

AGH

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA
W KRAKOWIE**

Robot kelner – robot mobilny

Lena Wójcikiewicz, grupa 1, nr indeksu 410770, lenaw@student.agh.edu.pl

Inżynieria mechatroniczna

Rok akademicki 2023/2024

1. State of art

Projekt będzie dotyczył robota mobilnego – robota kelnera wspierającego lokale gastronomiczne. Robot ten może wspomóc lub zastąpić kelnerów w restauracji. Dzięki zwiększonej ładowności, jego zastosowanie pomaga zwiększyć wydajność m.in. wydawania posiłków. W trakcie jednego przejazdu można przyspieszyć również sprzątanie stolików. Warto wspomnieć o aspekcie pracy fizycznej kelnerów - robot efektywnie odciąża personel lokalu, pomagając tym samym poprawić jakość obsługi klienta zwłaszcza pod koniec długich zmian. Używanie robota kelnera może mieć również znaczny wpływ na popularność lokalu - klienci lubią nowości i robot kelner może przyciągnąć szerokie grono osób chętnych na zdobycie nowego doświadczenia.

Obecnie produkowane roboty:

- Pracują od 8 do 16 godzin na jednym ładowaniu (w większości 12-15 godz.), część z nich ma wymienne baterie
- Maksymalny udźwóg tacy wynosi od 5 do 15 kg – jednorazowo są w stanie przewieźć do 60kg (zazwyczaj jest to jednak 40kg)
- Poruszają się z prędkością do 1,2 m/s
- Osiągają wysokości od 1,1m do 1,5m (zazwyczaj 1,3m)
- Ich masa waha się w granicach 50kg



Rys. 1 Przykładowe wizualizacje robota przeznaczonego do pomocy w lokalach gastronomicznych firmy Pudu, źródło: [BellaBot - innowacyjny robot kelner | PuduRoboty & LSI Software](#)



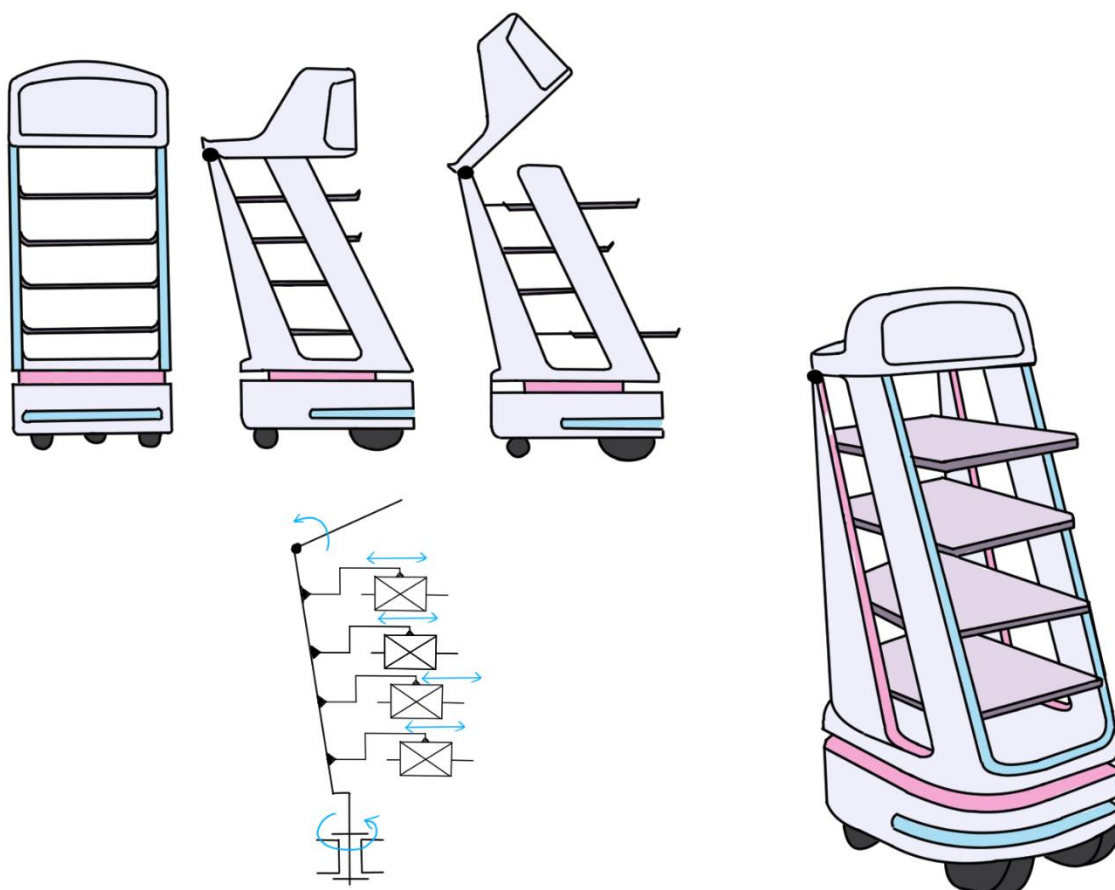
Rys. 2 Przykładowe wizualizacje innych robotów przeznaczonego do pomocy w lokalach gastronomicznych, źródło: [Robot jako kelner, kucharz, barista. Automatyzacja rozwija biznesy \(mycompanypolska.pl\)](https://mycompanypolska.pl)



Rys. 3 Wizualizacje robota przeznaczonego do pomocy w lokalach gastronomicznych firmy Bear Robotics, źródło: [Bear Robotics | Servi Plus](https://bearrobotics.com)

Wizualizacja wyglądu robota

Na potrzeby projektu będę musiała zwiększyć ilość stopni swobody robota kelnera. Poniżej znajduje się rysunek poglądowy robota wykonywanego na potrzeby projektu. Robot będzie miał dwa razy po dwa stopie swobody – do projektu będzie policzona również trajektoria ruchu robota.



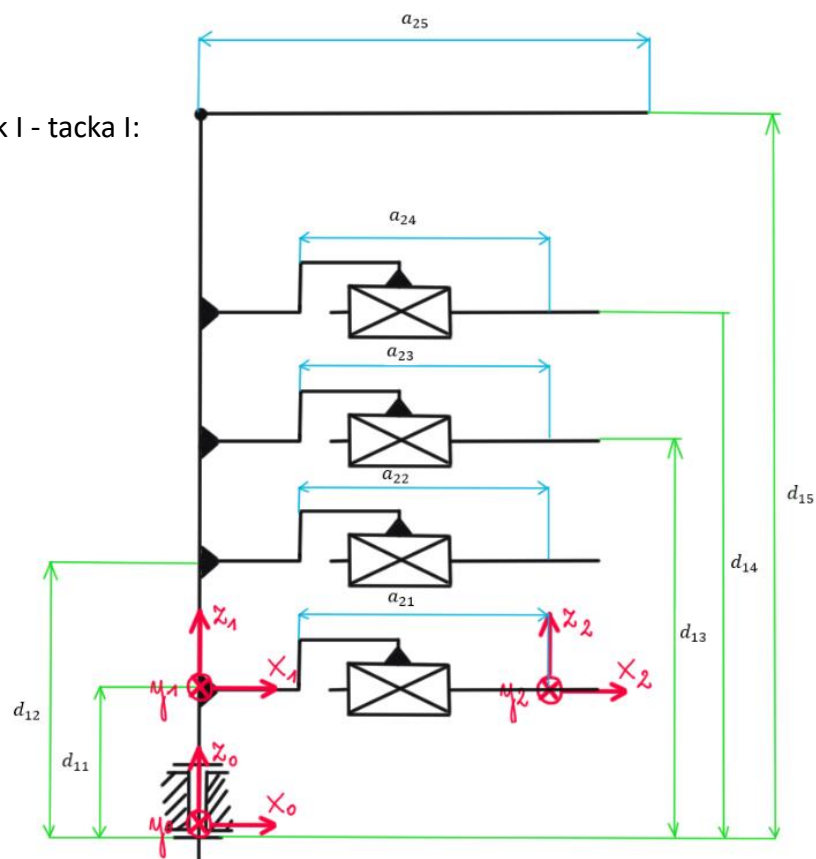
Rys. 4 Rysunek służący wizualizacji robota we wstępnej fazie projektu i model kinematyczny robota, źródło: Opracowanie własne.

2. Kinematyka prosta robota

Robot ma dwa razy po dwa stopnie swobody – ruch górnej części robota (podnoszenie i opuszczanie części z wyświetlaczem) odbywa się niezależnie od ruchu czterech wysuwanych tacek.

Kinematyka prosta przypadków I-IV związanych z ruchem tacek:

- Przypadek I - tacka I:

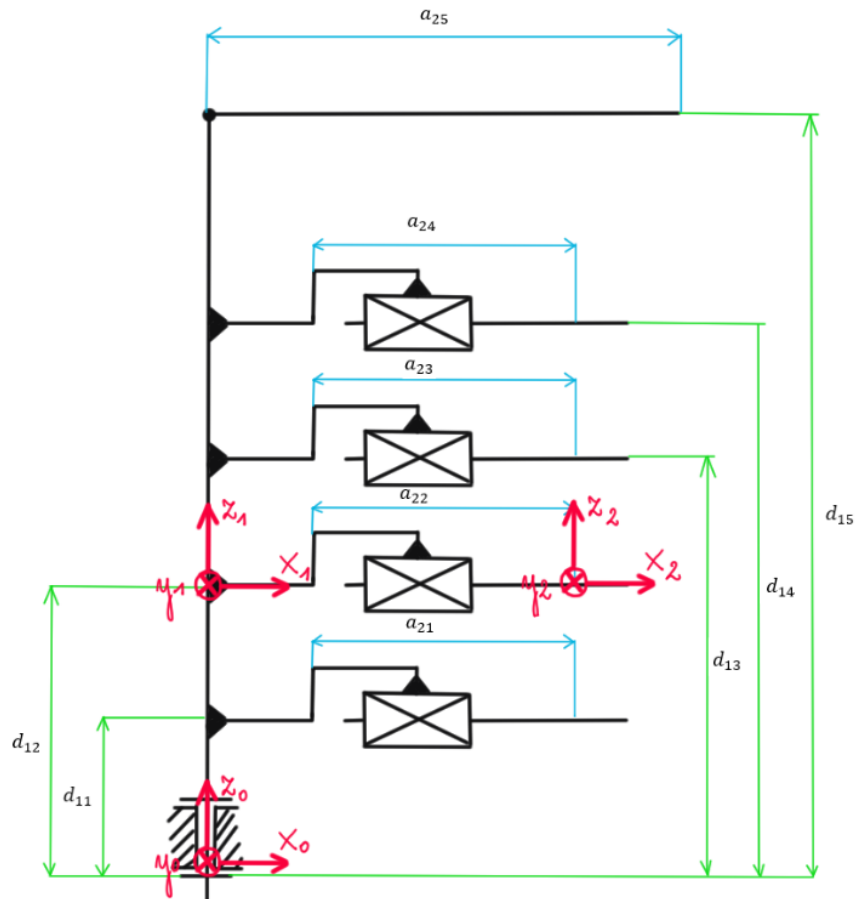


Rys. 5 Przekształcenia układu współrzędnych dla tacki pierwszej.

Tab. 1 Tabela przekształceń układu współrzędnych w notacji Denavita-Hartenberga dla tacki pierwszej .

