

Programowa realizacja różnych schematów paletyzacji worków z luźną zawartością wykonywana robotem przemysłowym

Jacek Dunaj

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

Streszczenie: W artykule opisano uniwersalny algorytm sterowania robotem przemysłowym paletyzującym worki z luźną zawartością. Algorytm ten zastosowano w zrobotyzowanej linii naważania i paletyzacji worków z cukrem w Cukrowni Nakło. Przedstawiono powody, dla których zdecydowano się na takie rozwiązanie, opisano sposób definiowania narzędzi, układów współrzędnych użytkownika i punktów referencyjnych, wykorzystywanych w aplikacji. Przedstawiono sposób przygotowania danych umożliwiających paletyzację dwóch rodzajów worków układanych zgodnie z dwoma różnymi schematami paletyzacji.

Słowa kluczowe: paletyzacja, robot paletyzujący, układ współrzędnych użytkownika, narzędzie robota, punkt referencyjny, chwytak, język KRL

1. Wprowadzenie

W marcu 2018 r. Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP oddał do eksploatacji linię naważania i paletyzacji worków z cukrem w Cukrowni Nakło w Nakle nad Notecią. Kontrakt na budowę linii zawarty z Krajową Spółką Cukrową „Polski Cukier” przewidywał paletyzację następujących elementów:

- worków polipropylenowych zawierających po 50 kg cukru, układanych w siedmiu warstwach po trzy worki w każdej warstwie,
- worków polipropylenowych zawierających po 25 kg cukru, układanych w siedmiu lub ośmiu warstwach, po 2 × 2 worki.

W obu przypadkach worki po napełnieniu miały być zaszywane.

W trakcie montażu linii ze strony zamawiającego pojawiały się pytania, czy możliwe będzie takie zaprogramowanie robota, aby w przyszłości mógł on paletyzować inny rodzaj worków, np. worki polipropylenowe wentylowe (zamykane po napełnieniu rodzajem wentyla) oraz worki papierowe zaszywane. Pytania dotyczyły także możliwości realizacji innych schematów paletyzacji worków, tj. innego porządku układania ich na paletach oraz wykorzystania palet o innych wymiarach niż stosowane standardowe europalety. Zdecydowano się tak zrealizować aplikację robota paletyzującego, aby w przyszłości niewielkim nakładem kosztów można było uwzględnić wszystkie wspomniane sugestie.

Autor korespondujący:

Jacek Dunaj, jdunaj@piap.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 28.03.2018 r., przyjęty do druku 22.06.2018 r.



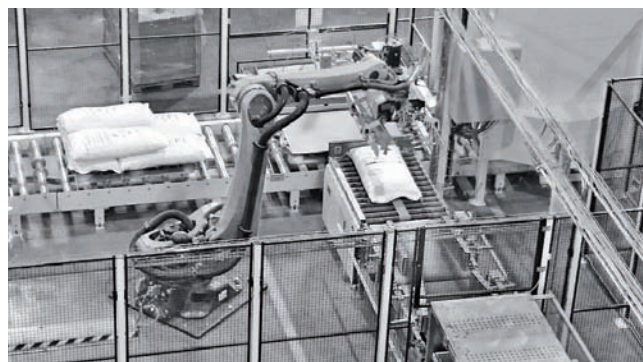
Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

Artykuł ten opisuje, w jaki sposób zaprojektowano aplikację dla robota paletyzującego KUKA KR 180-3200 PA.

2. Układy współrzędnych i zdefiniowane narzędzia

Stanowisko robotowe w Cukrowni Nakło (rys. 1) – część linii naważania i paletyzacji – składa się z pojedynczego robota KUKA KR 180-3200 PA. W jego przestrzeni roboczej znajduje się rolkowy transporter worków ze stanowiska naważania oraz rolkowy transporter palet. Transportery są ustawione względem siebie pod kątem 90°.

Zastosowany robot jest robotem paletyzującym, ma tylko cztery stopnie swobody. Nie można więc definiować narzędzi zamocowanych do jego kołnierza najprostszą metodą 4-punktową [2]. Ułatwieniem natomiast jest to, że punkty TCP wszystkich zdefiniowanych narzędzi dobrano tak, że znajdują się na osi A6 manipulatora robota. Konsekwencją jest to, że współrzędne X i Y danego punktu TCP są równe 0 i wszystkie kąty wyznacza-



Rys. 1. Stanowisko z robotem paletyzującym do układania worków z cukrem na palecie

Fig. 1. Stand with a palletizing robot for stacking bags of sugar on a pallet

jące orientację narzędzia są także równe 0°. Definiując te punkty trzeba tylko znaleźć ich współrzędne Z, określające odległości punktu TCP narzędzia od środka kołnierza robota. Odległości te można ustalić na podstawie pomiarów. Aplikacja robota wykorzystuje trzy narzędzia:

1. Tool[1] o nazwie ChwytakNieobciążony – punkt TCP jest punktem wirtualnym, znajduje się na przecięciu osi obrotu A6 manipulatora z płaszczyzną wyznaczoną przez zamknięte ramiona „widel” chwytaka, w odległości 470 mm od środka kołnierza.
2. Tool[2] o nazwie ChwytakObciążony_50. Ze względu na położenie punktu TCP i orientację narzędzie nr 2 jest identyczne jak narzędzie nr 1, różnica polega na innych parametrach obciążeniowych, nie związanych z wymiarami.
3. Tool[16] o nazwie PrętPomiarowy – punkt TCP znajduje się na osi obrotu A6 manipulatora, w odległości 727 mm od środka kołnierza. Pręt pomiarowy to walec o średnicy 20 mm, nagwintowany z jednej strony i zakończony stożkiem z drugiej strony. Narzędzie to „powstaje” po wkręceniu pręta w nagwintowany otwór w śrubie skręcającej chwytak, znajdującej się na osi obrotu A6 manipulatora. Narzędzie to zostało wykorzystane tylko do definiowania układów współrzędnych użytkownika.

Aby efektywnie programować robota zdefiniowano układy współrzędnych użytkownika. W aplikacji paletyzującej stosowane są trzy układy współrzędnych prostokątnych:

1. Układ współrzędnych uniwersalnych \$NULLFRAME, związany z podstawą robota:
 - dodatni kierunek osi X wyznacza prosta od podstawy robota do hipotetycznego punktu przecięcia transportera worków z transporterem palet,
 - dodatni kierunek osi Y wyznacza prosta od podstawy robota do mniej więcej wagi worków posadowionej poza ogrodzeniem z robotem,
 - dodatni kierunek osi Z wyznacza pionowa prosta od podstawy robota w górę.
2. Układ współrzędnych użytkownika Base[1] o nazwie TransporterZasilajacy związany z transporterem worków:
 - dodatni kierunek osi X wyznacza prosta równoległa do kierunku ruchu transportera worków i skierowana przeciwnie do ruchu tego transportera,
 - dodatni kierunek osi Y wyznacza prosta prostopadła do kierunku ruchu transportera worków i skierowana od robota,
 - dodatni kierunek osi Z wyznacza pionowa prosta od transportera worków w górę.
3. Układ współrzędnych użytkownika Base[2] o nazwie TransporterOdkładczy związany z transporterem palet:
 - dodatni kierunek osi X wyznacza prosta równoległa do kierunku ruchu transportera palet i skierowana przeciwnie do ruchu tego transportera,
 - dodatni kierunek osi Y wyznacza prosta prostopadła do kierunku ruchu transportera palet i skierowana od robota,
 - dodatni kierunek osi Z wyznacza pionowa prosta od transportera palet w górę.

Osie X układów współrzędnych użytkownika są równoległe do odpowiednich transporterów, ale przeciwnie skierowane niż ruch danego transportera. Skutkuje to tym, że kierunki osi Z wszystkich układów współrzędnych, w tym układu współrzędnych uniwersalnych \$NULLFRAME, są skierowane pionowo w górę.

Dobłą praktyką przy budowie stanowiska z robotem jest oznaczanie na jego elementach charakterystycznych punktów, pozwalających zdefiniować lub skorygować układy współrzędnych użytkownika. W przypadku stanowiska w Cukrowni Nakło nie zrobiono tego, ponieważ punkty te znajdują się na ruchomych rolkach obu transporterów i wyznaczono je za pomocą arkusza blachy o grubości 3 mm, tymczasowo ułożonego na rolkach. Z każdym układem współrzędnych użytkownika jest związany tylko jeden punkt referencyjny.

3. Kluczowe punkty aplikacji stanowiska

Punkt HOME

Punkt HOME jest punktem wyjściowym do wykonywania wszystkich aplikacji robota. W Cukrowni Nakło jego położenie dobrano tak, aby manipulator nie utrudniał dostępu do wszystkich elementów stanowiska z robotem, a jednocześnie, aby odległość od obu transporterów (worków i palet) była niewielka. Położenie poszczególnych osi manipulatora robota to:

A1:	0,00°
A2:	-135,00°
A3:	90,00°
A4:	0,00° (wartość stała)
A5:	135,00° (wartość stała)
A6:	3,2°

W punkcie HOME manipulator pozostaje skierowany pod kątem około 45° w stosunku do kierunków obu transporterów z osią A2 ustawioną pod kątem 45° w stosunku do pionu.

