użytkownika, co umożliwia łatwe i szybkie zarządzanie maszyną. Dodatkowo, tablet posiada wbudowane opcje generowania kodu w postaci formatek, umożliwiającym szybkie tworzenie odpowiednich funkcji.



Rysunek 5.4: Panel uczenia robota UR3

Podstawowe parametry tabletu to:

- Rozdzielczość ekranu: 1280 x 800 pikseli
- Waga: 1.6 kg
- Długość kabla: 4.5 m.

2. **Kamera Wrist Camera firmy Robotiq** (rys. 5.5) - system wizyjny firmy Robotiq dostosowany do współpracy z robotami Universal Robots. Umożliwia on wyjątkowo łatwą instalację poprzez umocowanie na kołnierzu robota, eliminując konieczność skomplikowanych procedur montażu. Jego główne zadanie to precyzyjne rozpoznawanie obiektów i przysyłanie kluczowych informacji do robota. Atutem kamery jest możliwość przeprowadzenia zarówno kalibracji, konfiguracji jak i inspekcji wizyjnej bezpośrednio z poziomu sterownika uczącego robota. Eliminuje to konieczność używania zewnętrznego komputera PC, co przyspiesza i upraszcza procesy. Dodatkową unikalną cechą jest funkcja autofocus oraz wbudowane oświetlenie LED, które wspomaga pracę w zróżnicowanych warunkach oświetleniowych. Komunikacja kamery z robotem odbywa się za pośrednictwem kabla USB, zapewniając stabilne połączenie.



Rysunek 5.5: Robotiq Wrist Camera

Do jej podstawowych parametrów należą:

- Minimalne pole widzenia kamery: 100 x 75 mm
- Maksymalne pole widzenia kamery: 360 x 270 mm
- Maksymalna częstotliwość: 30 fps
- Zakres skupiania ostrości: 70 mm do nieskończoności
- Wysokość kamery (z uchwytem montażowym): 23.5 mm
- Waga: 160 g
- Zasilanie: 24 VDC
- Komunikacja: USB 2.0
- Temperatura pracy: 0 – 50°C.

Kamera wykorzystując oświetlenie LED nie tylko precyzyjnie rozpoznaje obiekty, ale także operuje w różnych warunkach oświetleniowych, co zwiększa jej uniwersalność. Dodatkową cechą jest zdolność rozróżniania kolorów, przez co możliwe jest skuteczne identyfikowanie i manipulowanie obiektami w zależności od ich barwy.

3. **Chwytnik 2F-85** (rys. 5.6) - narzędzie sprawdzające się w zastosowaniach przemysłowych, szczególnie w połączeniu z robotami UR. Oferuje elastyczność i kompatybilność z różnymi robotami przemysłowymi. Chwytniki te są przeznaczone do podnoszenia i przemieszczania przedmiotów o różnych gabarytach, kształtach i wagach. Ich ergonomiczny kształt ułatwia obsługę, a intuicyjny interfejs pozwala na łatwe programowanie.



Rysunek 5.6: Chwytnik 2F-85

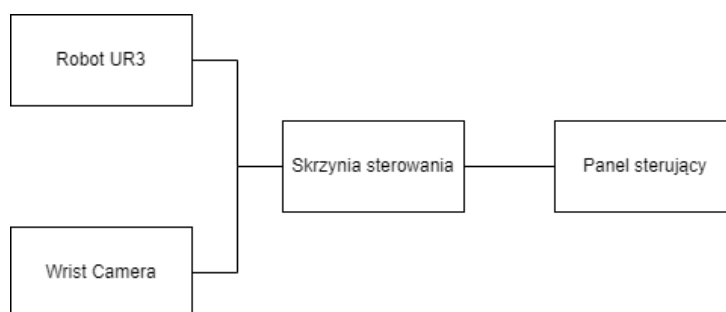
Do parametrów chwytaka należą:

- Maksymalny rozstaw palców: 85 mm
- Siła uchwytu: 20 - 235 N
- Udźwig: do 5 kg
- Waga chwytaka: 0.9 kg
- Szybkość zamykania palców: 20 - 150 $\frac{mm}{s}$.

To jedyny chwytak, z którego korzystano podczas pracy z manipulatorem UR3. Jego wszechstronne możliwości pozwalają na skuteczne wykonywanie różnorodnych zadań. Jego zaawansowane wyposażenie, takie jak czujniki siły, oraz gotowe funkcje pozwalającego na obsługę chwytaka umożliwiają wykonywanie różnorodnych, precyzyjnych i elastycznych operacji.

5.2 Struktura układu z systemem wizyjnym Robotiq

Schemat 5.7 przedstawia architekturę połączeń i komunikacji pomiędzy użytowanymi elementami układu.