Układ	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_{VAR}	d_{11}	—	—
2	—	—	a_{21VAR}	—

- Przypadek II - tacka II:

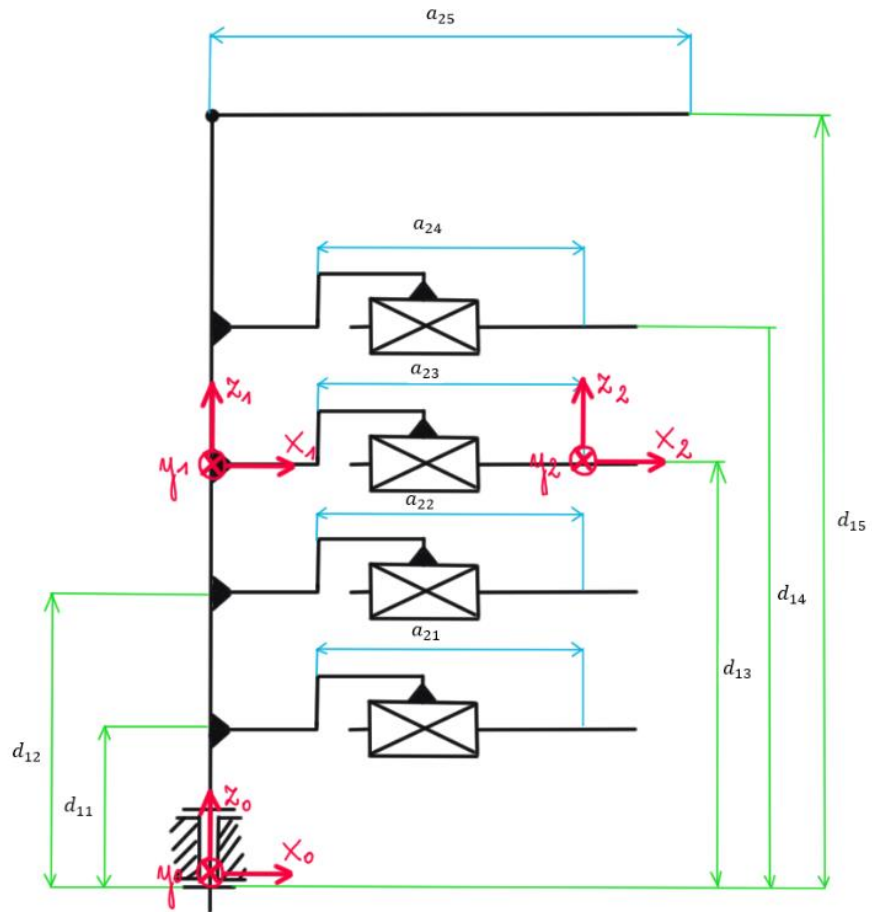


Rys. 6 Przekształcenia układu współrzędnych dla tacki drugiej.

Tab. 2 Tabela przekształceń układu współrzędnych w notacji Denavita-Hartenberga dla tacki drugiej.

Układ	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_{VAR}	d_{12}	—	—
2	—	—	a_{22VAR}	—

- Przypadek III - tacka III:

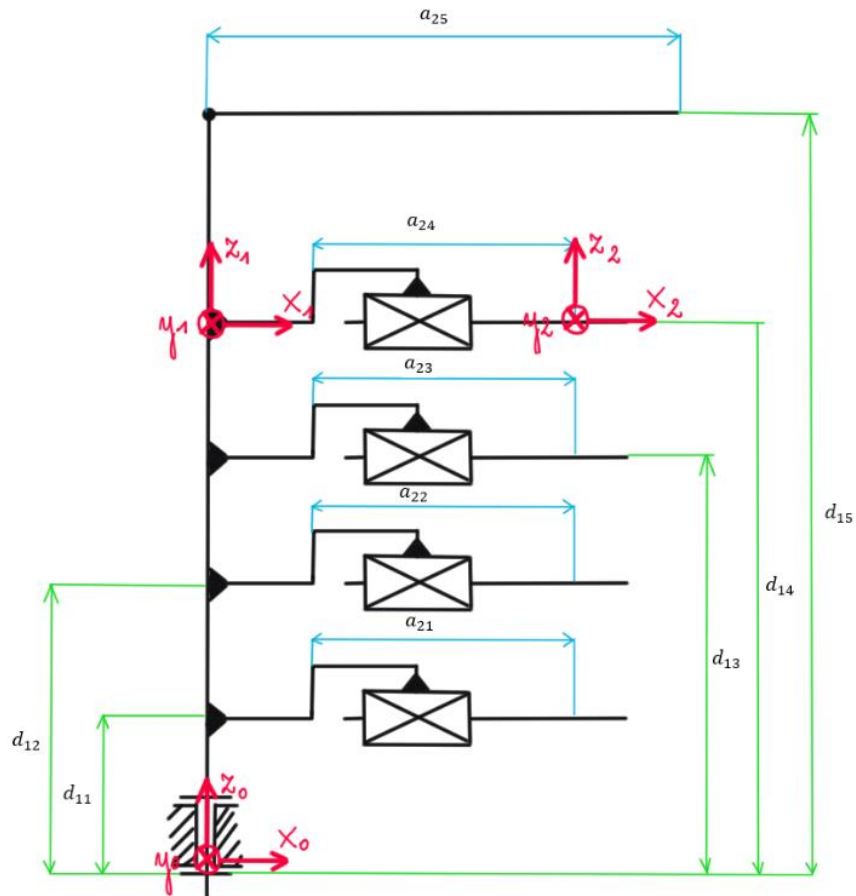


Rys. 7 Przekształcenia układu współrzędnych dla tacki trzeciej.

Tab. 3 Tabela przekształceń układów współrzędnych w notacji Denavita-Hartenberga dla tacki trzeciej

Układ	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_{VAR1}	d_{13}	—	—
2	—	—	a_{23VAR}	—

- Przypadek IV - tacka IV:



Rys. 8 Przekształcenia układu współrzędnych dla tacki czwartej.

Tab. 4 Tabela przekształceń układu współrzędnych w notacji Denavita-Hartenberga dla tacki czwartej.

Układ	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_{VAR1}	d_{14}	—	—
2	—	—	a_{24VAR}	—

Obliczenia i modele matematyczne w formie macierzy dla przypadków I-IV:

Przekształcenie układu początkowego (zerowego) do układu pierwszego:

$$A_1 = Rot_{Z, \theta_{VAR1}} \cdot Trans_{Z, d_1}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{VAR1}) & -\sin(\theta_{VAR1}) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_{VAR1}) & \cos(\theta_{VAR1}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Przekształcenie układu pierwszego do układu końcowego (drugiego):

$$A_2 = Trans_{x, a_2VAR}$$

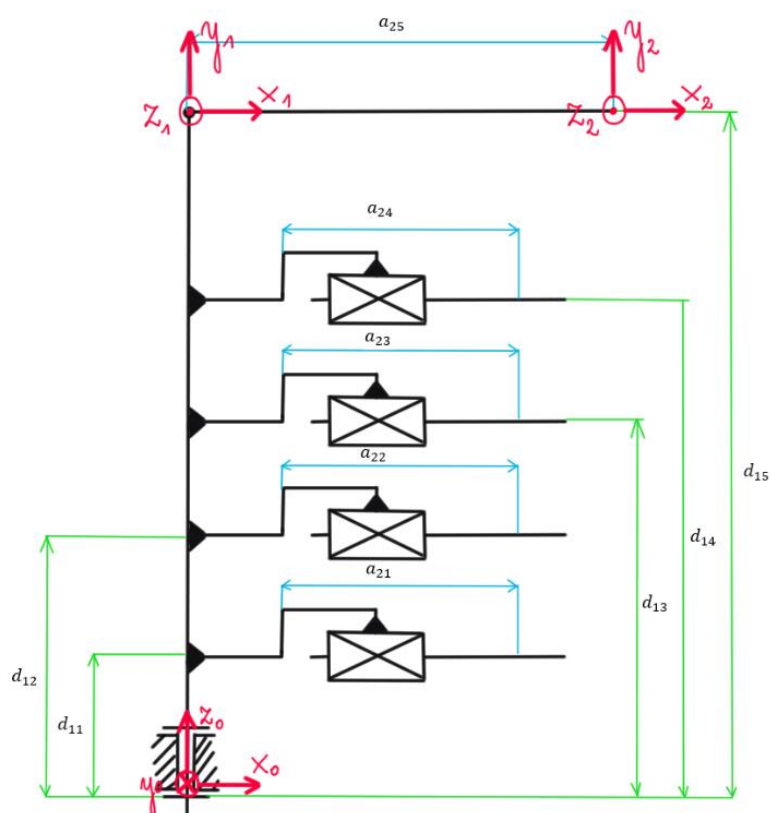
$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Model kinematyki prostej dla przypadków I-V:

$$T_{2,0} = A_1 \cdot A_2$$

$$T_{2,0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{VAR1}) & -\sin(\theta_{VAR1}) & 0 & \cos(\theta_{VAR1}) \cdot a_2 \\ \sin(\theta_{VAR1}) & \cos(\theta_{VAR1}) & 0 & \sin(\theta_{VAR1}) \cdot a_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Kinematyka prosta przypadku V związanego z ruchem górnej części robota:



Rys. 9 Przekształcenia układu współrzędnych dla ruchu związanego z górną częścią robota.

Tab. 5 Tabela przekształceń układu współrzędnych w notacji Denavita-Hartenberga dla ruchu górnej części robota.

Układ	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_{VAR1}	d_{15}	—	90°
2	θ_{VAR2}	—	a_{25}	—

Obliczenia i modele matematyczne w formie macierzy dla przypadku V:

Przekształcenie układu początkowego (zerowego) do układu pierwszego:

$$A_1 = Rot_{Z, \theta_{VAR1}} \cdot Trans_{Z, d_1} \cdot Rot_{X, 90^\circ}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{VAR1}) & 0 & \sin(\theta_{VAR1}) & 0 \\ \sin(\theta_{VAR1}) & 0 & -\cos(\theta_{VAR1}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Przekształcenie układu pierwszego do układu końcowego (drugiego):

$$A_2 = Rot_{Z, \theta_{VAR2}} \cdot Trans_{X, a_2}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{VAR2}) & -\sin(\theta_{VAR2}) & 0 & \cos(\theta_{VAR2}) \cdot a_2 \\ \sin(\theta_{VAR2}) & \cos(\theta_{VAR2}) & 0 & \sin(\theta_{VAR2}) \cdot a_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Model kinematyki prostej przypadku V:

$$T_{2,0} = A_1 \cdot A_2$$

$$T_{2,0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{VAR1}) \cdot \cos(\theta_{VAR2}) & -\cos(\theta_{VAR1}) \cdot \sin(\theta_{VAR2}) & \sin(\theta_{VAR1}) & \cos(\theta_{VAR1}) \cdot \cos(\theta_{VAR2}) \cdot a_2 \\ \sin(\theta_{VAR1}) \cdot \cos(\theta_{VAR2}) & -\sin(\theta_{VAR1}) \cdot \sin(\theta_{VAR2}) & -\cos(\theta_{VAR1}) & \sin(\theta_{VAR1}) \cdot \cos(\theta_{VAR2}) \cdot a_2 \\ \sin(\theta_{VAR2}) & \cos(\theta_{VAR2}) & 0 & \cos(\theta_{VAR2}) \cdot a_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Kinematyka odwrotna robota

Rozwiązanie kinematyki odwrotnej dla przypadków I-IV związanych z ruchem tacek:

$$\begin{cases} x = \cos(\theta_{VAR1}) \cdot a_2 \\ y = \sin(\theta_{VAR1}) \cdot a_2 \end{cases}$$
$$\begin{cases} \theta_{VAR1} = \arccos\left(\frac{x}{a_2}\right) \\ \theta_{VAR1} = \arcsin\left(\frac{y}{a_2}\right) \end{cases}$$

Rozwiązanie kinematyki odwrotnej przypadku V związanego z ruchem górnej części robota:

$$\begin{cases} x = \cos(\theta_{VAR1}) \cdot \cos(\theta_{VAR2}) \cdot a_2 \\ y = \sin(\theta_{VAR1}) \cdot \cos(\theta_{VAR2}) \cdot a_2 \\ z = \sin(\theta_{VAR2}) \cdot a_2 + d_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \theta_{VAR2} = \arcsin\left(\frac{z - d_1}{a_2}\right) \\ \theta_{VAR1} = \arcsin\left(\frac{y}{a_2 \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{z - d_1}{a_2}\right)\right)}\right) \\ \theta_{VAR1} = \arccos\left(\frac{x}{a_2 \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{z - d_1}{a_2}\right)\right)}\right) \end{cases}$$