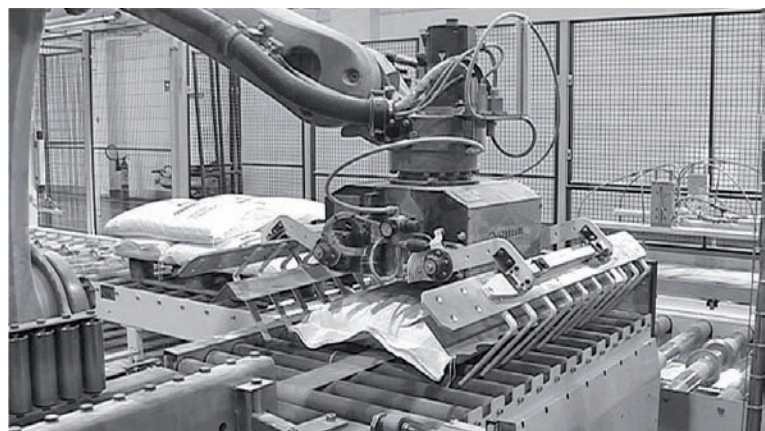
Punkt Pkt _ TransportZasilajacy

Jest to punkt referencyjny, względem którego aplikacja wyznacza położenie kolejnych punktów roboczych wykorzystywanych do podejmowania worków z transportera. Punkt ten zdefiniowano przy pomocy narzędzia i w układzie współrzędnych:

```
Base[1]: TransporterZasilajacy
Tool[1]: ChwytakNieobciążony
```

Jego położenie wyznaczono przy zamkniętym chwytaku ustawionym w położeniu:

- dolna powierzchnia wyznaczona przez widły chwytaka musi znajdować się ok. 3 mm powyżej płaszczyzny rolek transportera worków,
- obie ramy nośne z przykręconymi widłami należy ustawić równoległe do kierunku ruchu transportera w jednakowej odległości od końcówek jego rolek,
- pierwsza para widel chwytaka powinna znajdować się między pierwszymi dwoma rolkami transportera worków,
- ostatnia para widel chwytaka powinna znajdować się między ostatnimi dwoma rolkami transportera worków.



Rys. 2. Podejmowanie worka z transportera. Punkt podejmowania Pkt _ TransportZasilajacy wyznacza się przy zamkniętym chwytaku bez obecności worka

Fig. 2. Taking the bag from the conveyor. Point of making Pkt _ TransportZasilajacy is determined when the gripper is closed without the bag being present

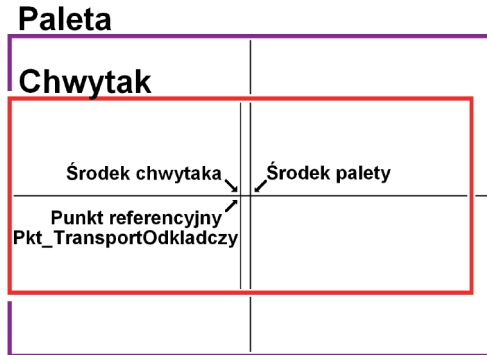
Punkt Pkt _ TransportOdkładczy

Jest to punkt referencyjny, względem którego aplikacja wyznacza położenie kolejnych punktów roboczych wykorzystywanych podczas odkładania worków na palecie. Punkt ten zdefiniowano za pomocą narzędzia i w układzie współrzędnych:

```
Base[2]: TransporterOdkładczy
Tool[1]: ChwytakNieobciążony
```

Aby wyznaczyć jego położenie należało wstępnie ustawić paletę w położeniu roboczym:

- czoło palety musi dotykać wysuwanego bolca blokującego jej przejazd,
- środkowa belka nośna palety powinna znajdować się pośrodku pierścieniowych prowadnic centrujących paletę na transporterze rolkowym.



Rys. 3. Schemat ilustrujący wzajemne położenie palety i chwytaka podczas wyznaczania punktu referencyjnego $Pkt_TransportOdkładczy$. Położenie punktu wyznacza środek chwytaka

Fig. 3. Diagram illustrating the mutual position of the pallet and the gripper when determining the reference point $Pkt_TransportOdkładczy$. The position of the point is determined by the center of the gripper

Położenie punktu wyznaczono przy zamkniętym chwytaku ustawionym w następującym położeniu:

- dolna powierzchnia wyznaczona przez widły chwytaka musi znajdować się ok. 2 mm nad powierzchnią palety,
- oś symetrii między obu rzędami widel powinna pokrywać się z osią symetrii palety (obie osie są równoległe do kierunku ruchu transportera palet),
- płaszczyzna wyznaczona przez czoło chwytaka powinna pokrywać się z boczną powierzchnią palety dotykającą bolca blokującego przejazd palety.

4. Algorytm działania

Algorytm realizujący podejmowanie worków z transportera i układania ich na palecie jest uniwersalny, tzn. zapewnia możliwość ich przekładania niezależnie od liczby warstw układanych na palecie, liczby worków w warstwie, sposobu układania worków oraz wymiarów palety. Wszystkie czynniki mające tutaj znaczenie zostały sparаметryzowane.

Schemat paletyzacji narzuca nadrzędny sterownik PLC podczas uruchamiania programu aplikacyjnego robota w trybie roboczym **Zewnętrznej Automatyki**. W tym trybie sterownik robota wywołuje systemową procedurę `cell.src`, która odczytuje stan ośmiu wybranych sygnałów dwustanowych ze sterownika PLC. Stan tych sygnałów określa schemat paletyzacji – sposób układania worków na palecie, liczbę warstw i liczbę worków w każdej warstwie.

Niezależnie od przyjętego schematu paletyzacji do sterowania układaniem worków na palecie aplikacja robota wykorzystuje wartości zmiennych:

INT NrUkładanejWarstwy

- określa numer układanej warstwy – przenosząc work z transportera worków na paletę aplikacja robota na podstawie jej wartości określa, w której warstwie (na którym poziomie w stosunku do palety) work ten ma zostać odłożony. Wartość zmiennej podczas układania stosu na palecie

odkładczej może zmieniać się od wartości 1 do wartości określonej zmienną `MaxNrUkładanejWarstwy`. Jeżeli

`NrUkładanejWarstwy > MaxNrUkładanejWarstwy` oznacza to, że na palecie ułożono już wszystkie worki i należy przemieścić ją poza strefę działania robota;

INT NrWorka_wWarstwie

- określa numer miejsca w układanej warstwie, gdzie ma zostać odłożony work. Wartość tej zmiennej podczas układania kolejnej warstwy zmienia się od wartości 1 do wartości określonej zmienną `MaxNrWorka`. Jeżeli:

`NrWorka_wWarstwie > MaxNrWorka_wWarstwie` oznacza to, że warstwa została skompletowana i należy zwiększyć o 1 wartość zmiennej `NrUkładanejWarstwy` a zmienną `NrWorka_wWarstwie` ustawić na 1;

INT MaxNrUkładanejWarstwy

- zmienna ta określa ile maksymalnie warstw worków ma zostać ułożonych na palecie. Jej wartość nie ulega zmianie podczas układania worków dla wybranego schematu paletyzacji;

INT MaxNrWorka_wWarstwie

- zmienna ta określa ile maksymalnie worków ma zostać ułożonych w każdej warstwie (zakłada się, że wszystkie warstwy będą zawierać tę samą liczbę worków). Jej wartość nie ulega zmianie podczas układania worków dla wybranego schematu paletyzacji.

Uwzględniając sytuację awaryjną – podczas układania work może spaść z ułożonego stosu, albo operator linii zauważy, że odłożony work jest uszkodzony – w aplikacji robota uwzględniono możliwość ręcznej modyfikacji wartości zmiennych `NrUkładanejWarstwy` i `NrWorka_wWarstwie`. Aplikacja robota przekazuje do sterownika PLC informację o aktualnych wartościach tych zmiennych za pomocą 8 wyjściowych sygnałów dwustanowych z robota (po 4 sygnały na każdą zmienną). Podobnie aplikacja sterownika PLC za pomocą kolejnych 8 sygnałów wejściowych do robota umożliwia ustawianie wartości wymienionych zmiennych – robot może powtórnie ułożyć work w tym samym miejscu, co poprzednio odłożony.

Robot rozpocznie czynności związane z podejmowaniem worka z transportera worków i odłożenia go na palecie, gdy wejściowe sygnały dwustanowe: `ZezwoleniePodjecia`, `ZezwolenieOdlozenia`, `CzujnikCisnienia` oraz `ZezwoleniePrzekladania` mają wartości `TRUE`.