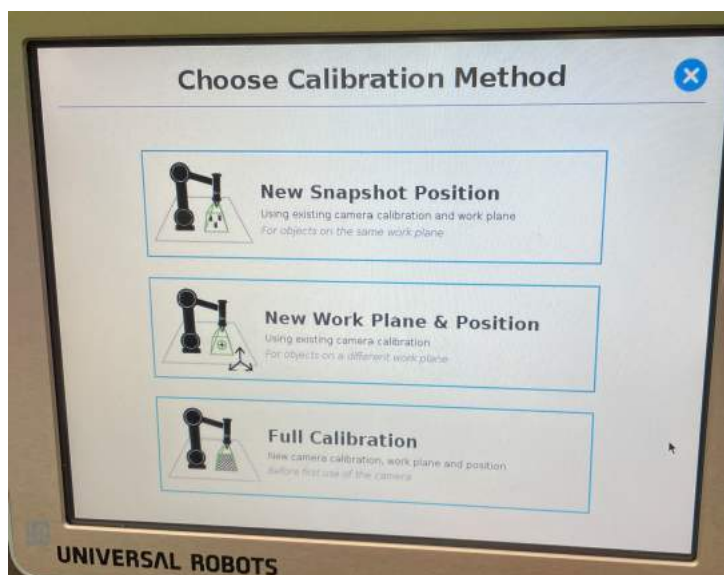


Rysunek 5.7: Topologia modelu

Przedstawiona na rysunku 5.7 struktura zapewnia optymalne działanie skonfigurowanego systemu, jednak wcześniej należy poprawnie zainstalować oprogramowanie kamery oraz wykonać jej konfigurację wraz z kalibracją.

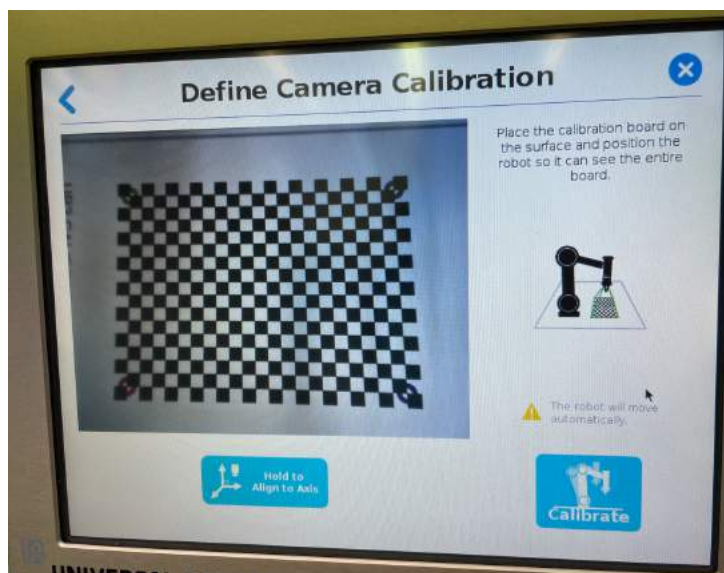
5.3 Konfiguracja systemu

Po poprawnym zamontowaniu kamery na robocie należy zintegrować kamerę z robotem poprzez wgranie dedykowanego, dostarczonego przez firmę Robotiq oprogramowania na Universal Robots. Przed implementacją zadania Bin Picking z użyciem ww. kamery należy przeprowadzić kalibrację urządzenia (rys. 5.8).



Rysunek 5.8: Okno rozpoczęcia kalibracji

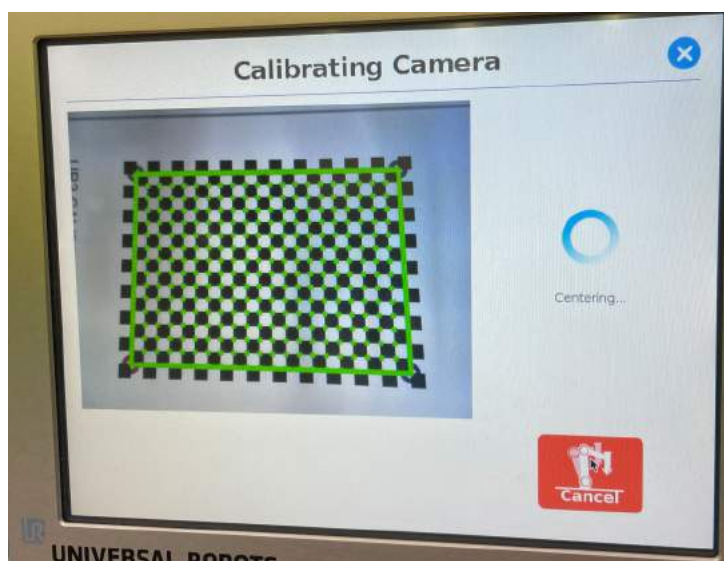
Rozpoczynając proces kalibracji, oprogramowanie prosi o wykonanie tzw. Snapshot'a, co można zrozumieć jako uzyskanie ogólnego widoku przestrzeni roboczej robota w celu zweryfikowania informacji dotyczących pozycji, położenia i orientacji kamery. Sam wybór Snapshot'a opiera się na wybraniu odpowiedniej opcji w zakładce Instalation.