4. Kinematyka odwrotna robota mobilnego z napędem różnicowym wraz z trajektorią ruchu robota

Kinematykę odwrotną mojego robota policzyłam w programie Matlab przy pomocy poniższego kodu, który zawiera dokładne opisy poszczególnych etapów obliczeń:

```
%Kinematyka odwrotna robota mobilnego związana z ruchem
close all
clear all
clc

%Współrzędna x początkowa
x0=0;
%Współrzędna y początkowa
y0=0;
%Współrzędna x końcowa
xk=9;
%Współrzędna y końcowa
yk=5;

% Prędkość robota mobilnego w m/s założona na podstawie prędkości
rozwijanych
% przez istniejące roboty tego typu:
V=1.2;

% Prędkość kątowna robota mobilnego w rad/s, dobierana do odległości między
punktami:
w=0.16234;

% Rozstaw osi L w m i promień koła r w metrach:
L=0.33;
r=0.06;

%odległość między punktem końcowym i początkowym d:
d=sqrt((x0-xk)^2+(y0-yk)^2)

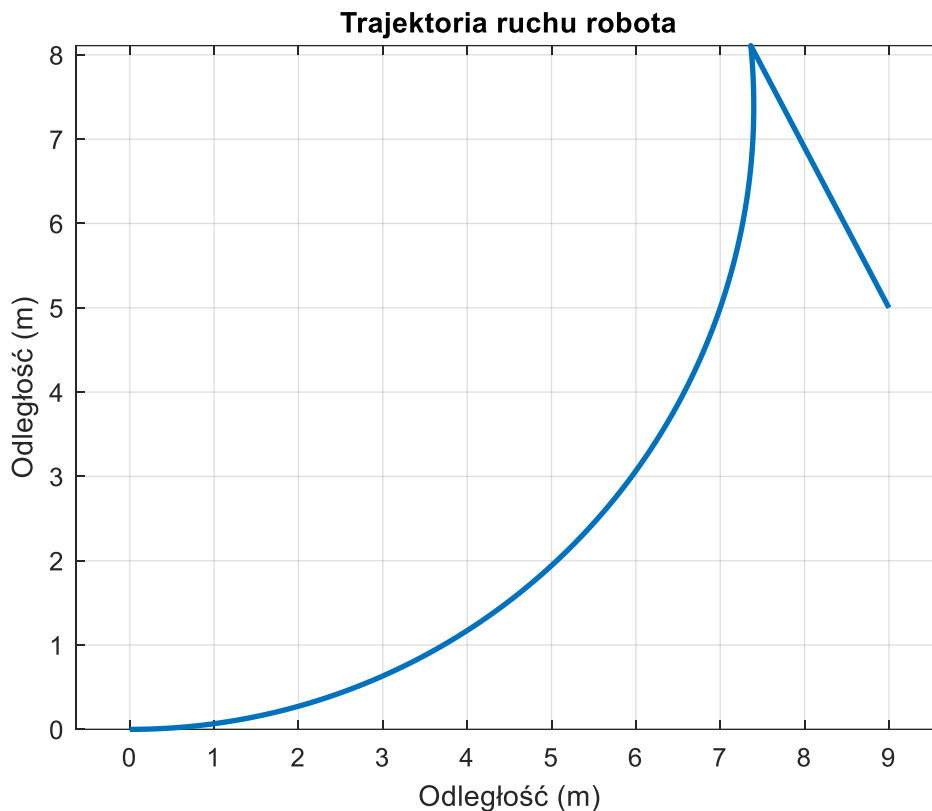
%Szacowany czas dotarcia w sekundach do celu w lini prostej:
t=d/V
%robot porusza się po łuku więc zwiększam czas z t do 1,2t
t=1.2*t;
%Prędkość kątowna prawego koła wR i lewego koła wL:
wR=V/r+(L/(2*r))*w
wL=V/r-(L/(2*r))*w

% Ilość obrotów prawego koła nR i lewego koła nL potrzebnych do dotarcia
do położenia końcowego xk, yk w oszacowanym czasie :
nR=wR*t/(2*pi)
nL=wL*t/(2*pi)
```

Rozwiązaniem są następujące wyniki:

- Odległość między punktem końcowym i początkowym $d = 10.2956$ m
- Szacowany czas dotarcia do celu $t = 8.5797$ s
- Prędkość kątowa prawego koła $w_R = 20.4464$ rad/s
- Prędkość kątowa lewego koła $w_L = 19.5536$ rad/s
- Ilość obrotów prawego koła n_R potrzebnych do dotarcia do położenia końcowego x_k, y_k w oszacowanym czasie t - $n_R = 33.5035$
- Ilość obrotów lewego koła n_L potrzebnych do dotarcia do położenia końcowego x_k, y_k w oszacowanym czasie t - $n_L = 32.0405$

Przy wykreślaniu trajektorii napotkałam pewne trudności, ponieważ jednym z założeń jest stała prędkość kątowa robota. Najlepszym możliwym do uzyskania tą metodą rozwiązaniem jest poniższa trajektoria:



Rys. 10 Wykres trajektorii ruchu robota mobilnego z korektą położenia końcowego

Robot jedzie po stałym łuku a następnie w linii prostej dojeżdża do zadanego położenia. Przy próbach modyfikacji tej metody robot albo nie dojeżdżał do zadanego położenia albo startował z losowego (nie z zadanego) punktu. Wprowadzenie zmiennej prędkości kątowej robota zależnej od odległości do celu dało mierne rezultaty. Nie jest to najbardziej optymalne rozwiązanie, ale jest ono najdokładniejsze z wypróbowanych przeze mnie metod. Aby wykreślić zarówno dokładniejszą jak i bardziej optymalną trajektorię ruchu, należałoby zastosować w znacznie bardziej skomplikowany algorytm dedykowany do liczenia trajektorii.

Do uzyskania tego wykresu użyłam następującego kodu:

```
% Trajektoria
% Z wartości czasu tworzę wektor czasu tw (od 0 do t sekundy z krokiem 0.01
s)
tw = 0:0.01:t;
wL = (V / r) - (L / (2 * r)) * w;
wR = (V / r) + (L / (2 * r)) * w;
% Przechowywanie macierze wielkości wektora czasu służące do przechowywania
pozycji x, y oraz kąta w danych chwilach czasowych
x = zeros(size(tw));
y = zeros(size(tw));
theta = zeros(size(tw));
% Symulacja ruchu
for i = 2:length(tw)
    delta_t = tw(i) - tw(i-1);
    wL = (V / r) - (L / (2 * r)) * w;
    wR = (V / r) + (L / (2 * r)) * w;
    VR = r * wR;
    VL = r * wL;
    x(i) = x(i-1) + 0.5 * (VL + VR) * cos(theta(i-1)) * delta_t;
    y(i) = y(i-1) + 0.5 * (VL + VR) * sin(theta(i-1)) * delta_t;
    theta(i) = theta(i-1) + (VR - VL) / L * delta_t;
end

% Korekta pozycji końcowej
x(end) = xk;
y(end) = yk;

% Wykres
figure;
plot(x, y, 'LineWidth', 2);
title('Trajektoria ruchu robota');
xlabel('Odległość (m)');
ylabel('Odległość (m)');
grid on;
axis equal;
```

5. Model 3D robota kelnera

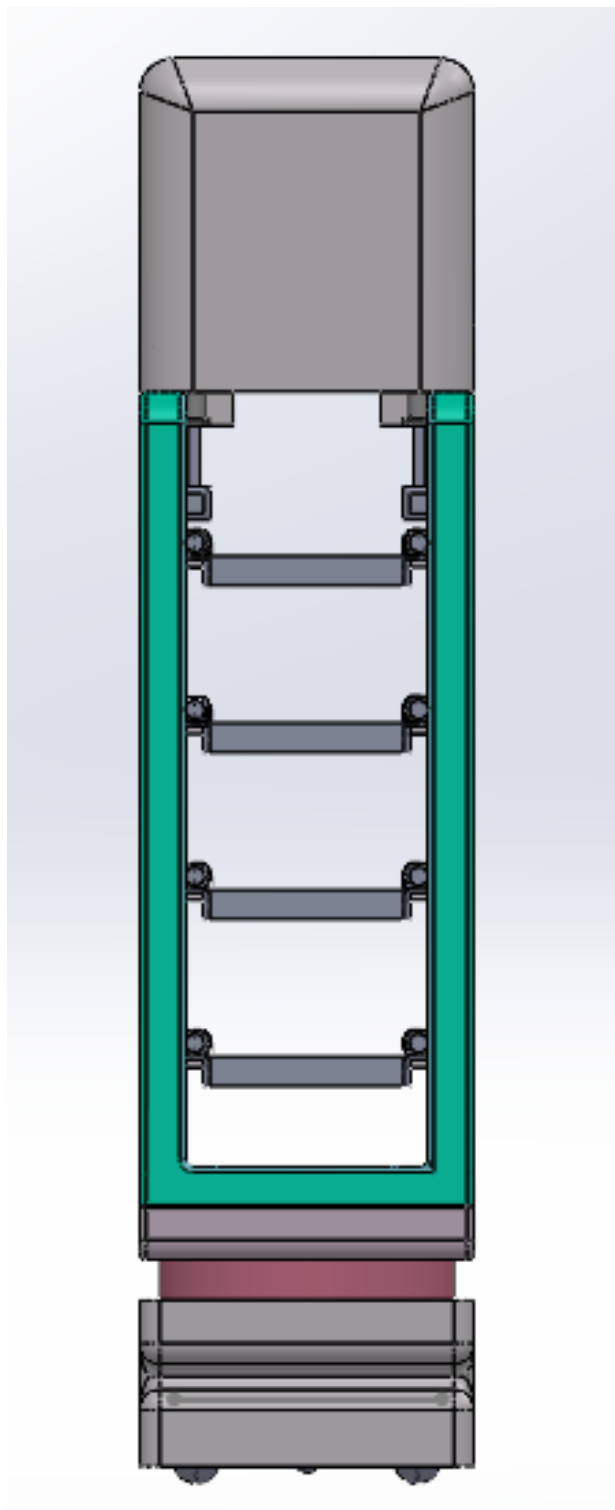
Na poniższym zdjęciu zamieściłam wizualizację mojego projektu wykonaną w programie SOLIDWORKS Visualize Professional.



Rys. 11 Wizualizacja robota kelnera wykonana w programie SOLIDWORKS Visualize Professional.