Pierwszy z nich oznacza, że na transporterze worków znajduje się work do podjęcia, drugi – na transporterze znajduje się paleta, na której work ma zostać odłożony, trzeci – wartość ciśnienia powietrza zasilającego chwytak jest prawidłowa, a czwarty oznacza dodatkowe zezwolenie ze sterownika PLC na wykonanie operacji. Wyzerowaniem ostatniego sygnału (`FALSE`) sterownik PLC sygnalizuje, że robot ma przerwać przenoszenie worków i wykonać czynność dodatkową, np. zmodyfikować narzucone przez sterownik PLC nowe wartości zmiennej `NrUkładanejWarstwy` oraz zmiennej `NrWorka_wWarstwie`. Po podjęciu worka wszystkie czynności związane z jego przemieszczeniem i odłożeniem na paletę mogą być przerwane tylko przez system bezpieczeństwa linii.

W chwili rozpoczęcia ruchu manipulatora w kierunku transportera zasilającego aplikacja robota ustawia wartość `TRUE` sygnału dwustanowego `WykonywaniePaletyzacji` do sterownika PLC. Oznacza to, że paletyzacja pojedynczego worka jest w trakcie realizacji. Zmiana wartości na `FALSE` nastąpi po odłożeniu worka na paletę i wycofaniu manipulatora na bezpieczną odległość od stosu ułożonego na palecie. Niezależnie od sygnału `WykonywaniePaletyzacji`, aplikacja robota potwierdza krótkotrwałymi sygnałami typu `PULSE` wykonanie czynności podjęcia i odłożenia worka:

```
ACK_PodjecieOK      = TRUE
ACK_OdlozenieOK     = TRUE
```

Sygnały te informują aplikację sterownika PLC, że manipulator robota oddalił się na odległość umożliwiającą bezkolizyjny ruch transportera worków i transportera palet w kierunku owiarki folią.

Aplikacja robota podczas wykonywania paletyzacji zlicza ułożone warstwy i worki w warstwie:

- jeśli paleta nie została zapelniona, to manipulator robota jest przesuwany znad palety nad transporter worków i z otwartym chwytakiem oczekuje na kolejny worek. Jeśli w czasie 60 s kolejny worek nie znajdzie się w pozycji do pobierania, to po zamknięciu chwytaka manipulator zostaje przesunięty do pozycji HOME i w tym punkcie dalej oczekuje na worek,
- jeśli paleta została zapelniona, to po zamknięciu chwytaka manipulator zostaje przesunięty do pozycji HOME. Informację o zapelnieniu palety aplikacja robota wysyła do sterownika PLC w postaci krótkotrwałego sygnału typu PULSE:

```
ACK_PaletaOK = TRUE
```

a następnie sterowanie jest przekazywane do systemowej procedury `cell.src`.

Wyznaczanie współrzędnych punktu podejmowania worka z transportera

Punkt podejmowania worków z transportera rolkowego jest stały, niezależnie od przyjętego schematu paletyzacji i gabarytów worka, ponieważ tylko w jednym położeniu chwytaka jego widły mogą zostać wsunięte między rolki transportera i zamknięte pod workiem (rys. 2). Współrzędne tego punktu są wyznaczone względem współrzędnych punktu referencyjnego `Pkt_TransportZasilajacy` w taki sposób, że modyfikacji o 5 mm ulega tylko współrzędna Z tego punktu (punkt podejmowania worka znajduje się 5 mm poniżej punktu `Pkt_TransportZasilajacy`, wartości pozostałych współrzędnych pozostają bez zmiany).

Wyznaczanie współrzędnych punktów odkładania worków na paletę

Współrzędne wszystkich punktów, w których robot odkłada kolejne worki na paletę są wyznaczone względem punktu roboczego `Pkt_TransportOdkladczy`. Język KRL (KUKA Robot Language) do programowania robotów KUKA zapewnia możliwość definiowania tablic wielowymiarowych oraz indeksowania ich poszczególnych elementów. W języku KRL, odmiennie niż w językach wysokiego poziomu C/C++, indeksy tablic rozpoczynają się od 1, a więc bez dodatkowej modyfikacji można wykorzystać aktualne wartości zmiennych `NrUkladanejWarstwy` i `NrWorka_wWarstwie`. Mechanizm ten wykorzystano do określania współrzędnych punktów odkładania worków na paletę.

W aplikacji robota zdefiniowano cztery tablice pomocnicze:

```
DECL INT WysokoscWarstwy [10]
DECL INT UkkladWarstwy_OFFSET_X [10, 6]
DECL INT UkkladWarstwy_OFFSET_Y [10, 6]
DECL INT UkkladWarstwy_OBROT_A [10, 6]
```

Zadeklarowane wymiary odnoszą się do maksymalnej liczby warstw układanych na palecie (10) i maksymalnej liczby worków w warstwie (6), jakie może obsługiwać aplikacja.

Po wyborze schematu paletyzacji, w pierwszym kroku aplikacja określa wartości zmiennej: `MaxNrUkladanejWarstwy` oraz zmiennej `MaxNrWorka_wWarstwie`, a następnie wypełnia jednowymiarową tablicę `WysokoscWarstwy []`. Jej kolejne elementy określają, na jakiej wysokości nad paletą musi zostać otwarty chwytak, aby odłożyć worek kompletując daną warstwę. Tablica zawiera wartości korekt, o jakie należy zmodyfikować współrzędną Z punktu referencyjnego `Pkt_TransportOdkladczy`, aby wyznaczyć współrzędną Z punktu odkładania worka w danej warstwie. Wartości poszczególnych elementów tablicy wyznaczono na podstawie doświadczalnych pomiarów.

W trakcie wykonywania programu rolę indeksu tablicy `WysokoscWarstwy []` pełni zmienna `NrUkladanejWarstwy`.

Aby wyznaczyć wartości korekt, o jakie należy zmodyfikować współrzędne X i Y punktu referencyjnego `Pkt_TransportOdkladczy` w celu wyznaczenia współrzędnych X i Y punktu odkładania worka w danej warstwie posłużono się dwiema tablicami `UkladWarstwy_OFFSET_X [,]` oraz `UkladWarstwy_OFFSET_Y [,]`.

Są to tablice dwuwymiarowe, których pierwszy indeks określa numer warstwy – zmienna `NrUkladanejWarstwy`; drugi indeks – zmienna `NrWorka_wWarstwie` określa numer worka w warstwie. Każdy element tych tablic określa odpowiednio korektę współrzędnych X i Y względem punktu referencyjnego `Pkt_TransportOdkladczy`, w obliczeniach których uwzględniono m.in. wymiary palety i worka, długość chwytaka, wysunięcie worka poza chwytak podczas podejmowania, wartość przesunięcia zawartości worka podczas przemieszczania chwytaka w kierunku zgodnym z ruchem transportera palet.

Elementy ostatniej zadeklarowanej tablicy pomocniczej `UkladWarstwy_OBROT_A [,]` zawierają informacje określające kąt, o jaki ma być obrócony chwytak w stosunku do jego położenia w punkcie `Pkt_TransportOdkladczy`, aby prawidłowo odłożyć worek. Tablica jest indeksowana identycznie jak tablice `UkladWarstwy_OFFSET_X [,]` i `UkladWarstwy_OFFSET_Y [,]`.

Schemat działania programu

Krok 1. – start programu

Odczytanie sygnałów dwustanowych ze sterownika PLC określających schemat paletyzacji i sprawdzenie, czy odczytana kombinacja określa zaimplementowany schemat:

- Tak – przejście do kroku 2,
- Nie – wyświetlenie na panelu programowania robota komunikatu o błędzie i zakończenie wykonywania programu.

Krok 2.

Zainicjowanie zmiennych odpowiadających wybranemu schematowi paletyzacji:

```
MaxNrUkladanejWarstwy
MaxNrWorka_wWarstwie
WysokoscWarstwy [ ]
UkladWarstwy_OFFSET_X [ , ]
UkladWarstwy_OFFSET_Y [ , ]
UkladWarstwy_OBROT_A [ , ]
```

Krok 3.

Ustawienie wartości początkowych zmiennych określających początkowy numer układanej warstwy i początkowy numer worka w warstwie. Zmienne te służą do zliczania krotności wykonywania pętli programowych oraz do indeksowania tablic pomocniczych, zainicjowanych w kroku 2:

```
NrUkladanejWarstwy = 1
NrWorka_wWarstwie = 1
```

Krok 4.

Wyzerowanie sygnałów dwustanowych do sterownika PLC potwierdzających zrealizowanie kolejnych czynności paletyzacji:

```
WykonywaniePaletyzacji = FALSE
ACK_PodjecieOK = FALSE
ACK_OdlozenieOK = FALSE
ACK_PaletaOK = FALSE
```

Krok 5. – początek głównej pętli programu

Odczyt sygnałów dwustanowych zezwalających na podjęcie worka z transportera i odłożenie go na paletę:

`ZezwoleniePodjecia`, `ZezwolenieOdlozenia`, `CzujnikCisnienia` oraz `ZezwoleniePrzekladania`. Czy wszystkie te sygnały mają wartość TRUE:

- Tak – przejście do kroku 6,
- Nie – powtórne wykonanie kroku 5.