Rysunek 5.9: Szachownica kalibracyjna

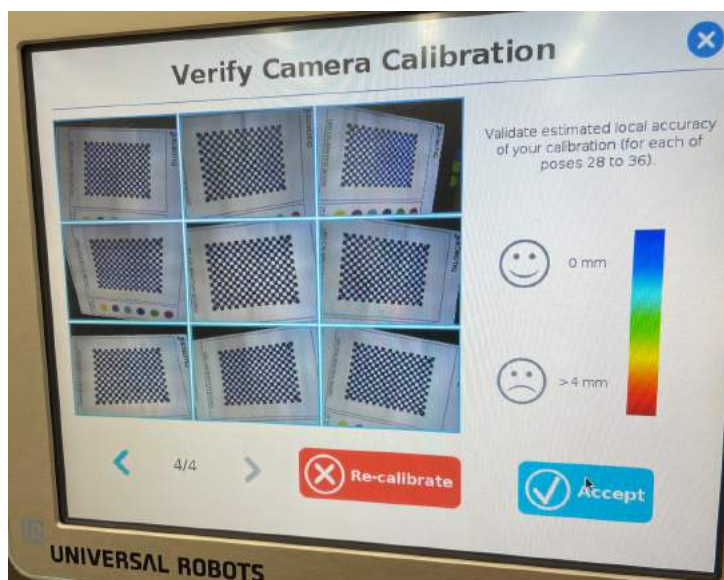
Kolejnym krokiem jest wykorzystanie specjalnej szachownicy kalibracyjnej (patrz rys. 5.9 i umiejscowienie jej tak, aby w pełni znajdowała się w polu widzenia kamery. Następnie

należy wyprostować robota względem osi wykorzystując przycisk *HoldtoAligntoAxis* i dalej wybrać przycisk *Calibrate* aby uruchomić proces automatycznej kalibracji rys. 5.10.



Rysunek 5.10: Proces automatycznej kalibracji

Proces automatycznej kalibracji polega na ustawianiu się robota w 36 różnych od siebie pozycjach, w których kamera robi zdjęcie szachownicy kalibracyjnej z innej perspektywy. Po pomyślnie zakończonej kalibracji pojawia się okno z wynikami kalibracji i możliwością ponownego przeprowadzenia procesu lub akceptacji otrzymanego wyniku (rys. 5.11).



Rysunek 5.11: Ukończona kalibracja

W celu poprawnego rozpoznawania elementów podczas realizacja zadania Bin Picking, po kalibracji następuje etap uczenia obiektów w celu ich odpowiedniej identyfikacji. Korzystając z dostarczonej przez firmę Robotiq funkcji *CamLocate* można rozpocząć naukę rozpoznawania rys. 5.12.



Rysunek 5.12: Nauka rozpoznawania detalu

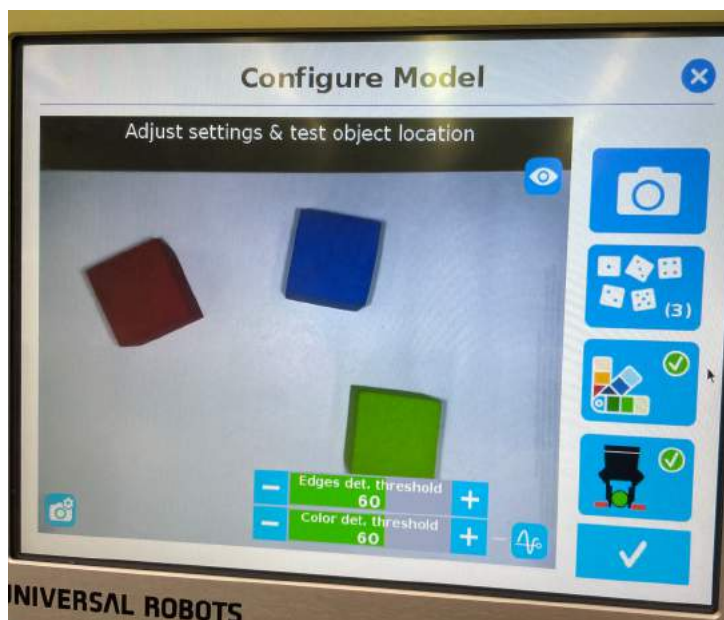
Dzięki opcji automatycznej detekcji obiektu, oprogramowanie samo wykrywa kształt i rozmiary elementu. Do zadań operatora na tym etapie należą (zdj. 5.13):

- Dostosowanie progu rozpoznawania krawędzi przedmiotu - w zależności od uczonego przedmiotu, próg ten może mieć duże znaczenie i wpływ na skuteczność rozpoznawania. W przypadku testowanych kolorowych, sześciennych kostek próg ten mógł być stosunkowo wysoki, co nie utrudniało kamerze wykrywania elementów, ani mylenia ich z innymi figurami.
- Dostosowanie progu rozpoznawania koloru przedmiotu - próg ten, w przypadku gdy zapewniony jest wysoki kontrast pomiędzy kolorami podnoszonych przedmiotów o tym samym kształcie, może być niski, natomiast w przypadku gdy różnice pomiędzy rzeczywistymi kolorami przedmiotów nie są zbyt duże, warto zadbać aby próg ten był wystarczająco wysoki tak, aby zapobiec błędnej interpretacji koloru. Warto natomiast pamiętać, że zbyt wysoki próg może również utrudnić rozpoznawanie koloru przedmiotu, mimo, że jest on taki sam jak ten, na którym odbywało się uczenie.