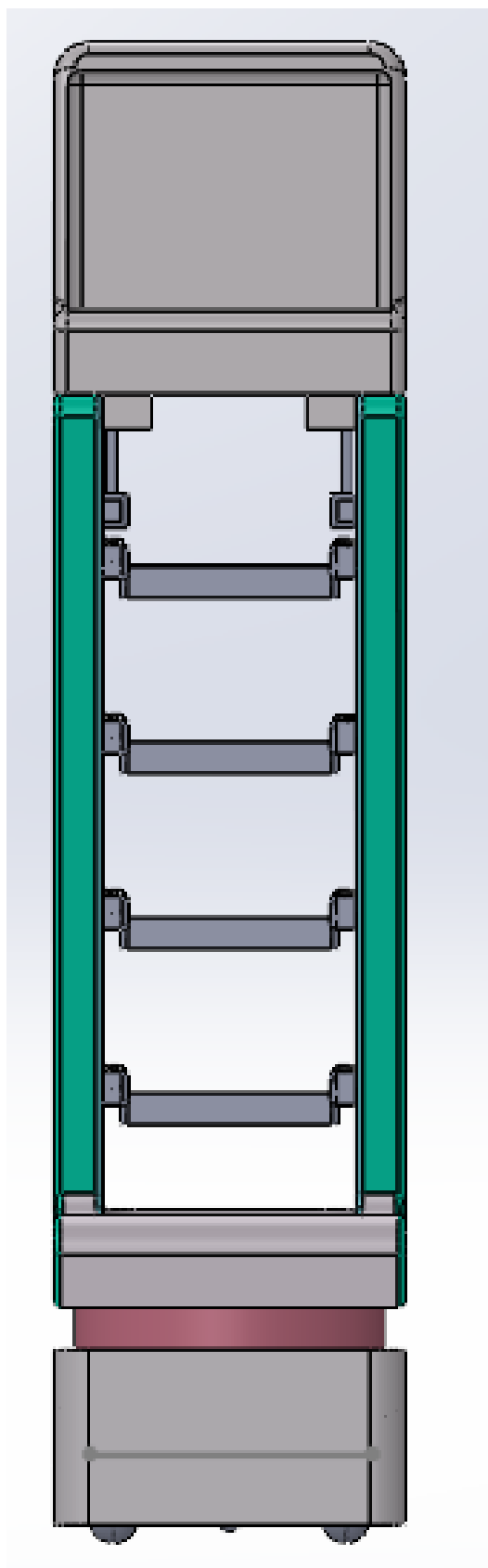
Widoki główne 3D z programu SOLIDWORKS:

Widok z przodu:



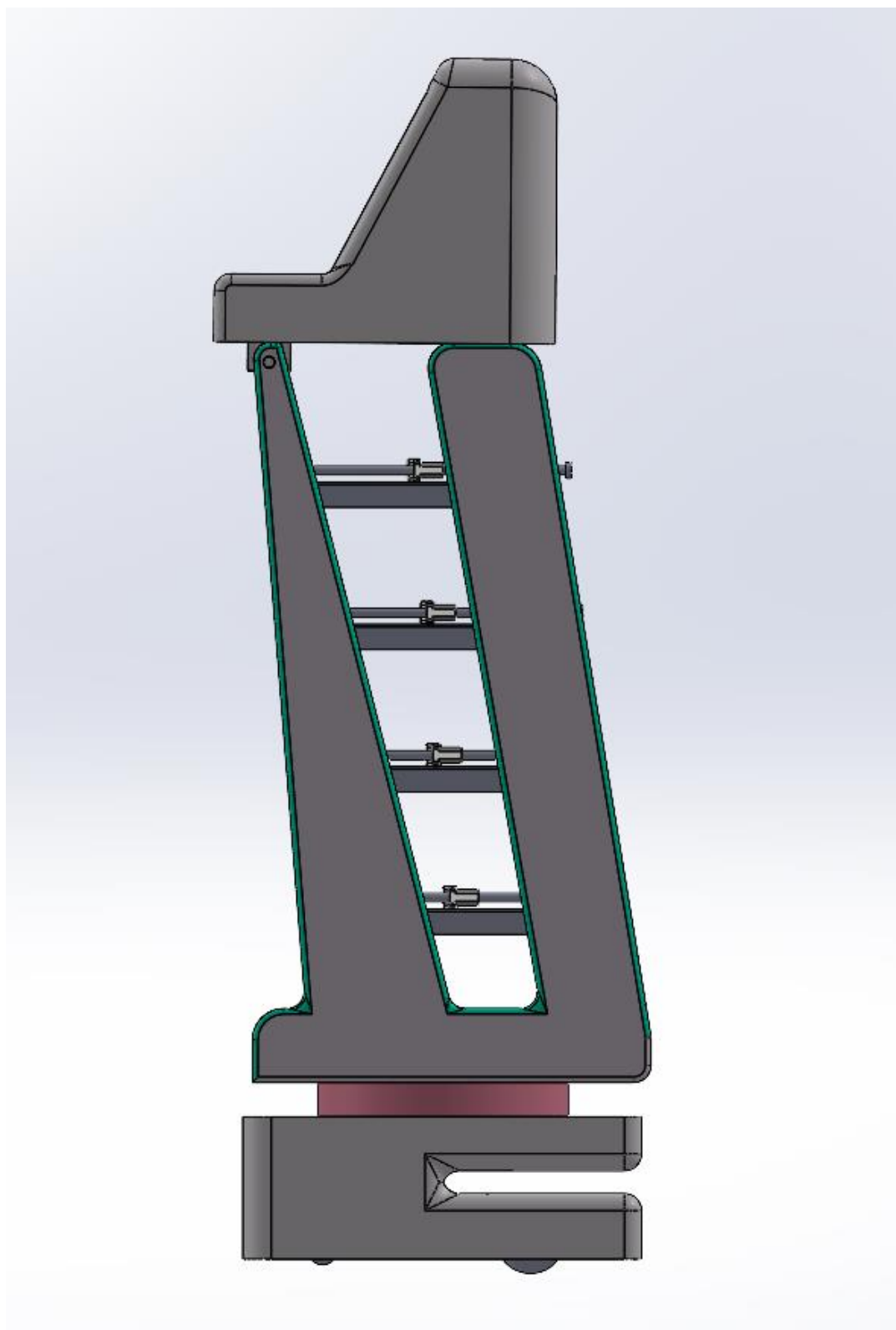
Rys. 12 Widok modelu robota z przodu.

Widok z tyłu:



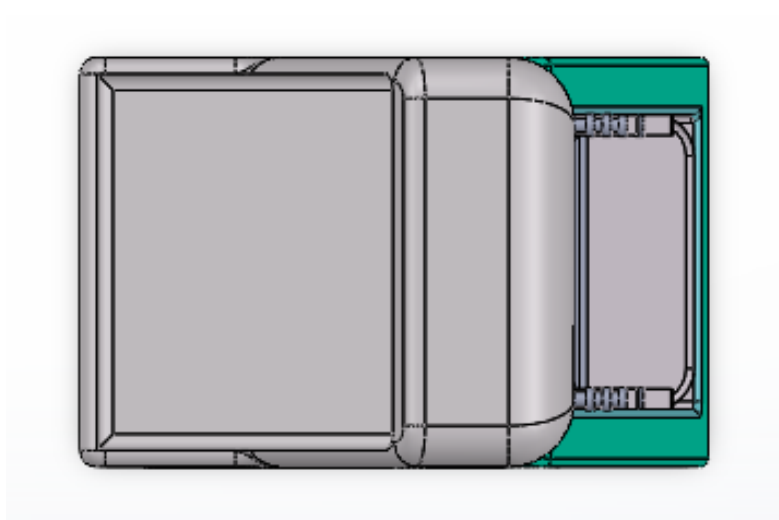
Rys. 13 Widok modelu robota z tyłu.

Widok z boku:



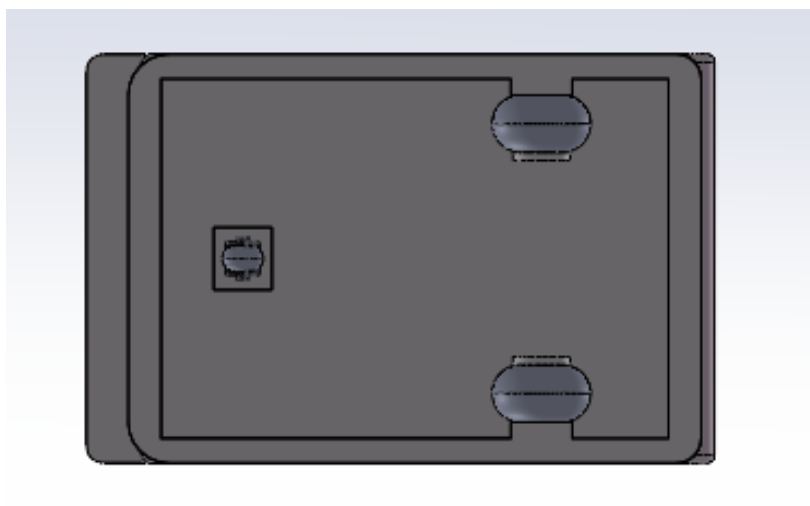
Rys. 14 Widok modelu robota z boku.

Widok z góry:



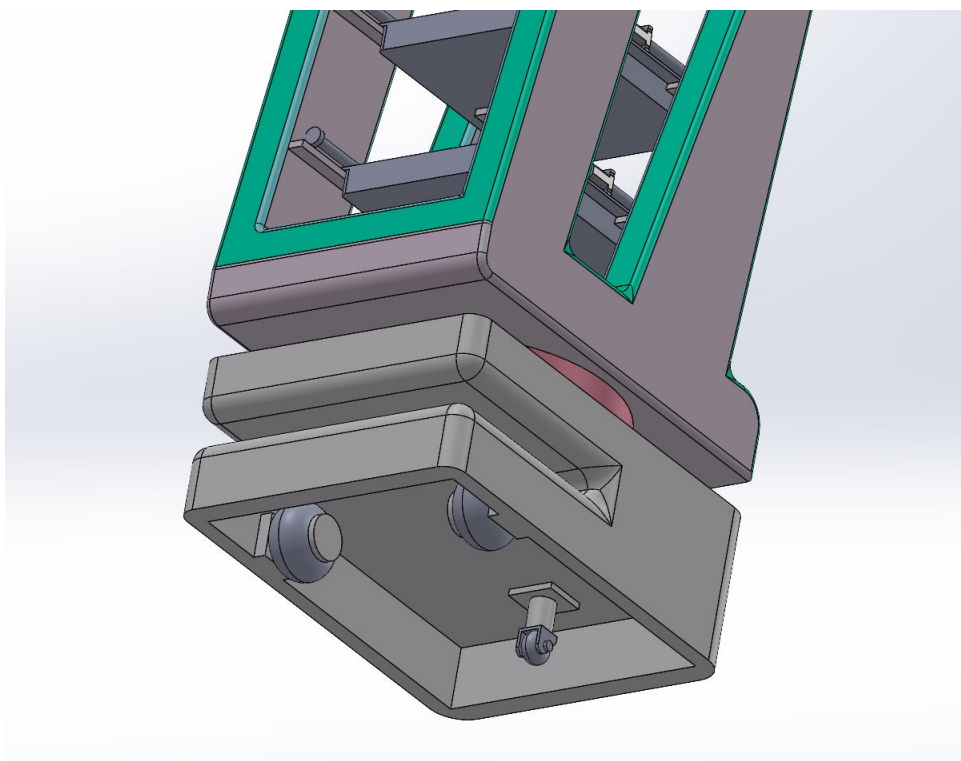
Rys. 15 Widok modelu robota z góry.

Widok z dołu:

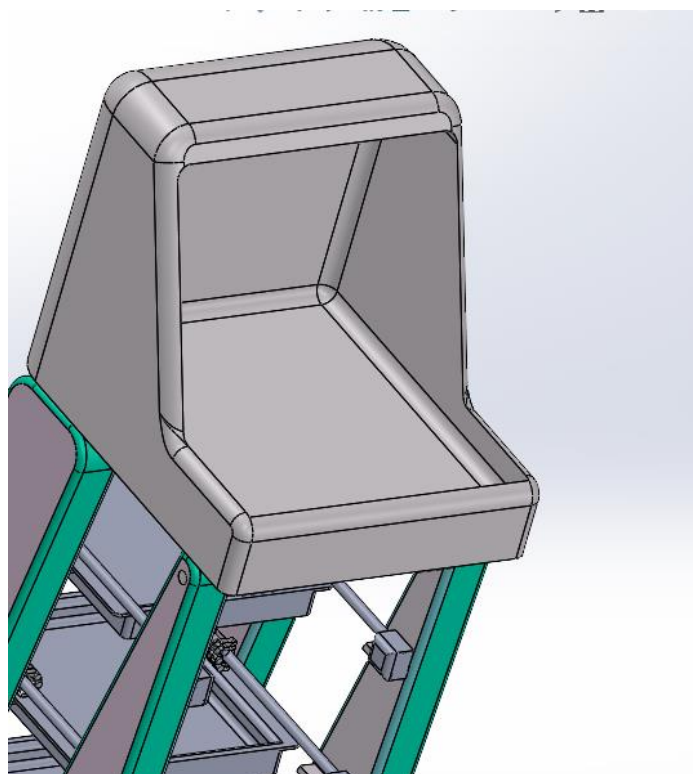


Rys. 16 Widok modelu robota z dołu.