Krok 6. – podjęcie worka z transportera

- wystawienie sygnału do sterownika PLC informującego o wykonywaniu paletyzacji:
WykonywaniePaletyzacji = TRUE
- przesunięcie manipulatora nad transporter worków,
- otworzenie chwytaka,
- wybranie układu współrzędnych użytkownika nr 1 o nazwie TransporterZasilajacy związanego z transporterem worków:
\$BASE = BASE_DATA[1]
- wybranie narzędzia nr 1 o nazwie ChwytnakNieobciążony:
\$TOOL = TOOL_DATA[1]
- obliczenie współrzędnych punktu podejmowania worka PktPodjeciaWorka względem punktu referencyjnego XPkt_TransportZasilajacy. Punkt podejmowania worka ma te same współrzędne X i Y co punkt referencyjny, różnica 5 mm dotyczy tylko współrzędnej Z:
PktPodjeciaWorka = XPkt_TransportZasilajacy
PktPodjeciaWorka.Z = PktPodjeciaWorka.Z - 5
- przesunięcie manipulatora do punktu PktPodjeciaWorka:
LIN PktPodjeciaWorka
- zamknięcie chwytaka,
- wybranie narzędzia nr 2 o nazwie ChwytnakObciążony_50:
\$TOOL = TOOL_DATA[2]
- przesunięcie manipulatora nad transporter worków,
- wystawienie sygnału dwustanowego do sterownika PLC informującego o podjęciu worka i wycofaniu manipulatora na bezpieczną odległość od transportera:
PULSE (ACK_PodjecieOK, TRUE, 1.0)

Krok 7.

Przesunięcie manipulatora nad paletę. Ruch odbywa się w układzie współrzędnych uniwersalnych związanych z podstawą robota.

Krok 8.

Obliczenie współrzędnych punktu odkładania worka PktOdkladaniaWorka względem punktu referencyjnego XPkt_TransportOdkladczy. Odpowiednie korekty (offsety) są odczytywane z tablic pomocniczych indeksowanych przez zmienne NrUkladanejWarstwy i NrWorka_wWarstwie:

```

OFF_Z = WysokoscWarstwy [NrUkladanejWarstwy]
OFF_X = UkladWarstwy_OFFSET_X
      [NrUkladanejWarstwy, NrWorka_wWarstwie]
OFF_Y = UkladWarstwy_OFFSET_Y
      [NrUkladanejWarstwy, NrWorka_wWarstwie]
OBR_A = UkladWarstwy_Obrot_A
      [NrUkladanejWarstwy, NrWorka_wWarstwie]
PktOdkladaniaWorka = XPkt_TransportOdkladczy
PktOdkladaniaWorka.X = PktOdkladaniaWorka.X
      + OFF_X
PktOdkladaniaWorka.Y = PktOdkladaniaWorka.Y
      + OFF_Y
PktOdkladaniaWorka.Z = PktOdkladaniaWorka.Z
      + OFF_Z
PktOdkladaniaWorka.A = PktOdkladaniaWorka.A
      + OBR_A

```

Krok 9. – odłożenie worka

- wybranie układu współrzędnych użytkownika nr 2 o nazwie TransporterOdkladczy związanego z transporterem palet:
\$BASE = BASE_DATA[2]
- przesunięcie manipulatora do punktu PktOdkladaniaWorka:
LIN PktOdkladaniaWorka
- otworzenie chwytaka,
- wybranie narzędzia nr 1 o nazwie ChwytnakNieobciążony:
\$TOOL = TOOL_DATA[1]
- przesunięcie manipulatora nad transporter palet i zamknięcie chwytaka,

- wystawienie sygnału dwustanowego do sterownika PLC informującego o odłożeniu worka na paletę i wycofaniu manipulatora na bezpieczną odległość od palety:
PULSE (ACK_OdlozenieOK, TRUE, 1.0)
- wystawienie sygnału dwustanowego do sterownika PLC informującego o zakończeniu wszystkich czynności związanych z paletyzacją worka:
WykonywaniePaletyzacji = FALSE

Krok 10.

Zwiększenie o 1 licznika worków w warstwie:

```
NrWorka_wWarstwie = NrWorka_wWarstwie + 1
```

oraz sprawdzenie, czy zawartość licznika jest większa od wartości MaxNrWorka_wWarstwie:

- Tak – wstawienie do licznika NrWorka_wWarstwie wartości 1 i przejście do kroku 11,
- Nie – zamknięcie chwytaka, przesunięcie manipulatora do pozycji oczekiwania na kolejny work (pozycja nad transporterem worków lub pozycja HOME, w obu przypadkach ruch odbywa się w układzie współrzędnych uniwersalnych związanych z podstawą robota) i przejście do kroku 5.

Krok 11.

Zwiększenie o 1 licznika warstw ułożonych na paletce:

```
NrUkladanejWarstwy = NrUkladanejWarstwy + 1
```

i sprawdzenie, czy zawartość tego licznika jest większa od wartości zmiennej MaxNrUkladanejWarstwy:

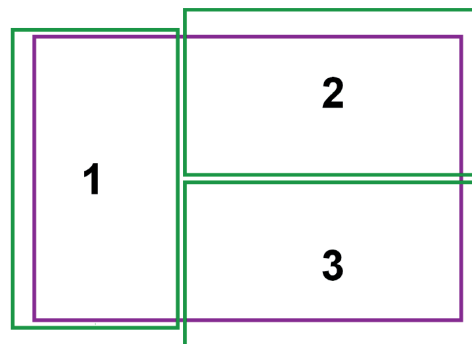
- Tak – przejście do kroku 12,
- Nie – zamknięcie chwytaka, przesunięcie manipulatora do pozycji oczekiwania na kolejny work (pozycja nad transporterem worków lub pozycja Home, w obu przypadkach ruch odbywa się w układzie współrzędnych uniwersalnych, związanych z podstawą robota) i przejście do kroku 5.

Krok 12.

- wystawienie sygnału dwustanowego do sterownika PLC informującego o ułożeniu wszystkich worków na paletce:
PULSE (ACK_PaletaOK, TRUE, 1.0)
- wycofanie manipulatora do pozycji HOME,
- koniec programu.

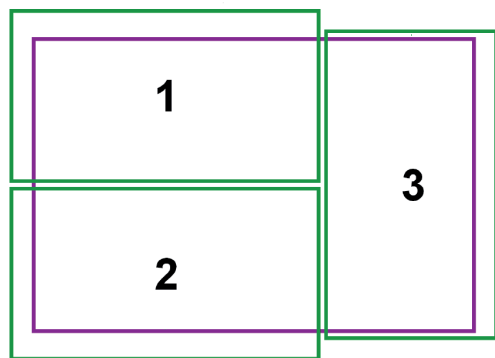
5. Paletyzacja worków polipropylenowych 50 kg

Punkty odkładania worków na paletce nie są definiowane metodą uczenia. Ich położenie aplikacja wyznacza jako przesunięcie (offset) i obrót chwytaka względem pojedynczego punktu



Rys. 4. Schemat układania worków 50 kg na paletce w warstwach nieparzystych. Liczby oznaczają kolejność układania worków na paletce, transporter palet porusza się w lewo

Fig. 4. Diagram of laying 50 kg bags on a pallet in odd layers. The numbers indicate the order in which the bags are stacked on the pallet, the pallet conveyor moves to the left



Rys. 5. Schemat układania worków 50 kg na paletcie w warstwach parzystych. Liczby oznaczają kolejność układania worków na paletcie, transporter palet porusza się w lewo.

Fig. 5. Diagram of laying 50 kg bags on a pallet in even layers. The numbers indicate the order in which the bags are stacked on the pallet, the pallet conveyor moves to the left

referencyjnego Pkt_TransportOdkładczy zdefiniowanego w układzie współrzędnych użytkownika nr 2 (Base[2]) o nazwie TransporterOdkładczy. Worki polipropylenowe 50 kg są układane w siedmiu lub ośmiu warstwach po trzy worki w każdej warstwie. Schemat ich układania w warstwach nieparzystych i parzystych pokazano odpowiednio na rys. 4 i 5.

Pierwszy krok inicjowania danych, od których zależy prawidłowość wykonania paletyzacji worków propylenowych 50 kg, to przyporządkowanie dwóm zmiennym wartości określających maksymalną liczbę warstw i maksymalną liczbę worków w warstwie:

```
MaxNrUkladanejWarstwy = 7 lub 8
MaxNrWorka_wWarstwie = 3
```

W kolejnych krokach wypełniane są tablice pomocnicze: WysokoscWarstwy [], UkkladWarstwy_OBROT_A [,], UkkladWarstwy_OFFSET_Y [,] oraz UkkladWarstwy_OFFSET_X [,].

Wypełnianie tablicy pomocniczej WysokoscWarstwy[]

Elementy tablicy WysokoscWarstwy[] określają, na jakiej wysokości nad paletą, a ściślej – na jakiej wysokości ponad punktem referencyjnym Pkt_TransportOdkładczy będzie otwierany chwytak robota podczas układania kolejnej warstwy worków. Wartości te, wyrażone w milimetrach, wyznaczono wykonując pomiary ręcznie ułożonej palety.