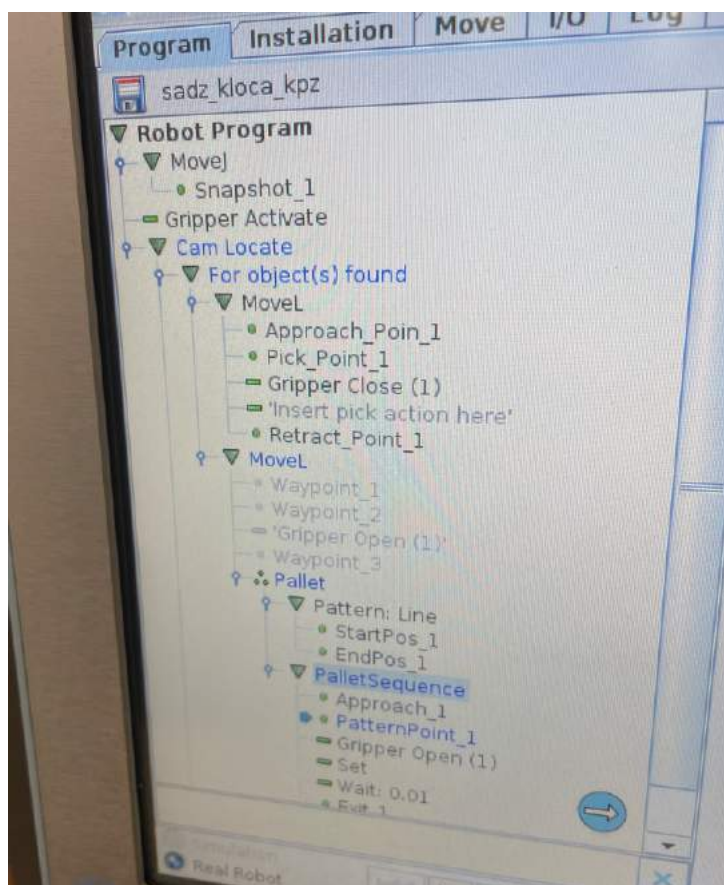
Podczas nauki kształtu jak i koloru podnoszonych elementów warto zadbać o to, aby tło, na którym lokalizowane są przedmioty, miało jednolity kolor. Producent dostarcza swoją platformę w tym celu, lecz również rekomenduje białą kartkę papieru, która została wykorzystana w tym projekcie.

5.4 Realizacja zadania Bin Picking i przeprowadzenie testów

Po poprawnie przeprowadzonej kalibracji oraz nauce pobieranych przedmiotów możliwe było przejście do realizacji zadania Bin Picking. W tym celu został stworzony i zaprogramowany algorytm (rys. 5.14) wykorzystujący wcześniej skalibrowane komponenty.



Rysunek 5.13: Nauka rozpoznawania koloru detalu



Rysunek 5.14: Zaprogramowany algorytm Bin Picking

W algorytmie wyróżnić można kilka oddzielnych sekcji odpowiadających za poszczególne etapy procesu. Należą do nich:

- Przemieszczenie się robota do pozycji wykonywania skanu przestrzeni, gdzie wykryte mają być elementy. Pozycja nazwana została wcześniej jako Snapshot. Dotarcie do

tej pozycji odbywa się poprzez ruch w przestrzeni przegubowej robota.

- Przygotowanie chwytaka do poboru elementu poprzez otwarcie chwytaka do określonej szerokości.
- Wykonanie skanu przez kamerę oraz lokalizacja i wybór elementu do podniesienia. Każde użycie funkcji *CamLocate* odpowiada za proces wykrywania sześciennych kostek.
- Procedura pobierania elementu polega na przesunięciu ramienia robota, względem pozycji wykonania zdjęcia, w kierunku elementu oraz zamknięcie palców chwytaka w celu uchwycenia przedmiotu.
- Bezpieczne oddalenie się ramienia robota wraz z podniesionym elementem.
- Odłożenie podniesionego elementu w wybrane miejsce korzystając z funkcji paletyzacji w celu uformowania podnoszonych elementów w wyznaczonym schemacie.