Widok z dołu po skosie:



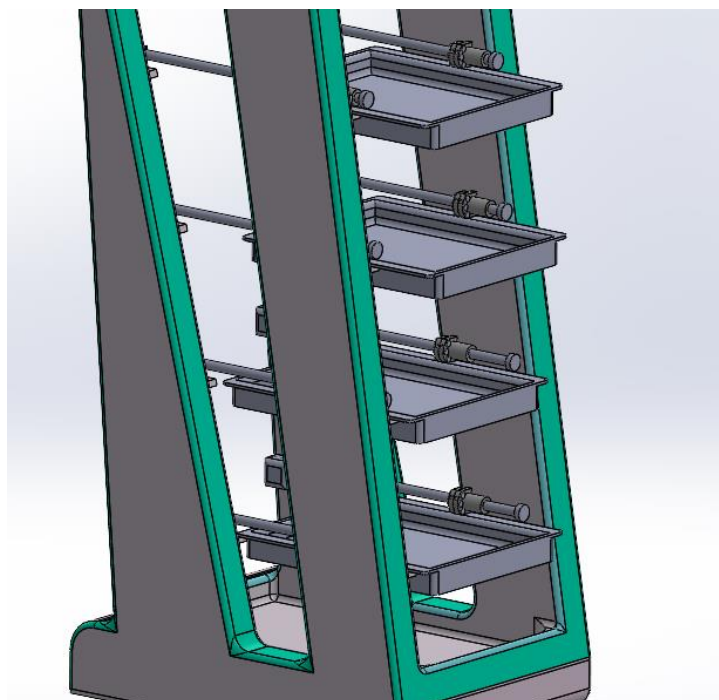
Rys. 17 Widok modelu robota z dołu po skosie.



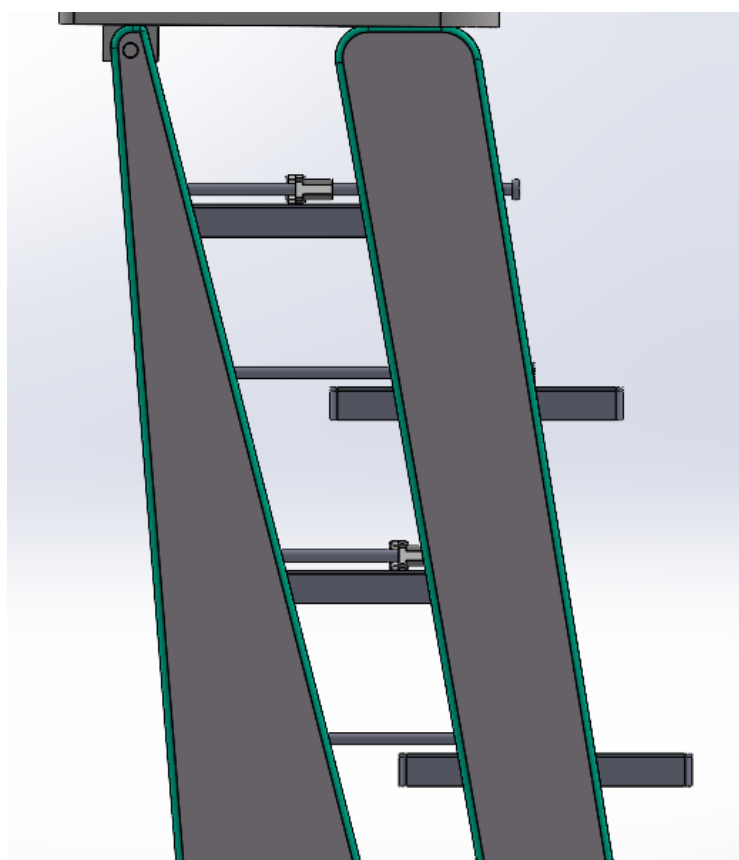
Rys.18 Widok modelu robota z góry po skosie.

Widoki 3D obrazujące ruchy oraz elementy robota z programu SOLIDWORKS:

Wysunięcie tacek:

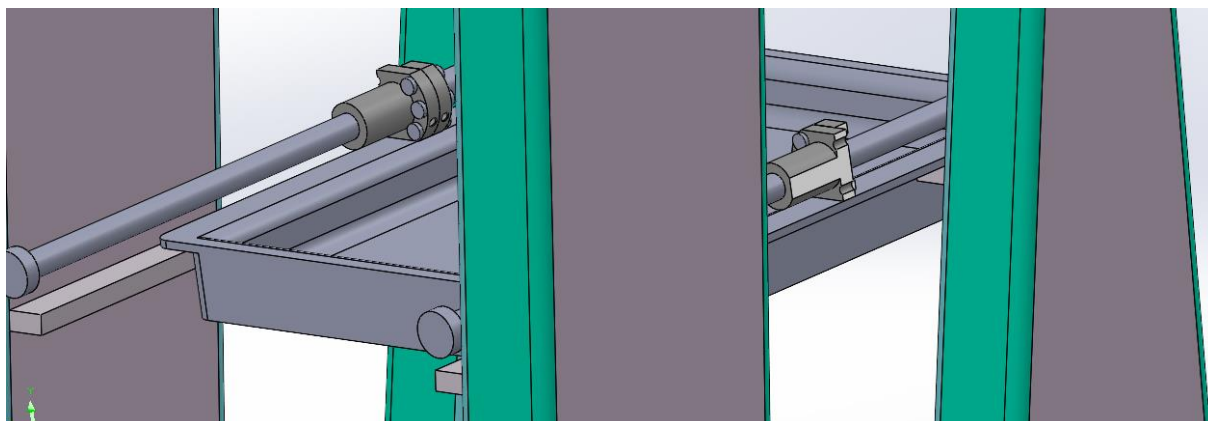


Rys. 19 Widok modelu robota po skosie obrazujący ruch tacek.

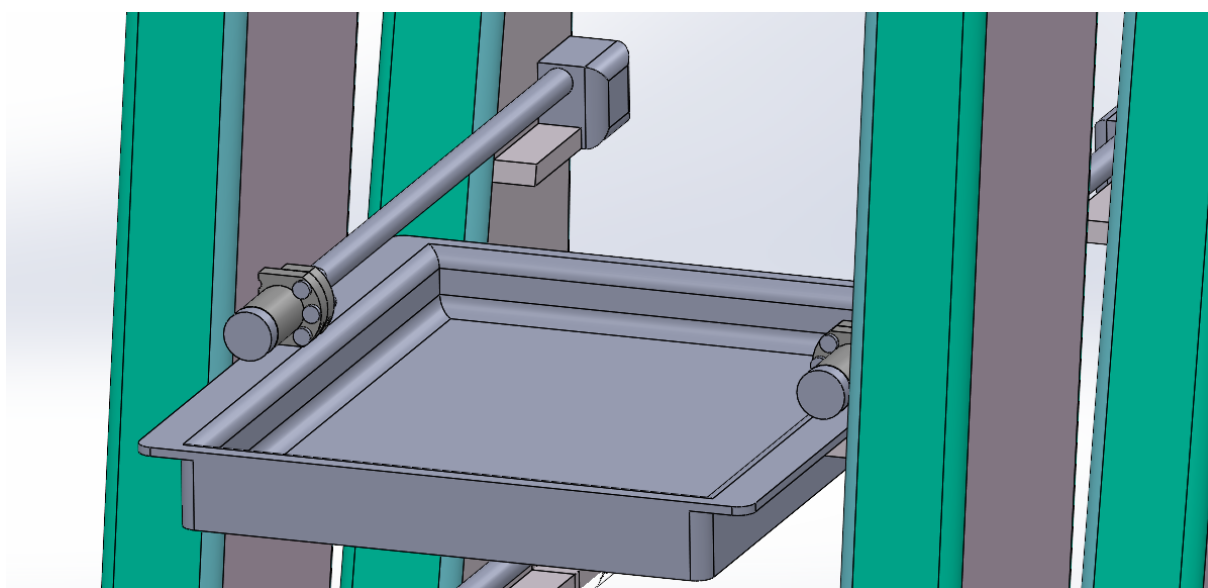


Rys. 20 Widok modelu robota z boku obrazujący ruch tacek.

Mechanizm śrubowo-toczny widoczny na złozeniu odpowiedzialny za wysuwanie tacek:

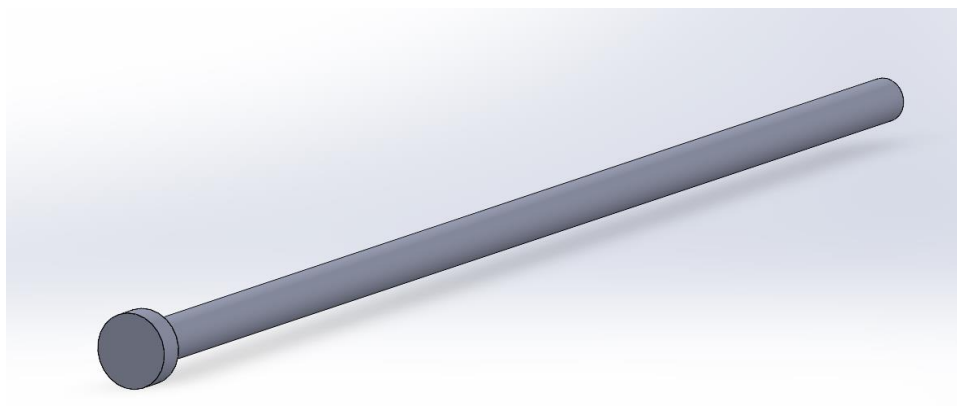


Rys. 21 Widok po skosie obrazujący mechanizm śrubowo-toczny na złozeniu w położeniu początkowym.

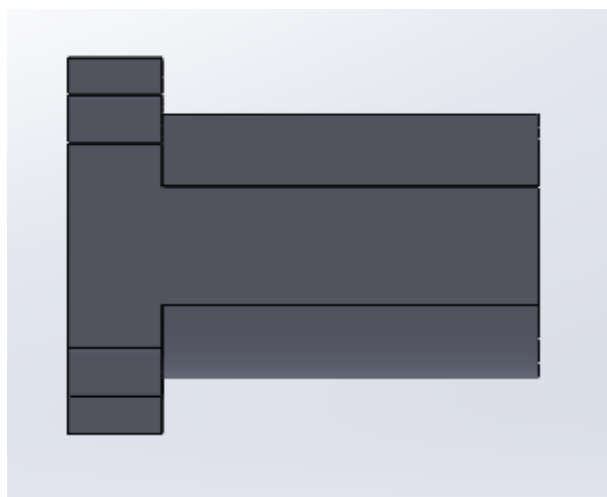


Rys. 22 Widok po skosie obrazujący mechanizm śrubowo-toczny na złozeniu w położeniu krańcowym.

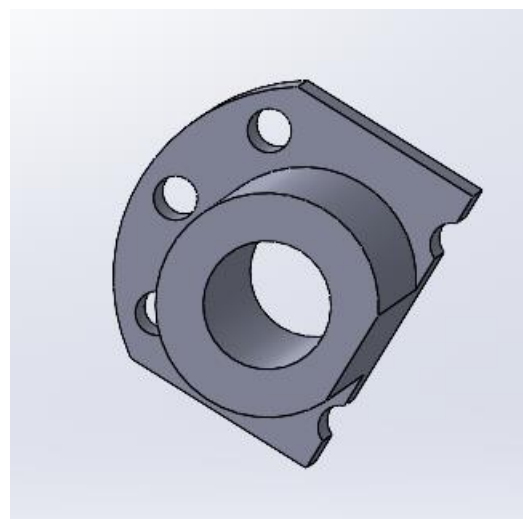
Elementy mechanizmu śrubowo-tocznego w uproszczeniu :



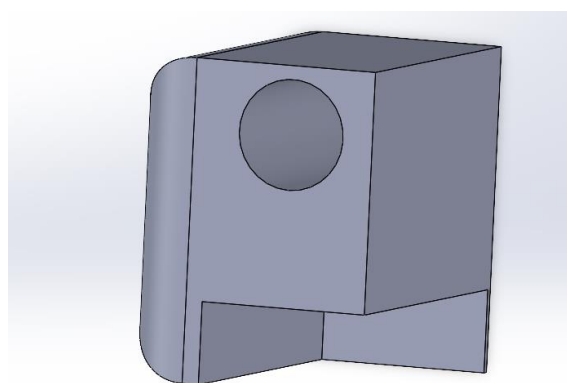
Rys. 23 Widok po skosie obrazujący element mechanizmu śrubowo-tocznego – śruby.