Dla worków polipropylenowych 50 kg poszczególnym elementom tablicy WysokoscWarstwy[] przyporządkowano następujące wartości:

```
WysokoscWarstwy[1] = 150 ; warstwa 1
WysokoscWarstwy[2] = 300 ; warstwa 2
WysokoscWarstwy[3] = 450 ; warstwa 3
WysokoscWarstwy[4] = 590 ; warstwa 4
WysokoscWarstwy[5] = 740 ; warstwa 5
WysokoscWarstwy[6] = 890 ; warstwa 6
WysokoscWarstwy[7] = 1040 ; warstwa 7
WysokoscWarstwy[8] = 1190 ; warstwa 8
WysokoscWarstwy[9] = 0 ; ten element nie musi być inicjowany
WysokoscWarstwy[10] = 0 ; ten element nie musi być inicjowany
```

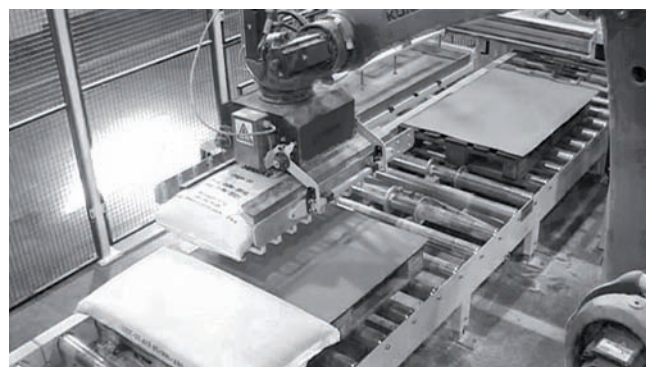
Wypełnianie tablicy pomocniczej UkkladWarstwy_OBROT_A [,]

Punkt referencyjny Pkt_TransportOdkładczy zdefiniowano w położeniu (rys. 3), w którym chwytak pozostaje równoległy do dłuższego boku palety. W takim położeniu w stosunku do palety będą odkładane worki nr 2 i 3 warstwy nieparzystej (rys. 4) oraz worki nr 1 i 2 warstwy parzystej (rys. 5). W przypadku odkładania worka nr 1 warstwy nieparzystej i worka nr 3 warstwy parzystej chwytak musi zostać obrócony o kąt -90° , aby prawidłowo odłożyć dany worek. Chwybaka nie można skręcać o $+90^\circ$, ponieważ taki obrót zerwałby przewody pneumatyczne i elektryczne zasilające chwytak. Dla worków polipropylenowych 50 kg poszczególnym elementom tablicy UkkladWarstwy_OBROT_A [,] przyporządkowano następujące wartości:

```
– dla warstwy nieparzystej:
UkladWarstwy_OBROT_A [1,1] = -90°
UkladWarstwy_OBROT_A [1,2] = 0°
UkladWarstwy_OBROT_A [1,3] = 0°
– dla warstwy parzystej:
UkladWarstwy_OBROT_A [2,1] = 0°
UkladWarstwy_OBROT_A [2,2] = 0°
UkladWarstwy_OBROT_A [2,3] = -90°
```

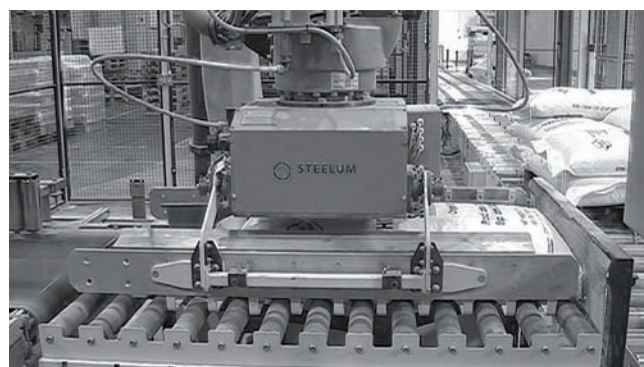
Bardziej złożone jest wypełnianie pozostałych dwóch tablic pomocniczych UkkladWarstwy_OFFSET_Y [,] oraz UkkladWarstwy_OFFSET_X [,], ponieważ należy uwzględnić następujące czynniki:

1. Środek chwytaka znajdujący się na osi jego obrotu nie pokrywa się ze środkiem przenoszonego worka. Punkt referencyjny Pkt_TransportOdkładczy wyznaczono jako punkt przecięcia osi obrotu chwytaka i osi symetrii palety równoległej do jej dłuższego boku.



Rys. 6. Punkt odkładania worka nr 2 w nieparzystej warstwie nr 1

Fig. 6. Placement point for bag No. 2 in the odd layer No. 1



Rys. 7. Odległość między czołem chwytaka a końcową barierą transportera worków

Fig. 7. Distance between the front of the gripper and the final barrier of the bag conveyor

- Wysokość szycia worka wykonana bezpośrednio po jego napełnieniu cukrem ma wpływ na jego długość i częściowo szerokość.
- Czoło chwytaka i czoło podejmowanego worka nie pokrywają się (rys. 7). Przesunięcie to wynika z konstrukcji mechanicznej transportera worków i samego chwytaka. Czoło chwytaka nie może dotykać bariery zatrzymującej przemieszczanie worków, gdyż w takim położeniu widły chwytaka nie mają możliwości wsunięcia się między rolki transportera, a ponadto sam chwytak powodowałby niszczenie bariery. Worek jest podejmowany tak, że od czoła częściowo wystaje poza chwytak.
- Cukier w worku nie jest „ubity”. Podczas szybkiego przemieszczania manipulatora z workiem w chwytaku zawartość worka na skutek działania siły bezwładności także przemieszcza się w kierunku czoła chwytaka (rys. 8). W szczególności dotyczy to worków układanych zgodnie z kierunkiem ruchu transportera palet (worki nr 2 i 3 warstwy nieparzystej – rys. 4, a worki nr 1 i 2 warstwy parzystej – rys. 5).



Rys. 8. Wysunięcie worka poza chwytak na skutek dynamicznego ruchu manipulatora

Fig. 8. Moving the bag out of the gripper due to the dynamic movement of the manipulator

- Kolejne warstwy worków nie mogą nadmiernie wystawać poza krótszy bok palety, co jest istotne ze względu na szerokość ładowni samochodów ciężarowych do ich transportu. W przypadku europalet o długości 120 cm ustawianych w ładowni poprzecznie po dwie marginesy do wykorzystania to zaledwie 20–30 cm.

Wszystkie wymienione czynniki mają wpływ na to, czy worki będą układane równo i nie zachodzą na siebie. Dlatego w programie zostały one sparametryzowane, a pod elementy poszczególnych tablic `UkladWarstwy_OFFSET_Y []` oraz `UkladWarstwy_OFFSET_X []` nie są podstawiane stałe wartości, tylko wartości wyliczane.

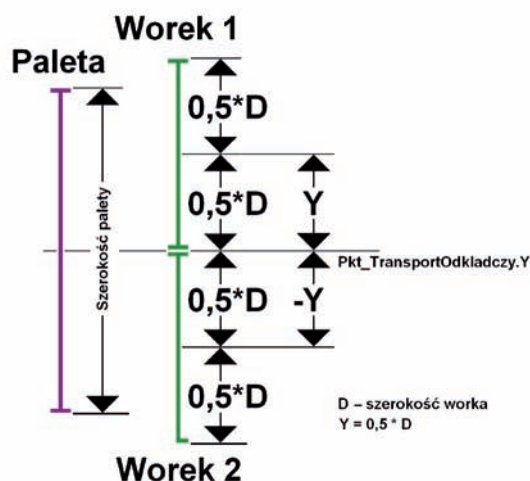
W dalszej części będą stosowane oznaczenia:

Oznaczenie	Opis
A	długość palety,
B	długość chwytaka
C	długość worka,
D	szerokość worka
Ex	przesunięcie worka w chwytaku na skutek działania siły bezwładności przy dynamicznym przemieszczaniu manipulatora (rys. 8). Wartość ta także uwzględnia wysunięcie worka poza chwytak będącego efektem konstrukcji mechanicznej (punkt poniżej).
Ey	wysunięcie worka poza chwytak będącego efektem konstrukcji mechanicznej chwytaka i transportera worków (rys. 7),
F	długość warstwy. Długość warstwy jest obliczana jako suma długości i szerokości worka (rys. 4 i 5): F = C + D
G	wysunięcie warstwy poza paletę. Wysunięcie warstwy poza paletę jest obliczane jako połowa różnicy długości warstwy minus długość palety: G = 0,5 * (F - A) = 0,5 * (C + D - A)

Wypełnianie tablicy pomocniczej

`UkladWarstwy_OFFSET_Y [,]`

Punkt referencyjny `Pkt_TransportOdkladczy` zdefiniowano w położeniu, w którym oś symetrii chwytaka pokrywa się z osią symetrii palety równoległą do jej dłuższego boku (rys. 3).