Podczas przeprowadzanych początkowych testów, jeszcze przed ustawieniem omawianych wcześniej progów, system miał tendencję do niewykrywania niektórych kostek lub też do mylenia kolorów. W ramach optymalizacji procesu eksperymentalnie dobrano progi rozpoznawania zarówno kształtu jak i koloru sześciennych kostek. W przypadku sześciennego kształtu przedmiotów, pomimo wysokiej wartości progu rozpoznawania kształtu, oprogramowanie nie miało problemu z ich wykrywaniem. Próg koloru natomiast miał duże znaczenie, w przypadku porównywania kostek o kolorach chociażby ciemnym czerwonym i niebieskim, próg ten musiał mieć wartość z odpowiedniego przedziału. Po zoptymalizowaniu tych parametrów, oprogramowanie nie miało już żadnego problemu z wykrywaniem jak i rozróżnianiem kolorów przedmiotów, a proces Bin Picking'u przebiegał bezproblemowo, podnosząc i przemieszczając wszystkie widoczne dla kamery nauczone elementy.

Rozdział 6

Analiza porównawcza systemów wizyjnych

W niniejszym rozdziale przeprowadzona zostanie dogłębna analiza porównawcza przetestowanych systemów wizyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem ich architektur, funkcji, skomplikowania konfiguracji i efektywności. Celem tej analizy jest zidentyfikowanie mocnych stron oraz potencjalnych obszarów wymagających poprawy w każdym z systemów, co pozwoli na lepsze zrozumienie ich zastosowań oraz możliwości implementacyjnych. Poprzez szczegółowe porównania parametrów i funkcji, możliwe będzie wskazanie, który z badanych systemów wykazuje się największą skutecznością w realizacji zadania Bin Picking.

6.1 Zalety i wady systemu wizyjnego Photoneo

System wizyjny dostarczony przez firmę Photoneo jest zaawansowanym narzędziem tworzonym przez wiodącego dostawcę rozwiązań w dziedzinie wizji i sztucznej inteligencji dla robotyki. Przeznaczony przez firmę model kamery oraz oprogramowanie odpowiedzialne za proces Bin Picking'u miał swoje charakterystyczne cechy, którymi w pewnych aspektach wyprzedzał konkurencję lecz również z powodu pewnych aspektów widocznie utrudniał cały proces.

6.1.1 Zalety systemu wizyjnego Photoneo

System wyróżnia się spośród innych testowanych systemów ze względu na następujące korzyści:

- Skaner generuje obrazy 3D posiadające głębie, co pozwala robotowi dokładnie określać głębokość, na której ma się poruszać po otrzymaniu danych od systemu wizyjnego. Dzięki tej funkcji robot jest w stanie precyzyjnie określić, na jakiej głębokości ma się znaleźć, aby skutecznie pobierać elementy. Bez tej istotnej opcji, realizacja zadania Bin Picking byłaby mocno utrudniona i wymagałaby dodatkowych informacji o środowisku w jakim znajduje się system.
- Oprogramowanie systemu wizyjnego na potrzeby lokalizacji obiektów opiera się na definicji kształtów poprzez załadowanie modeli CAD tych przedmiotów. To podejście umożliwia obsługę obiektów o złożonych kształtach, co znacząco rozszerza możliwości identyfikacji i lokalizacji.

- Zdefiniowanie kątów orientacji przedmiotów względem różnych osi, w kontekście możliwych pozycji chwytaka, stanowi kluczowy element zwiększający elastyczność systemu. Umożliwia to oprogramowaniu uwzględnienie szerszego zakresu możliwych ustawień i orientacji, w których przedmioty mogą się znajdować. Dzięki tej funkcji chwytak może podejść do przedmiotów pod różnymi kątami, co skutkuje bardziej wszechstronnym i efektywnym procesem pobierania losowo zorientowanych obiektów.
- Skaner posiada wysoką jakość obrazu monochromatycznego.
- Skaner charakteryzuje się dużym obszarem skanowania, co przekłada się na jego zdolność do efektywnego rejestrowania informacji z obszernego zakresu.
- Sterownik posiada dedykowane oprogramowanie do realizacji zadania Bin Picking.
- Elastyczność w tworzeniu wirtualnego modelu 3D środowiska systemu z możliwością uwzględnienia modeli robota, kamery, pojemników oraz obszarów grożących kolizją.

6.1.2 Wady systemu wizyjnego Photoneo

Do wad tego systemu, które wyznaczały przewagę innego systemu wizyjnego należą:

- Brak zdolności rozpoznawania barw, stanowiło ograniczenie w jego zdolnościach rozróżniania elementów. Brak tej funkcji powodował, że w przypadku identycznych kształtów, ale różnych kolorów, skaner nie był w stanie ich efektywnie rozróżniać, co mogło wprowadzać pewne utrudnienia w procesie identyfikacji i analizy obiektów przy zastosowaniu elementów różnokolorowych w zadaniu Bin Picking.
- Kalibracja wymagająca ingerencji programistycznej operatora w celu ustalenia procedur i pozycji robota przy procesie kalibracji. Aspekt ten nie był znaczną przeszkodą dla całego etapu konfiguracji natomiast wprowadzał on dodatkowy poziom skomplikowania, co w przypadku potrzeby szybkiej implementacji zadania mogło wydłużyć ten proces.
- Pomimo możliwości importowania wielu modeli różnych przedmiotów do pobrania, oprogramowanie Bin Picking Studio zezwalało na rozróżnianie tylko z jednego z nich w tym samym czasie. Stanowi to dużą wadę tego systemu jako, że staje się on przez to mniej wszechstronny, np. nie pozwala na realizację zadania sortowania.
- Rozmiar i model skanera miał bezpośredni wpływ na rozmiar wykrywanych obiektów. Każdy model skanerów firmy Photoneo ma sugerowany przedział rozmiarów elementów, które miałyby być przy jego pomocy wykrywane. Poprzez analizę innych modeli skanerów wywnioskowano, że ta konkretna kamera nie była najlepszym wyborem z arsenału możliwości firmy jeśli chodzi o zadanie lokalizacji tego konkretnego rodzaju elementów.