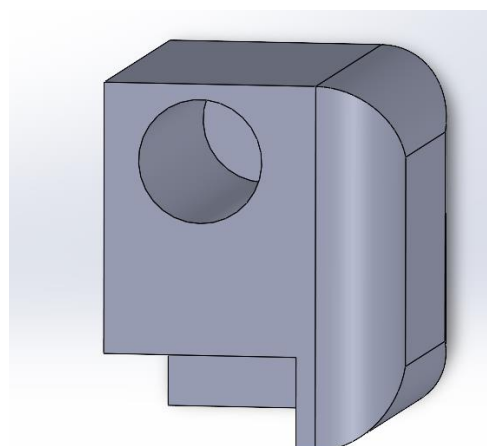
Rys. 24 Widok od boku obrazujący element mechanizmu śrubowo-tocznego – nakrętki.



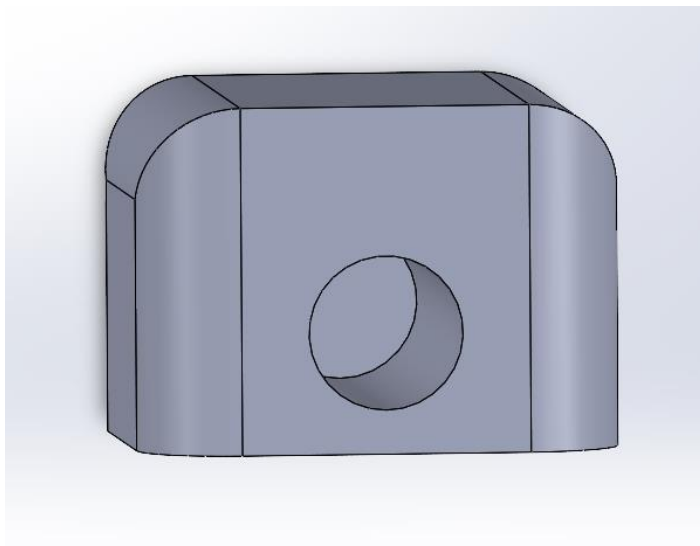
Rys. 25 Widok po skosie obrazujący element mechanizmu śrubowo-tocznego – nakrętki.



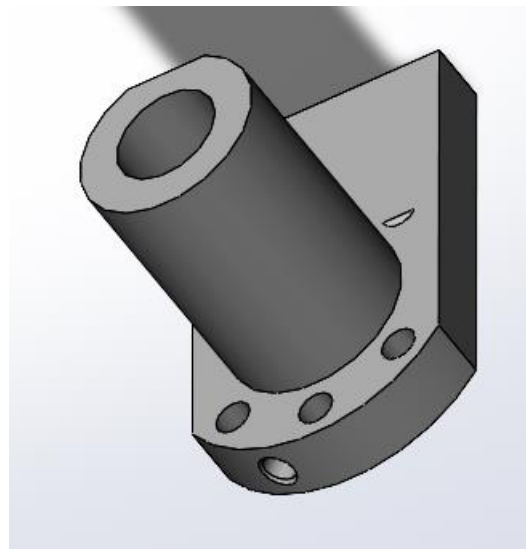
Rys. 26 Widok po skosie obrazujący element mechanizmu śrubowo-tocznego – uproszczony prawy silnik.



Rys. 27 Widok po skosie obrazujący element mechanizmu śrubowo-tocznego – uproszczony lewy silnik.

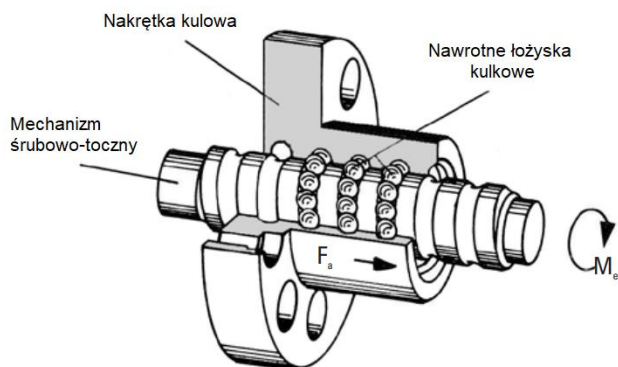


Rys. 28 Widok po skosie obrazujący element mechanizmu śrubowo-tocznego – uproszczony silnik podnoszący górną część robota.



Rys. 29 Widok po skosie obrazujący element mechanizmu śrubowo-tocznego – nakrętka mocowanej do korpusu robota.

Powyższy mechanizm w rzeczywistości wygląda następująco:



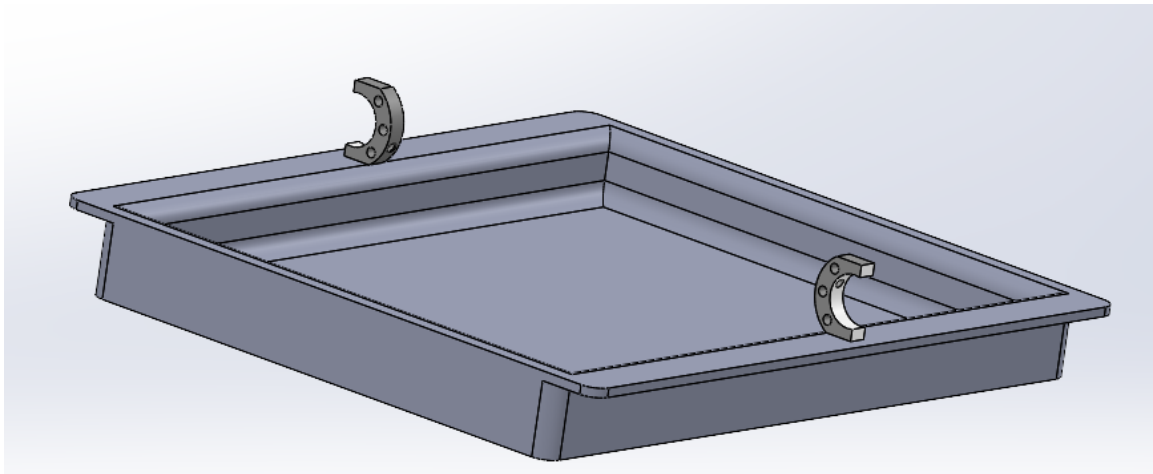
Rys. 30 Rysunek techniczny wizualizujący mechanizm wykorzystany do poruszania tackami, źródło: [Śruby Kulowe THOMSON \(bibusmenos.pl\)](http://ŚrubyKuloweTHOMSON(bibusmenos.pl))



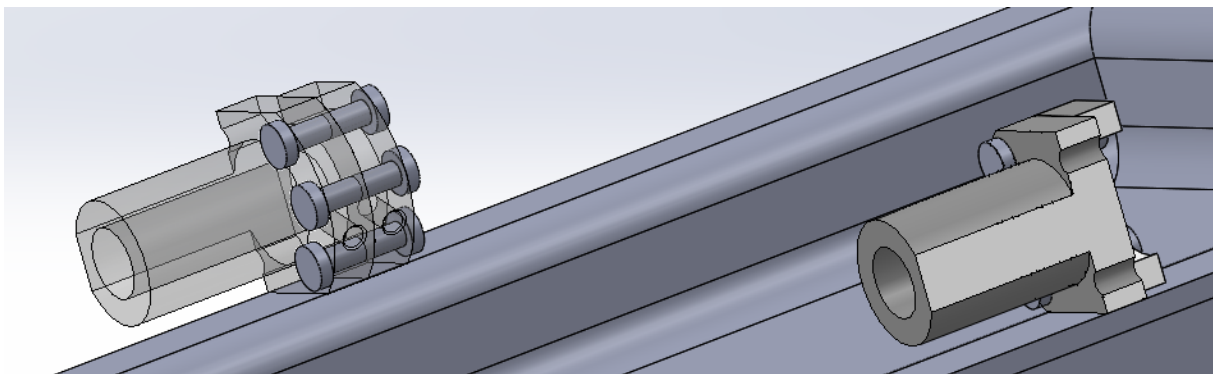
Rys. 31 Zdjęcie pokazujące rzeczywisty wygląd mechanizmu, źródło: [Śruby i Nakrętki Kulowe - EBMiA.pl](http://ŚrubyiNakrętkiKulowe-EBMiA.pl)

Do podnoszenia górnej części robota zastosowałam analogiczny mechanizm. Jednak tym razem elementem nieruchomym (utwierdzonym) jest nakrętka kulowa, a silnik wraz ze śrubą poruszają się, podnosząc górną część.

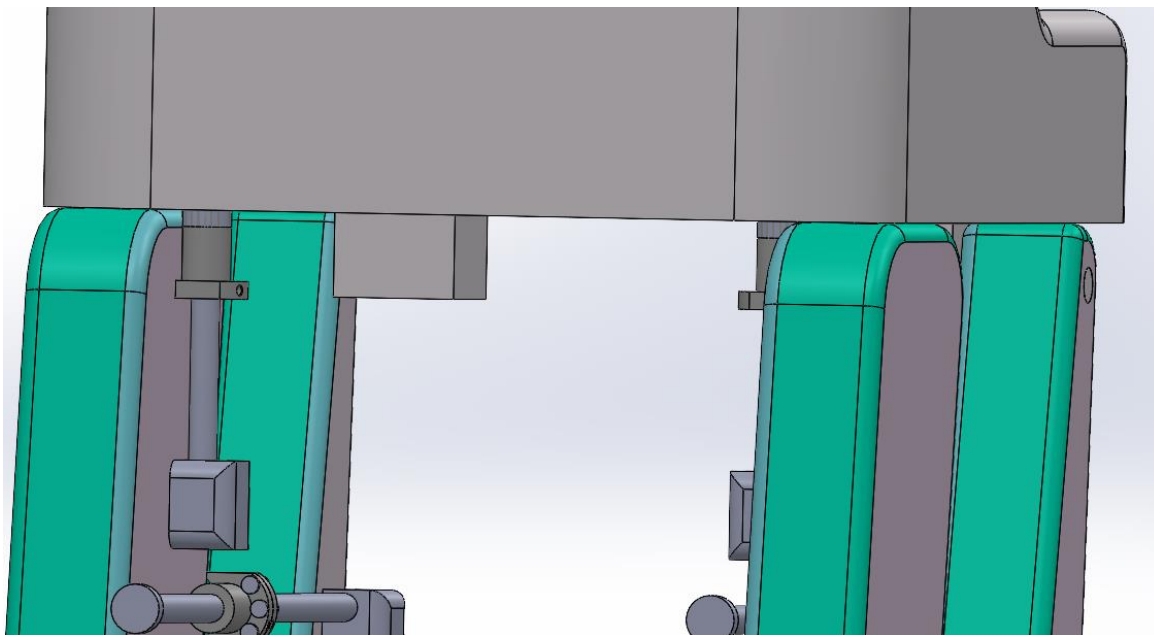
Tacka wraz z elementami łączącymi ją z mechanizmem odpowiedzialnym za jej ruch:



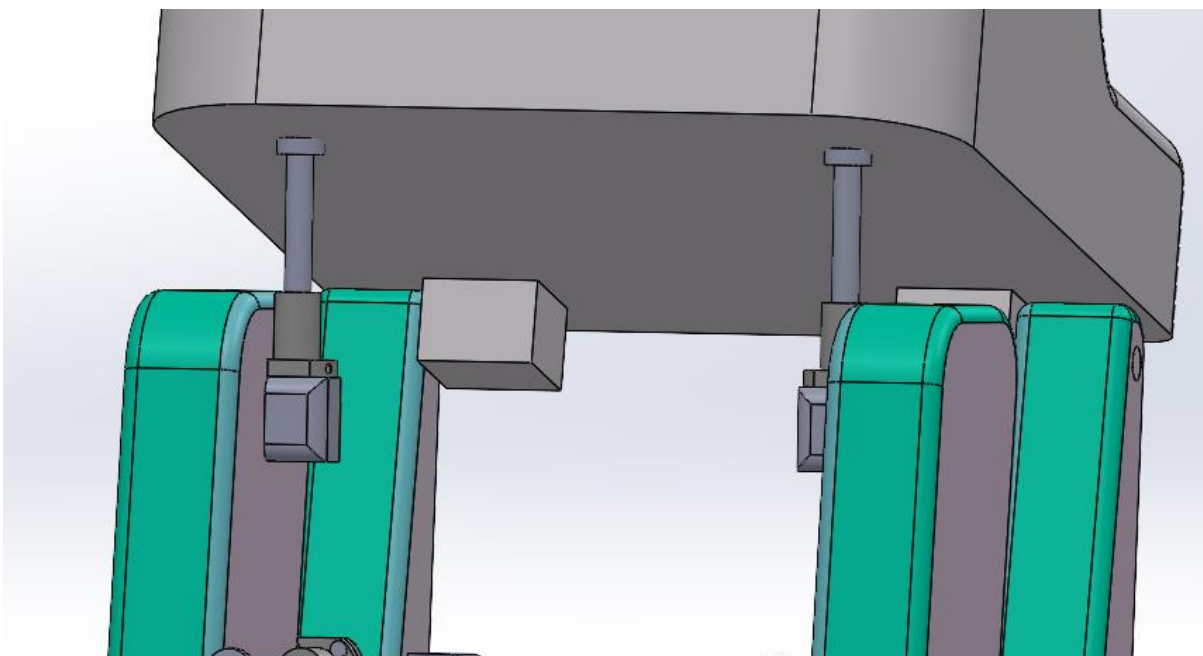
Rys. 32 Widok po skosie obrazujący tackę.



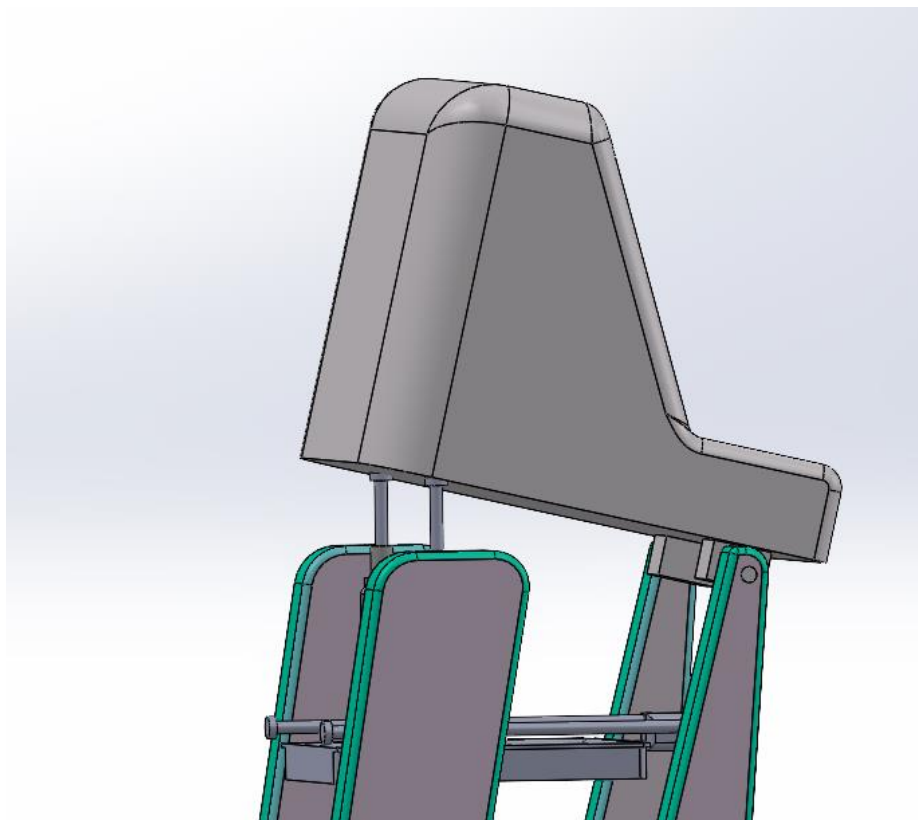
Rys. 33 Widok po skosie obrazujący tackę przymocowaną do nakrętki.



Rys. 34 Widok po skosie obrazujący mechanizm śrubowo-toczny na złożeniu w położeniu początkowym.



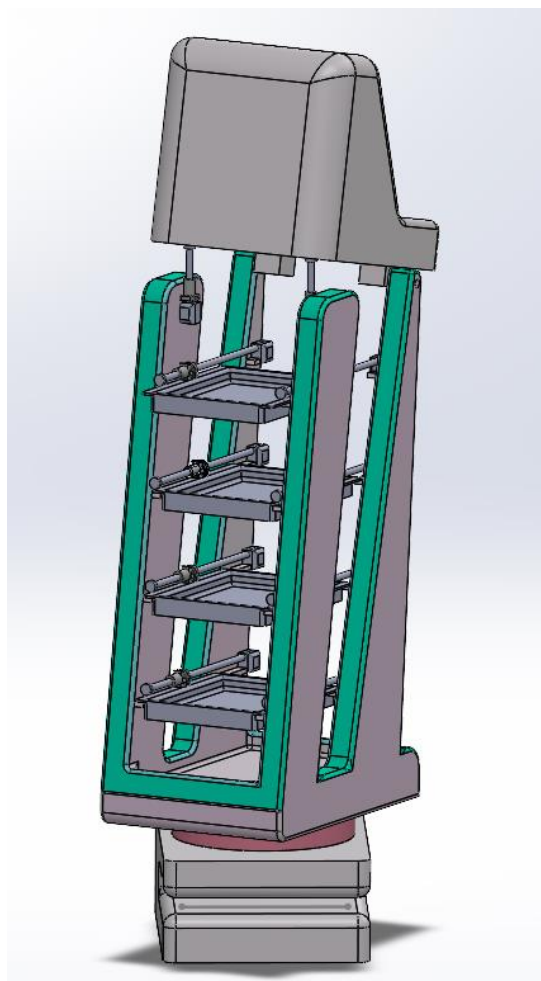
Rys. 35 Widok po skosie obrazujący mechanizm śrubowo-toczny na złożeniu w położeniu krańcowym.



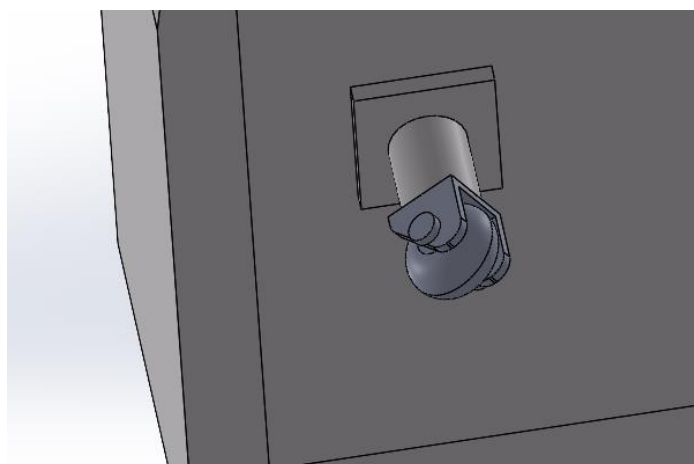
Rys. 36 Widok po skosie od boku obrazujący ruch górnej części robota.

Mechanizm odpowiedzialny za ruch górnej części robota mógłby być ukryty w obudowie, w celach estetycznych, jednak na potrzeby projektu jest on zamontowany na zewnątrz, aby był dobrze widoczny.

Obrót korpusu robota oraz koła podpierającego :



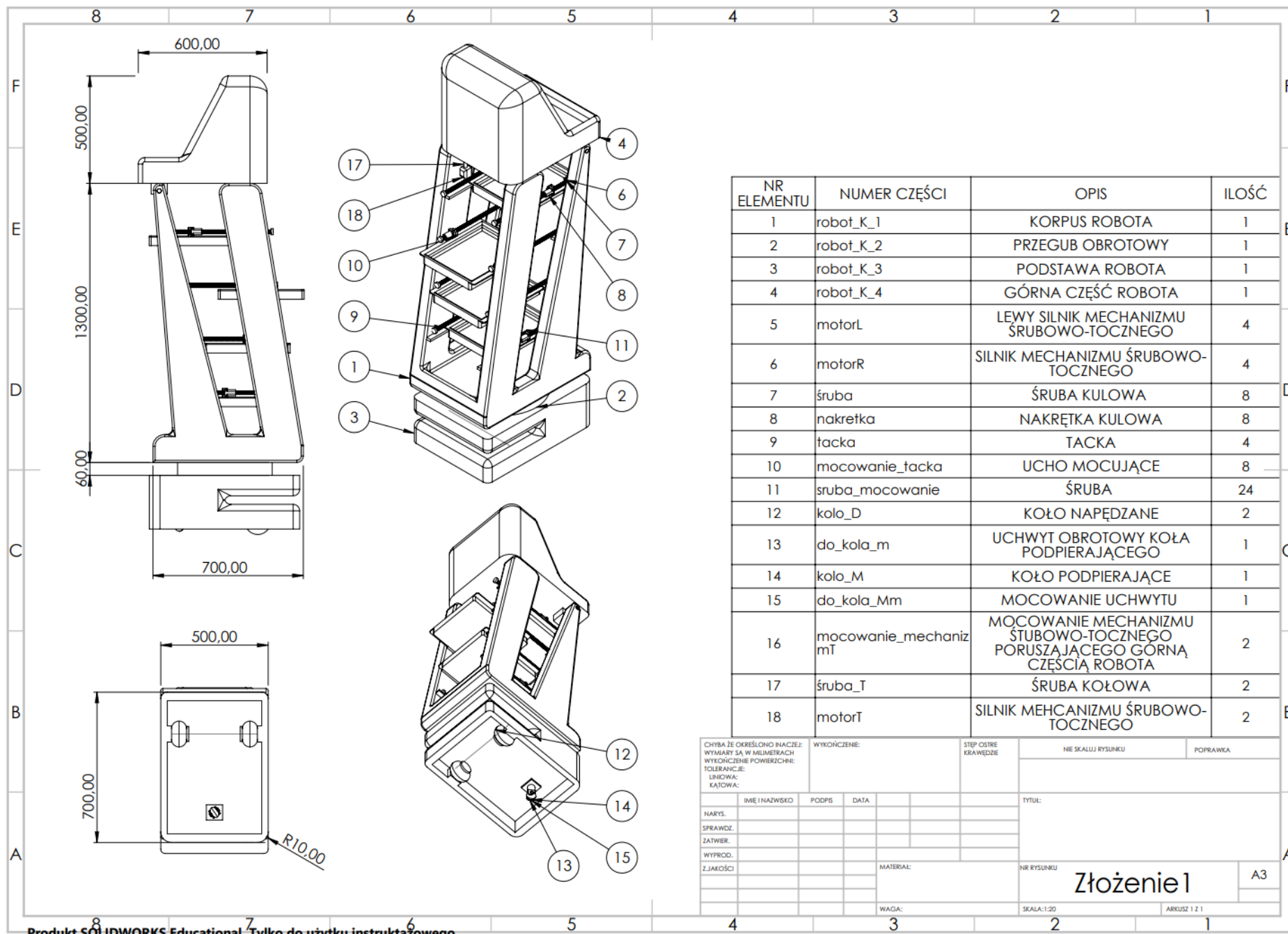
Rys.37 Widok po skosie obrazujący obrót korpusu robota.