Rys. 9. Wyznaczanie przesunięcia wzdłuż osi Y punktów odkładania worków układanych równoległe do dłuższego boku palety w stosunku do punktu referencyjnego `Pkt_TransportOdkladczy`

Fig. 9. Determining the offset along the Y axis of the point of putting bags placed parallel to the long side of the pallet in relation to the reference point `Pkt_TransportOdkladczy`

Układając worki nr 2 i 3 warstwy nieparzystej oraz worki nr 1 i 2 warstwy parzystej należy odsunąć chwytak z workiem od osi symetrii palety o odcinek równy połowie szerokości worka (rys. 9):

– dla warstwy nieparzystej:

$$\text{UkladWarstwy_OFFSET_Y} [1, 2] = +0.5 * D$$

$$\text{UkladWarstwy_OFFSET_Y} [1, 3] = -0.5 * D$$

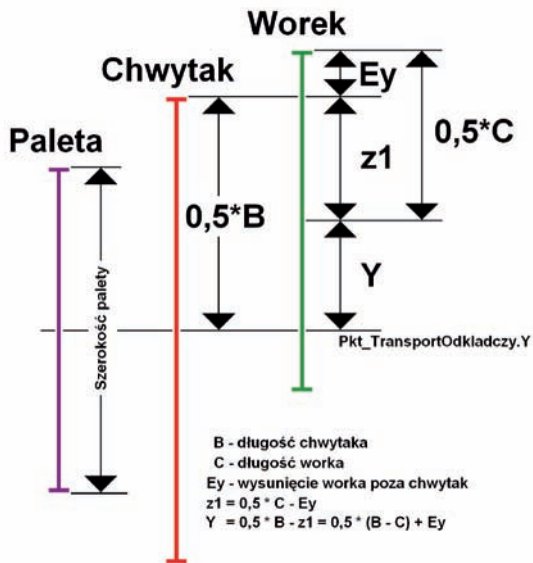
– dla warstwy parzystej:

$$\text{UkladWarstwy_OFFSET_Y} [2, 1] = +0.5 * D$$

$$\text{UkladWarstwy_OFFSET_Y} [2, 2] = -0.5 * D$$

Znaki „+” i „-” oznaczają przesunięcie chwytaka w kierunku rosnącej lub malejącej wartości współrzędnej Y punktu odkładania w stosunku do współrzędnej Y punktu referencyjnego `Pkt_TransportOdkladczy`.

Worek nr 1 warstwy nieparzystej i worek nr 3 warstwy parzystej są odkładane po obrocie chwytaka o kąt -90° w stosunku do położenia, dla którego definiowano punkt referencyjny `Pkt_TransportOdkladczy`. Chwytak jest symetryczny względem swojej osi obrotu. Gdyby jego środek pokrywał się



Rys. 10. Wyznaczenie przesunięcia wzdłuż osi Y punktów odkładania worków układanych prostopadle do dłuższego boku palety w stosunku do punktu referencyjnego Pkt _ TransportOdkładczy

Fig. 10. Determination of the offset along the Y axis of the bags placement points laid perpendicular to the long side of the pallet in relation to the reference point Pkt _ TransportOdkładczy

ze środkiem worka, nie byłaby potrzebna żadna korekta współrzędnej Y punktu odkładania worka względem punktu referencyjnego Pkt_TransportOdkładczy. Ale środki chwytaka i worka nie pokrywają się, a sam work jest podejmowany w ten sposób, że wystaje poza czoło chwytaka o odcinek równy Ey. Oba te uwarunkowania muszą zostać uwzględnione przy wyznaczaniu korekty współrzędnej Y (rys. 10, na rysunku chwytak jest obrócony o kąt -90° w stosunku do położenia, w którym definiowano punkt referencyjny).

- dla warstwy nieparzystej:

$$\text{UkladWarstwy_OFFSET_Y} [1,1] = - [0.5 * (B - C) + Ey]$$
- dla warstwy parzystej:

$$\text{UkladWarstwy_OFFSET_Y} [2,3] = - [0.5 * (B - C) + Ey]$$

Znak „-” przed nawiasami kwadratowymi oznacza przesunięcie chwytaka w kierunku malejącej wartości współrzędnej Y punktu odkładania w stosunku do współrzędnej Y punktu referencyjnego Pkt_TransportOdkładczy.

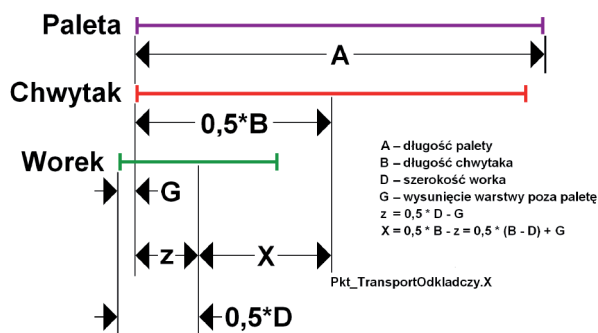
Wypełnianie tablicy pomocniczej UkladWarstwy _ OFFSET _ X [,]

Na rysunkach 11-14 przedstawiono w położenie chwytaka w stosunku do palety, w jakim znajdował się podczas definiowania punktu referencyjnego Pkt_TransportOdkładczy.

W przypadku odkładania worka nr 1 warstwy nieparzystej chwytak po wykonaniu obrotu o kąt -90° musi zostać przesunięty wzdłuż osi X o taki odcinek, aby dłuższy bok worka wystawał o wartość G poza krótszy, lewy bok palety (rys. 11). Odcinek ten, oznaczony jako X, ma długość równą 0.5 * (B - D) + G. W związku z tym dla worka nr 1 warstwy nieparzystej elementowi [1, 1] tablicy UkladWarstwy_OFFSET_X[] należy przyporządkować wartość:

$$\text{UkladWarstwy_OFFSET_X} [1,1] = -[0.5 * (B - D) + G]$$

Znak „-” przed nawiasem kwadratowym oznacza przesunięcie chwytaka w kierunku malejącej wartości współrzędnej X punktu



Rys. 11. Wyznaczenie przesunięcia wzdłuż osi x punktu odkładania worków nr 1 warstw nieparzystych w stosunku do punktu referencyjnego Pkt _ TransportOdkładczy

Fig. 11. Determination of the offset along the X axis of the point of putting bags No. 1 of odd layers in relation to the reference point Pkt _ TransportOdkładczy

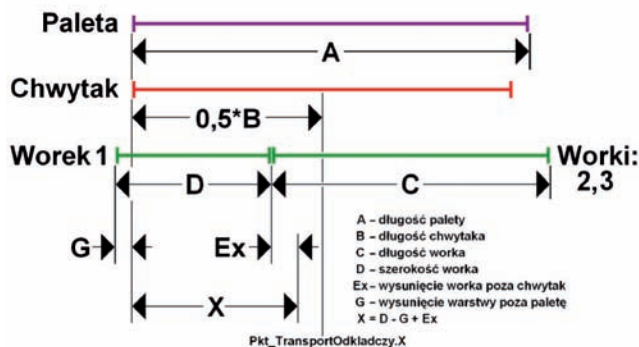
odkładania w stosunku do współrzędnej X punktu referencyjnego Pkt_TransportOdkładczy.

W przypadku odkładania worków nr 2 i 3 warstw nieparzystych chwytak musi zostać przesunięty wzdłuż osi X o odcinek umożliwiający poprzeczne ułożenie worka nr 1 równoległe do lewego, krótszego boku palety. Worki te są przenoszone w taki sposób, że ich zawartość na skutek działania siły bezwładności powoduje przesunięcie worka w chwytaku o wartość Ex w kierunku ruchu manipulatora (rys. 8). Wartość przesunięcia musi zostać uwzględniona przy wyznaczaniu offsetu punktu odkładania worka względem współrzędnej X punktu referencyjnego Pkt_TransportOdkładczy (rys. 12). Odcinek ten, oznaczony jako X, ma długość równą (D - G + Ex). W związku z tym dla worków nr 2 i 3 warstwy nieparzystej elementom [1, 2] i [1, 3] tablicy UkladWarstwy_OFFSET_X[] należy przyporządkować wartości:

$$\begin{aligned} \text{UkladWarstwy_OFFSET_X} [1,2] &= + (D - G + Ex) \\ \text{UkladWarstwy_OFFSET_X} [1,3] &= + (D - G + Ex) \end{aligned}$$

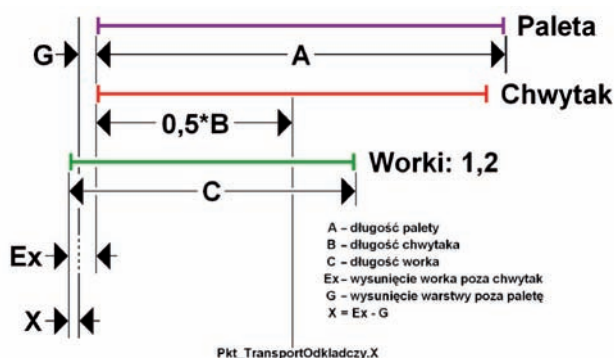
Znak „+” przed nawiasem oznacza przesunięcie chwytaka w kierunku rosnącej wartości współrzędnej X punktu odkładania w stosunku do współrzędnej X punktu referencyjnego Pkt_TransportOdkładczy.