6.2 Zalety i wady systemu wizyjnego Robotiq

Firma Robotiq gwarantuje innowacyjne rozwiązania w dziedzinie automatyzacji przemysłowej. W zakresie tworzenia systemów wizyjnych takich jak Wrist Camera firma ta zdobyła uznanie dzięki zaawansowanym technologiom, które integruje z robotami przemysłowymi, umożliwiając precyzyjne rozpoznawanie i obsługę obiektów.

6.2.1 Zalety systemu wizyjnego Robotiq

System ten różni się od testowanego systemu Photoneo w następujących aspektach:

- Nauka kształtów podnoszonych przedmiotów ograniczała się jedynie do zapamiętania rozmiarów oraz zrobieniu zdjęcia położenia obiektu.
- Daje możliwość rozróżniania nawet podobnych do siebie barw elementów o tym samym kształcie. Dzięki tej funkcji system jest bardziej wszechstronny i skuteczny w różnorodnych warunkach operacyjnych.
- Możliwość określenia minimalnego odstępów między elementami do pobrania. W sytuacji, gdy obiekty są zbyt blisko siebie, oprogramowanie precyzyjnie kieruje chwytak w taki sposób, aby palce mogły skutecznie złapać element tam, gdzie jest najwięcej wolnej przestrzeni.
- Bezproblemowa konfiguracja zadania, charakteryzująca się niezwykle prostotą i szybkością, stanowi dużą zaletę tego systemu. W odróżnieniu od innych testowanych rozwiązań, nie wymaga wysokich kompetencji programistycznych, co sprawia, że jego implementacja jest dostępna dla szerokiego grona użytkowników. Dzięki temu nawet osoby bez zaawansowanego doświadczenia programistycznego mogą sprawnie skonfigurować system, co z pewnością przyczynia się do efektywnego wdrożenia zadania Bin Picking.

6.2.2 Wady systemu wizyjnego Robotiq

Wśród ograniczeń tego systemu, które przyczyniały się do przewagi systemu wizyjnego Photoneo, można wymienić:

- Skaner nie rejestrował obrazów w formie fotografii 3D, co oznaczało brak informacji o głębokości w wykonanych zdjęciach. W związku z tym, oprogramowanie wymagało dodatkowego określenia odległości między robotem podczas wykonywania skanu a skanowaną przestrzenią.
- Z uwagi na ograniczony zakres operacyjny robota UR3, obszar skanowania systemu wizyjnego był istotnie ograniczony w porównaniu do rozwiązania z wykorzystaniem skanera Photoneo. W przypadku Wrist Camera, zainstalowanego bezpośrednio na ramieniu robota, skaner miał niewielki zasięg obejmowania przestrzeni. W przeciwieństwie do tego, skaner Photoneo, nie będąc zamocowanym bezpośrednio na ramieniu robota, posiadał znacznie większy obszar skanowania, co umożliwiało bardziej wszechstronną analizę otoczenia.
- Ograniczenie, którym jest możliwość wykrywania jednorazowo maksymalnie dziesięciu elementów. Brak możliwości jednoczesnego uwzględnienia większej ilości elementów może wprowadzać ograniczenia w efektywności monitorowania obszaru skanowanego przez ten skaner.

6.3 Cechy wspólne obu systemów wizyjnych

Mimo różnic w specyfikacjach i unikatowych cech, analizowane systemy wizyjne wykazywały pewne wspólne aspekty, które korzystnie wpływały na efektywność zadania Bin Picking. Wśród tych wspólnych cech można wyróżnić:

- Oba systemy wizyjne, zarówno Photoneo, jak i Robotiq, charakteryzują się przyjaznymi środowiskami konfiguracyjnymi. Oprogramowania krok po kroku przeprowadzają operatora przez proces konfiguracji, klarownie wyjaśniając wpływ każdego parametru. Co istotne, na każdym etapie konfiguracji istniała możliwość powrotu do wcześniejszych faz i dokonywania edycji według potrzeb, co zwiększa elastyczność dostosowywania ustawień systemu.
- Dzięki swojej wszechstronności, systemy wizyjne oferowały duże możliwości wykorzystania w różnorodnych zadaniach, tworząc rozległe spektrum potencjalnych zastosowań. Ich elastyczność operacyjna sprawiała, że systemy wizyjne mogły być efektywnie dostosowywane do różnych scenariuszy, co znacząco zwiększało ich użyteczność i wartość w szerokim zakresie dziedzin i zastosowań przemysłowych.