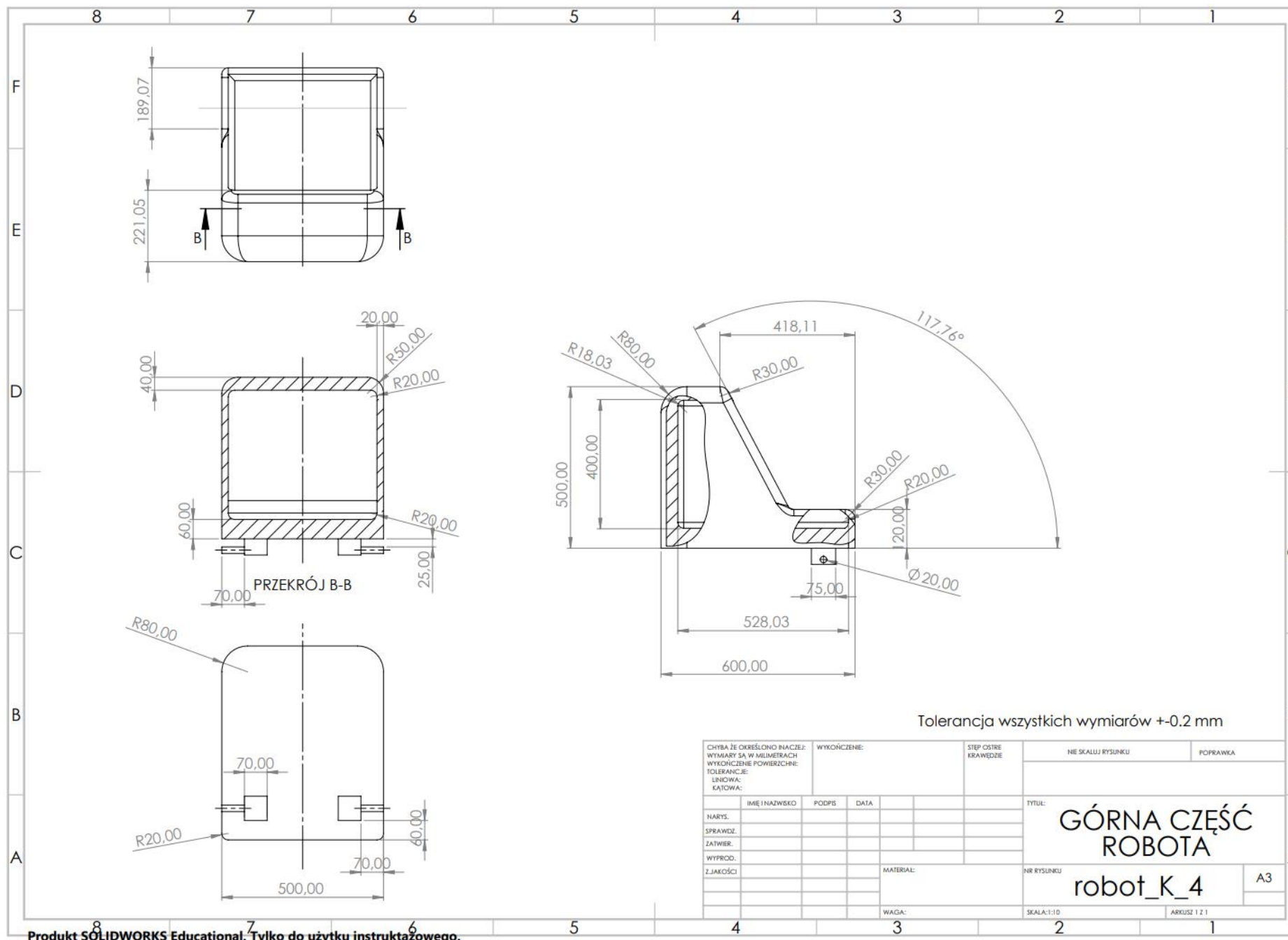
Rys.38 Widok po skosie obrazujący ruch koła podpierającego robota.

6. Dokumentacja techniczna robota kelnera

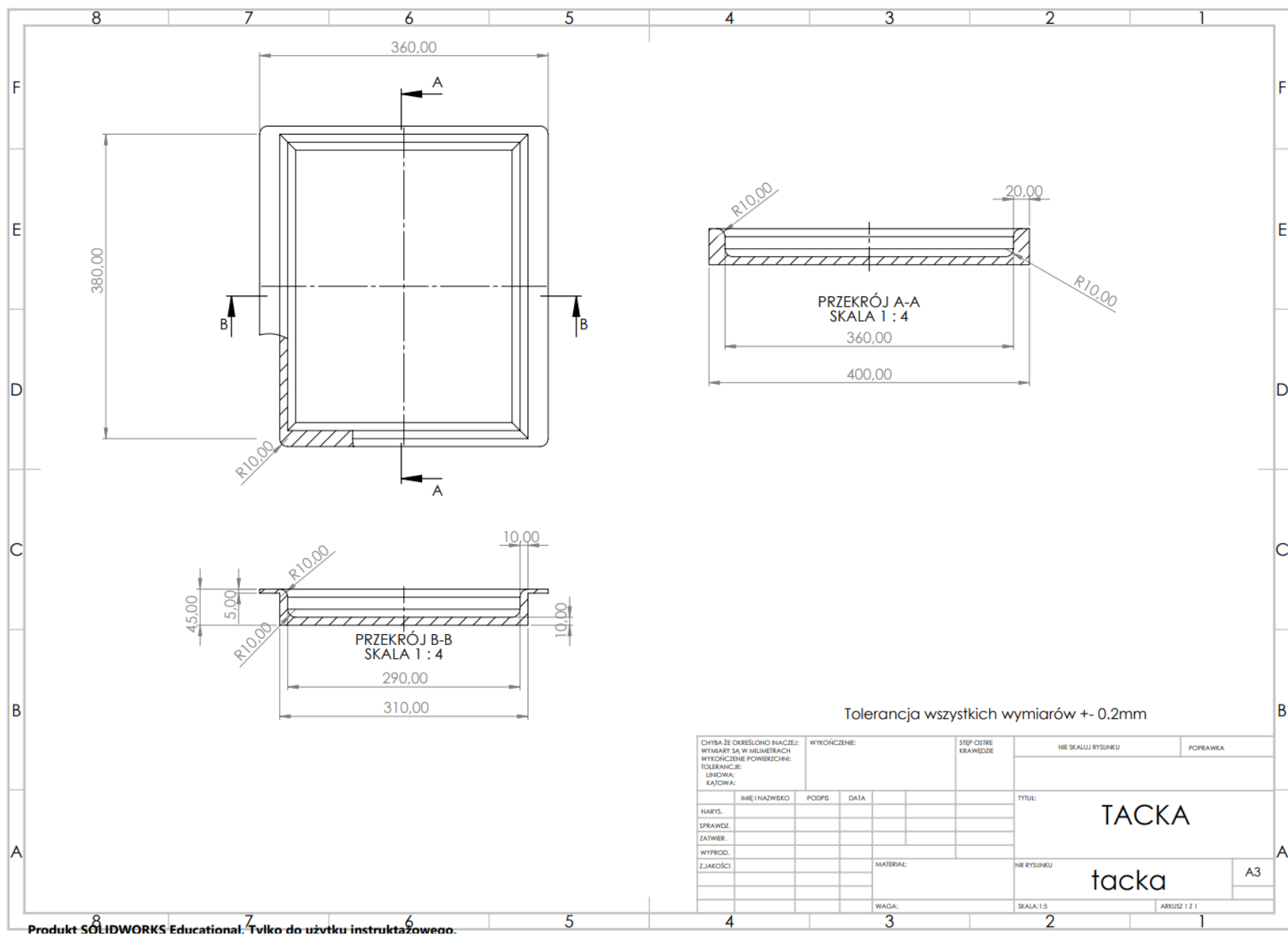
Na poniższych stronach zamieszone zostały: rysunek złożeniowy robota kelnera, rysunek wykonawczy tacki, rysunek wykonawczy elementu służącego do przymocowania tacki do nakrętki oraz rysunek wykonawczy górnej części robota.



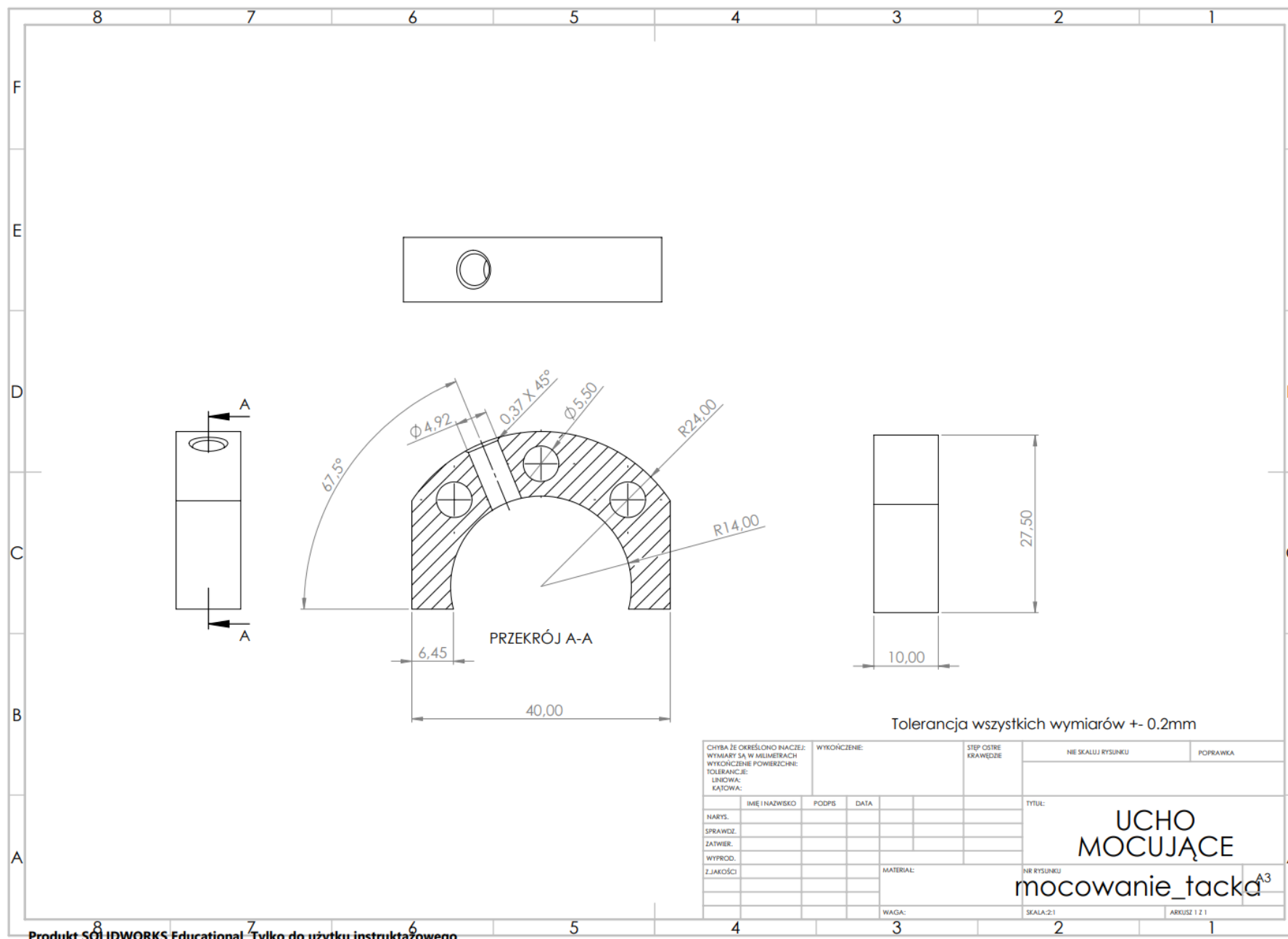
Rys. 39 Rysunek złożeniowy robota kelnera.



Rys. 40 Rysunek wykonawczy górnej części robota kelnera.



Rys. 41 Rysunek wykonawczy tacki.



Rys. 42 Rysunek wykonawczy elementu służącego do przymocowania tacki do nakrętki.