Worki 1 i 2 warstw parzystych są przenoszone w taki sposób, że ich zawartość na skutek działania siły bezwładności powoduje przesunięcie worka w chwytaku o wartość Ex w kierunku ruchu manipulatora (rys. 8). Ponadto worki muszą zostać odłożone na



Rys. 12. Wyznaczenie przesunięcia w kierunku osi x punktu odkładania worków nr 2 i 3 warstw nieparzystych w stosunku do punktu referencyjnego Pkt _ TransportOdkładczy

Fig. 12. Determining of the offset along the X axis of the point of putting bags No. 2 and 3 of odd layers in relation to the reference point Pkt _ TransportOdkładczy



Rys. 13. Wyznaczanie przesunięcia w kierunku osi x punktu odkładania worków nr 1 i 2 warstw parzystych w stosunku do punktu referencyjnego Pkt _ TransportOdkladczy

Fig. 13. Determining of the offset along the X axis of the point of putting bags No. 1 and 2 of even layers in relation to the reference point Pkt _ TransportOdkladczy

paletę w takim położeniu, aby wystawały dokładnie o wartość G poza jej krótszy bok (rys. 13). W związku z tym dla worków nr 1 i 2 warstwy parzystej elementom [2, 1] i [2, 2] tablicy UkładWarstwy_OFFSET_X[] należy przyporządkować wartości:

$$\begin{aligned} \text{UkładWarstwy_OFFSET_X}[2,1] &= -(Ex - G) \\ \text{UkładWarstwy_OFFSET_X}[2,2] &= -(Ex - G) \end{aligned}$$

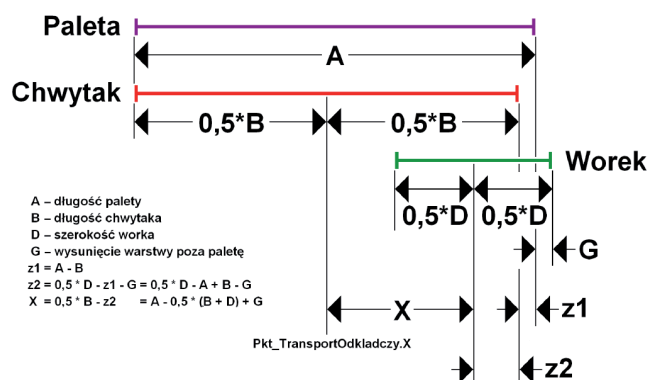
Znak „-” przed nawiasem oznacza przesunięcie chwytaka w kierunku malejącej wartości współrzędnej X punktu odkładania w stosunku do współrzędnej X punktu referencyjnego Pkt_TransportOdkladczy.

W przypadku odkładania worka 3 warstwy parzystej chwytak po wykonaniu obrotu o kąt -90° musi zostać przesunięty wzdłuż osi X o taki odcinek, aby dłuższy bok worka wystawał o wartość G poza krótszy prawy bok palety (rys. 14). Odcinek ten, oznaczony jako X, wyznacza się obliczając kolejne wartości pośrednie:

$$\begin{aligned} z1 &= A - B \\ z2 &= 0.5 * D - z1 - G = 0.5 * D - (A - B) - G \\ X &= 0.5 * B - z2 = A - 0.5 * (B + D) + G \end{aligned}$$

W związku z tym dla worka 3 warstwy parzystej elementowi [2, 3] tablicy UkładWarstwy_OFFSET_X[] należy przyporządkować wartość:

$$\begin{aligned} \text{UkładWarstwy_OFFSET_X}[2,3] &= \\ &+ [A - 0.5 * (B + D) + G] \end{aligned}$$



Rys. 14. Wyznaczanie przesunięcia w kierunku osi x punktu odkładania worków nr 3 warstw parzystych w stosunku do punktu referencyjnego Pkt _ TransportOdkladczy

Fig. 14. Determining of the offset along the X axis of the point of putting bags No. 3 of even layer in relation to the reference point Pkt _ TransportOdkladczy

Znak „+” przed nawiasem kwadratowym oznacza przesunięcie chwytaka w kierunku rosnących wartości współrzędnej X punktu odkładania w stosunku do współrzędnej X punktu referencyjnego Pkt_TransportOdkladczy.

Ostatnią czynnością, po wykonaniu przedstawionych obliczeń, jest wypełnienie kolejnych elementów tablic pomocniczych metodą kopiowania. Ten fragment kodu źródłowego w języku KRL ma postać:

```

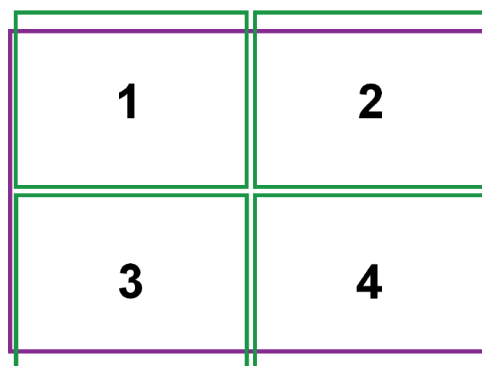
;-----
; Kopiowanie - warstwy NIEPARZYSTE:
;-----
FOR i = 3 TO 7 STEP 2
  FOR j = 1 TO 3 STEP 1
    UkładWarstwy_OFFSET_X [i,j] = UkładWarstwy_OFFSET_X [1,j]
    UkładWarstwy_OFFSET_Y [i,j] = UkładWarstwy_OFFSET_Y [1,j]
    UkładWarstwy_OBROT_A [i,j] = UkładWarstwy_OBROT_A [1,j]
  ENDFOR
ENDFOR

;-----
; Kopiowanie - warstwy PARZYSTE:
;-----
FOR i = 4 TO 8 STEP 2
  FOR j = 1 TO 3 STEP 1
    UkładWarstwy_OFFSET_X [i,j] = UkładWarstwy_OFFSET_X [2,j]
    UkładWarstwy_OFFSET_Y [i,j] = UkładWarstwy_OFFSET_Y [2,j]
    UkładWarstwy_OBROT_A [i,j] = UkładWarstwy_OBROT_A [2,j]
  ENDFOR
ENDFOR
    
```

Zakresy pętli, ograniczające kopiowanie, odpowiadają układaniu worków maksymalnie w 8 warstwach.

6. Paletyzacja worków polipropylenowych 2 x 25 kg

Kolejnym zrealizowanym schematem paletyzacji było przeniesienie worków polipropylenowych 25 kg. Są one podejmowane parami z transportera i odkładane na paletę według schematu przedstawionego na rys. 15. W przypadku tych worków najpierw przekładana jest para [1, 2], potem [3, 4]. Z punktu widzenia opisywanego algorytmu sterowania robotem każda taka para worków jest traktowana jako pojedynczy długi worek, a wszystkie układane warstwy są identyczne.



Rys. 15. Schemat układania worków 25 kg na paletę we wszystkich warstwach. Worki [1, 2] i [3, 4] są odkładane parami po dwa na raz

Fig. 15. Diagram of laying 25 kg bags on a pallet in all layers. Bags [1, 2] and [3, 4] are put in pairs of two at a time

Umowa między Krajową Spółką Cukrową „Polski Cukier” a Przemysłowym Instytutem Automatyki i Pomiarów PIAP dotyczyła układania worków 25 kg w siedmiu lub ośmiu warstwach. Było to spowodowane obawami, że ułożenie większej liczby warstw bez dodatkowych przekładek kartonowych, zwiększających tarcie między workami, spowoduje niestabilność ułożonego stosu. Ponieważ robot paletyzujący został posadowiony bezpośrednio na podłożu, bez dodatkowej podstawy – ograniczeniem pozostawał jego zasięg, pozwalający układać stos

o maksymalnej wysokości 120 cm. Umożliwiło to efektywnie przetestowanie możliwości układania 7, 8, 9 i 10 warstw worków 25 kg.