Rozdział 7

Podsumowanie

Zgodnie z założeniami przedstawionymi w rozdziale 1, pomyślnie zrealizowano zakres pracy, osiągając wyznaczone cele - zaproponowano efektywny system wizyjny do obsługi zadania Bin Picking realizowanego z wykorzystaniem cobota Doosan oraz opracowano i zamontowano na robocie chwytak, który skutecznie spełniał wymagania związane z tym zadaniem.

W szczególności, dogłębnie porównano dwa systemy wizyjne najchętniej stosowane w kontekście zadania Bin Picking, będącego istotnym zagadnieniem w robotyce. Pobieranie przedmiotów z zatłoczonej sceny znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach, takich jak dostarczanie części w Automatyce Fabrycznej (FA), pobieranie i umieszczanie w Automatyce Magazynowej (WA), czy też sprzątanie za pomocą robotów domowych i innych zastosowań [3]. Jednym z najważniejszych aspektów zastosowywania robotów do tego zadania była ich sensoryczna wizja.

W ramach niniejszej pracy dokonano porównania dwóch skanerów o odrębnych cechach charakterystycznych, wraz z odpowiednim sprzętem pomocniczym i oprogramowaniem. Badania skoncentrowano na ocenie wszechstronności, niezawodności oraz precyzji obu skanerów, mając na celu wyłonienie preferowanego rozwiązania do danego zastosowania. Jednakże, głównym celem było także zwrócenie uwagi na istotne cechy takich systemów wizyjnych, które są kluczowe przy ich selekcji do rozwiązania problemu Bin Picking. W trakcie procesu konfiguracji szczególną uwagę zwrócono na złożoność i wymagania każdego z analizowanych systemów. Celem była nie tylko ocena ich wydajności w obszarze Bin Picking, ale również zrozumienie, jak łatwo można dostosować je do konkretnej aplikacji poprzez proces konfiguracji oraz parametryzacji. Kluczowym elementem było uwzględnienie stopnia dostępności opcji konfiguracyjnych, intuicyjności interfejsu użytkownika oraz ewentualnych trudności, jakie mogą wystąpić podczas tego procesu. Analiza tych aspektów w kontekście konfiguracji była niezbędna dla pełnego zrozumienia potencjalnych wyzwań i korzyści, jakie mogą wyniknąć podczas wdrożenia danego systemu w realnym środowisku. Dzięki temu możliwe było dokładniejsze porównanie i ocena przydatności każdego z systemów w kontekście łatwości konfiguracji, co ma istotne znaczenie w praktycznych zastosowaniach, zwłaszcza w dynamicznych i zmieniających się środowiskach produkcyjnych.

Po zakończeniu pełnej konfiguracji obu systemów, przystąpiono do serii testów skuteczności. Proces ten obejmował stopniowe modyfikacje parametrów w celu doskonalenia wyników testów. Kładziono szczególny nacisk na zwiększanie liczby poprawnie wykrywanych elementów, rozróżniania ich kolorów, a także na optymalizację procesu pobierania tych elementów. W miarę postępów testów, systemy były doskonalone poprzez dostosowywanie parametrów, co prowadziło do zwiększenia precyzji ich działania. Kolejne iteracje

testów umożliwiły uzyskanie optymalnych ustawień, co miało istotne znaczenie dla efektywnego porównania tych systemów.

Analizując otrzymane wyniki testów, można wnioskować, że w zależności od warunków występujących w otoczeniu, w którym planowane jest wdrożenie zadania Bin Picking, oba testowane systemy miały potencjał bycia bardziej użytecznymi w różnych kontekstach. System Robotiq wyróżniał się prostotą implementacji. Jego umiejętność do rozróżniania barw sprawiała, że świetnie radził sobie z zadaniami, gdzie elementy mimo identycznego kształtu wymagały podziału na kolory. Ograniczony obszar skanowania okazał się akceptowalny w przypadku małych przestrzeni roboczych, a możliwość łatwej implementacji, zwłaszcza w tandemie z robotem UR3, zdecydowanie ułatwiła praktyczne zastosowanie w warunkach produkcyjnych. Z drugiej strony, system Photoneo oferował bardziej zaawansowane i elastyczne opcje konfiguracyjne. Wykazywał się szczególną użytecznością w złożonych scenariuszach, takich jak obsługa większych elementów czy identyfikacja obiektów o nieregularnych kształtach. Jednakże, proces konfiguracji w tym przypadku był bardziej czasochłonny, co wymagało większej uwagi i doświadczenia podczas dostosowywania parametrów. Podsumowując, analiza systemów Robotiq i Photoneo ukazała, że oba mogą być efektywne w zależności od konkretnych wymagań i warunków środowiskowych zadania Bin Picking. Jednakże, rozważając długoterminowe i uniwersalne zastosowanie, wydaje się, że istnieje możliwość dobrania lepszego systemu wizyjnego z bardziej zaawansowanym skanerem i oprogramowaniem.

W ramach kontynuacji niniejszej pracy dyplomowej warto byłoby podjąć próbę przeglądu innych, być może bardziej wydajnych systemów wizyjnych, cechujących się większą uniwersalnością, umiarkowanym stopniem komplikacji oraz rozszerzonymi możliwościami konfiguracyjnymi. Taki zestaw cech pozwalałby na bardziej elastyczne dostosowanie do różnych scenariuszy w ramach zadania Bin Picking, bez utraty efektywności czy łatwości konfiguracji.

Bibliografia

- [1] Robot Manipulators Trends and Development. https://books.google.pl/books?hl=pl&lr=&id=u_ugDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=usage+of+industry+manipulators&ots=aVfPCJYVjH&sig=9sR8-ILBNca7Gseo5MgzQqtc5Po&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Data dostępu: 04.12.2023.
- [2] Systemy wizyjne 3D dla przemysłowych zastosowań Bin Picking. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6415038?casa_token=1x0ti1E0FOYAAAAA:jPkqVparjR5WhGBYFU55YexuuwoABvGfjdmIexiPLzHmdW1lJddmVzBrI9TBGCB3NA-OnYpLTg. Data dostępu: 22.11.2023.
- [3] Design of Digital Planner and 3D Vision System for Robot Bin Picking. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01691864.2019.1698463>. Data dostępu: 01.12.2023.
- [4] Karen Sparck Jones. Natural language processing: a historical review. *Current issues in computational linguistics: in honour of Don Walker*, pages 3–16, 1994.
- [5] Instrukcja do systemu wizyjnego Photoneo. https://photoneo.com/files/manuals/BinPicking/Bin_picking_User_Manual_EN_v2.pdf. Data dostępu: 8.10.2023.
- [6] Bin picking – co warto o nim wiedzieć? https://unitem.pl/baza_wiedzy/bin-picking-co-warto-o-nim-wiedziec/. Data dostępu: 14.12.2023.
- [7] Raport: Systemy wizyjne. <https://controlengineering.pl/raport-2020-systemy-wizyjne/>. Data dostępu: 08.11.2023.

Spis rysunków

2.1	Industrial-grade Vision Controller	9
2.2	Nuvis-7306RT	10
2.3	Zestaw Cobota Doosan serii M	10
2.4	Doosan M1013	11
2.5	Doosan M1013 w środowisku rzeczywistym	11
2.6	Urządzenie sterujące manipulatorem	13
2.7	Tablet do programowania ??	13
2.8	Skaner PhoXi 3D Gen2 ??	14
2.9	Zasięg skanowania z widokiem z góry	15
2.10	Zasięg skanowania z widokiem z boku	15
2.11	Model chwytaka OnRobot RG6	16
2.12	Zakres pracy chwytaka OnRobot RG6	17
2.13	Wymiary chwytaka w milimetrach	18
2.14	Model chwytaka z elektromagnesem	18
2.15	Przykład podejścia pod element za pomocą zaprojektowanego chwytaka . .	19
2.16	Topologia modelu	20
3.1	Schemat połączeń elementów układu	21
3.2	Widok kamery w aplikacji PhoXiControl	22
3.3	Konfiguracja połączenia sieciowego	22
3.4	Etapy postępowania w oprogramowaniu Bin Picking Studio	23
3.5	Wybór modelu robota	24
3.6	Zaimportowane modele chwytaków	24
3.7	Pozycjonowanie TCP	25
3.8	Rolki	26
3.9	Kostki	26
3.10	Modele podnoszonych elementów	26
3.11	Definiowanie metody chwytu	27
3.12	Definiowanie etapów trajektorii	28
3.13	Ustawienia systemu wizyjnego	30
3.14	Ustawienia systemu wizyjnego	31
3.15	Lokalizacja przestrzeni skanowania	32
3.16	Kalibracja	33
3.17	Modelowanie środowiska	34
4.1	Symulacja Bin Picking	35
4.2	Wizualizacja procesu Bin Picking	36
4.3	Brak możliwości kontynuowania procesu	38

5.1	Zestaw Cobota firmy Universal Robots: manipulator UR3 wraz z szafą sterowniczą i panelem uczenia	41
5.2	Manipulator UR3	42
5.3	Urządzenie sterujące cobotem UR3	43
5.4	Panel uczenia robota UR3	44
5.5	Robotiq Wrist Camera	45
5.6	Chwytnik 2F-85	46
5.7	Topologia modelu	46
5.8	Okno rozpoczęcia kalibracji	47
5.9	Szachownica kalibracyjna	47
5.10	Proces automatycznej kalibracji	48
5.11	Ukończona kalibracja	48
5.12	Nauka rozpoznawania detalu	49
5.13	Nauka rozpoznawania koloru detalu	50
5.14	Zaprogramowany algorytm Bin Picking	50

Spis tabel

2.1	Tabela ruchliwości przegubów Doosan M1013	12
5.1	Tabela ruchliwości przegubów UR3	43