Przygotowanie danych do realizacji paletyzacji rozpoczyna się od przyporządkowania dwóm zmiennym wartości określających maksymalną liczbę warstw i maksymalną liczbę worków w warstwie (w tym przypadku właściwszym określeniem jest „maksymalnej liczby par worków w warstwie”):

```
MaxNrUkladanejWarstwy = 7 ; lub 8, 9, 10
MaxNrWorka_wWarstwie = 2
```

Tak jak w przypadku układania worków polipropylenowych 50 kg tablica pomocnicza WysokoscWarstwy[] wypełniana jest wartościami określonymi na podstawie ręcznie wykonanych pomiarów:

```
WysokoscWarstwy[1] = 120 ; warstwa 1
WysokoscWarstwy[2] = 240 ; warstwa 2
WysokoscWarstwy[3] = 360 ; warstwa 3
WysokoscWarstwy[4] = 480 ; warstwa 4
WysokoscWarstwy[5] = 600 ; warstwa 5
WysokoscWarstwy[6] = 720 ; warstwa 6
WysokoscWarstwy[7] = 840 ; warstwa 7
WysokoscWarstwy[8] = 960 ; warstwa 8
WysokoscWarstwy[9] = 1080 ; warstwa 9
WysokoscWarstwy[10] = 1200 ; warstwa 10
```

Ponieważ obie pary worków są układane dłuższymi bokami równoległe do dłuższego boku palety, toteż wszystkim elementom tablicy pomocniczej UkładWarstwy_OBROT_A[] przyporządkowano wartości 0:

```
UkladWarstwy_OBROT_A [1,1] = 0
UkladWarstwy_OBROT_A [1,2] = 0
.....
UkladWarstwy_OBROT_A [10,1] = 0
UkladWarstwy_OBROT_A [10,2] = 0
```

Zawartość tablicy UkładWarstwy_OFFSET_Y[] jest wyznaczana jak w przypadku worków 50 kg nr 2 i 3 warstwy nieparzystej i nr 1 i 2 warstwy parzystej:

```
UkladWarstwy_OFFSET_Y [1,1] = +0.5 * D
UkladWarstwy_OFFSET_Y [1,2] = -0.5 * D
```

Znaki „+” i „-” oznaczają przesunięcie chwytaka w kierunku rosnącej i malejącej wartości współrzędnej Y punktu odkładania w stosunku do współrzędnej Y punktu referencyjnego Pkt_TransportOdkladczy.

Zawartość tablicy UkładWarstwy_OFFSET_X[] jest wyznaczana podobnie jak w przypadku worków 50 kg nr 1 i 2 warstwy parzystej. Różnica wynika z tego, że długość warstwy F nie jest równa sumie długości i szerokości worka (C+D) – jak dla worków 50 kg, tylko sumie długość + długość worka (C+C) = 2*C:

```
F = 2 * C
G = 0.5 * (F - A) = C - 0.5 * A
UkladWarstwy_OFFSET_X [1,1] = -(Ex - G)
UkladWarstwy_OFFSET_X [1,2] = -(Ex - G)
```

Ostatnią czynnością jest wypełnienie kolejnych elementów tablic pomocniczych metodą kopiowania. Ten fragment kodu źródłowego w języku KRL ma postać:

```
-----
; Kopiowanie - warstwy NIEPARZYSTE i PARZYSTE
; sa jednakowe
-----
FOR i = 2 TO 10 STEP 1
  FOR j = 1 TO 2 STEP 1
    UkladWarstwy_OFFSET_X [i,j] = UkladWarstwy_OFFSET_X [1,j]
    UkladWarstwy_OFFSET_Y [i,j] = UkladWarstwy_OFFSET_Y [1,j]
    UkladWarstwy_OBROT_A [i,j] = UkladWarstwy_OBROT_A [1,j]
  ENDFOR
ENDFOR
```



Rys. 16. Paleta z workami 25 kg ułożonymi w 10 warstwach
Fig. 16. A pallet with stacked 25 kg bags arranged in 10 layers

Próby wykazały, że zastosowany algorytm umożliwia bezproblemową paletyzację worków 25 kg układanych w stabilny stos 10 warstw worków po 4 worki w warstwie z zachowaniem minimalnego wysunięcia worków poza krótsze boki palety (rys. 16). Jednocześnie próby pokazały, że nawet niewielka zmiana wysokości zaszywania tych worków po ich napelnieniu ma istotny wpływ na jakość układania. W przypadku worków 50 kg tolerancja była większa.

7. Uwagi końcowe

Typowym rozwiązaniem stosowanym w paletyzacji jest wyznaczanie punktów referencyjnych, odpowiednich dla różnych schematów układania i ich realizacja za pomocą różnych programów. Zaprezentowany algorytm sterowania robotem różni się od takich rozwiązań, gdyż niezależnie od przyjętego schematu paletyzacji odwołuje się tylko do pojedynczego punktu referencyjnego i został zrealizowany pojedynczym programem. W jego przypadku każdy kolejny schemat układania wymaga zainicjowania innego zestawu parametrów do obliczania pozycji odkładczej. Taki sposób realizacji algorytmu bardziej odpowiada programowaniu w języku C niż w języku KUKA Robot Language (KRL), w którym większy nacisk jest kładziony na wykorzystanie instrukcji typowych do programowania robotów (PTP, LIN, CIRC), a dużo rzadziej wykorzystuje się tablice i mechanizm ich indeksowania. Przedstawiony algorytm jest łatwy do implementacji dla dowolnego języka programowania robotów pod warunkiem, że zapewnia on obsługę tablic wielowymiarowych i instrukcje przemieszczania manipulatora do punktów, których współrzędne nie są zapamiętywane jako stałe, tylko są obliczane jako modyfikacja współrzędnych punktów referencyjnych. Oprócz języka KRL warunek ten spełnia np. język Rapid do programowania robotów firmy ABB.

Osobną sprawą jest czas uruchamiania aplikacji. Uruchamianie zrobotyzowanego stanowiska paletyzującego nie sprowadza się tylko do zaprogramowania robota. Robot musi współpracować z nadrzędnym sterownikiem PLC, a program sterownika obsługuje nie tylko robota ale transportery, owijkarkę folii, wagi, skanery wykrywające zanieczyszczenia metalowe, drukarkę do nadruków, system bezpieczeństwa etc. Programista PLC nie może koncentrować się tylko na współpracy z robotem, bo podczas uruchamiania stanowiska wymienione elementy generują różne problemy. Wskazane jest, aby programowanie robota odbywało się w miarę niezależnie od prac nad aplikacją PLC, a w przypadku przedstawionego algorytmu jest to możliwe. W tym przypadku program jest jeden, a kolejny schemat paletyzacji wymaga tylko innego zestawu parametrów i innego podprogramu inicjującego zmienne.

Jako ciekawostkę można przytoczyć informację jak finalizowane były prace uruchomieniowe linii do naważania i paletyzacji worków z cukrem w cukrowni w Nakle. Eksploatację linii rozpoczęto w marcu 2018 r., gdyż do początku maja cukrownia musiała wywiązać się z kontraktu na dostarczenie 4,5 tys. ton cukru w workach polipropylenowych 50 kg. Linia ruszyła mimo, że paletyzacja worków 25 kg nie była zaprogramowana, ponieważ wcześniej worki te nie były dostępne. Program do

ich paletyzacji uruchomiono i zoptymalizowano w ciągu kilku godzin, po zakończeniu naważania worków 50 kg, m.in. dlatego, że algorytm aplikacji robota wymagał tylko przyporządkowania różnym parametrom właściwych wartości.

Bibliografia

1. Dunaj J., *Skrócona instrukcja obsługi robota paletyzującego KR 180-3200 PA i opis jego programu aplikacyjnego wykonanego dla Cukrowni „Nakło”*, materiały Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów, kwiecień 2018.
2. KUKA System Software 8.3: Instrukcja obsługi i programowania użytkownika końcowego, ©Copyright 2013 KUKA Roboter GmbH.
3. KUKA System Software KR C2 / KR C3: Expert Programming – Release 5.2 ©Copyright 2003 KUKA Roboter GmbH
4. KUKA System Software KR C2 / KR C3: Configuration, External Automatic – Release 5.2, ©Copyright 2004 KUKA Roboter GmbH
5. KUKA System Software KR C...: Error messages /troubleshooting, ©Copyright KUKA Roboter Gm
6. KUKA System Software KR C...: System Variables, ©Copyright 2004 KUKA Roboter GmbH.

Selection and Software Implementation of Palletizing Schemes for Bags with Loose Contents Made by an Industrial Robot

Abstract: The article describes a universal algorithm for controlling an industrial robot that performs the palletization of bags with loose content. This algorithm was used in a robotic line of weighing and palletizing sugar bags in the Sugar Factory Nakło on Noteć River. It presents the reasons why this solution was decided, describes how the tools, user coordinate systems and reference points used in the application were defined. The paper presents the method of preparation of data enabling the palletization of two types of bags arranged in accordance with two different palletizing schemes.

Keywords: palletizing, palletizing robot, user coordinate system, robot tool, reference point, gripper, programming, KUKA Robot Language

mgr inż. Jacek Dunaj

jdunaj@piap.pl

W 1980 r. ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, od 1985 r. jest zatrudniony w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Specjalizuje się w programowaniu różnego rodzaju sprzętu: mikroprocesorów, kontrolerów, sterowników i robotów przemysłowych, systemów wizyjnych a także komputerów PC programowanych w języku assemblera i C/C++ w środowisku różnych systemów operacyjnych. Współautor oprogramowania dla kilku urządzeń opracowanych w PIAP, a także wielu wdrożeń przemysłowych, w szczególności wymagających współpracy ze sobą kilku różnych urządzeń automatyki i wykorzystania oprogramowania biurowego (baz danych, arkuszy kalkulacyjnych). Autor i wykonawca aplikacji robota paletyzującego zrobotyzowanej linii naważania i paletyzacji worków z cukrem w Cukrowni Nakło nad Notecią.



