



WYDZIAŁ ELEKTRONIKI  
I TECHNIK INFORMACYJNYCH

Politechnika Warszawska  
Wydział Elektroniki i  
Technik informacyjnych

Praca dyplomowa Inżynierska

Informatyka

Tytuł:

Unikanie kolizji człowiek-robot  
z wykorzystaniem czujnika Kinect

Autor:

Piotr Walas

Opiekun naukowy:  
dr hab. inż. Wojciech Szynkiewicz

Warszawa, 18 kwietnia 2018

## Streszczenie

**Tytuł:** Unikanie kolizji człowiek-robot z wykorzystaniem czujnika Kinect

**Słowa kluczowe:** ROS, Gazebo, symulacja, nawigacja, kolizja, detekcja, człowiek

Celem pracy inżynierskiej było przygotowanie systemu pozwalającego na unikanie kolizji człowiek-robot. W celu realizacji zadania posłużono się symulatorem platformy dookólnej.

W niniejszej pracy omówione zostają problemy specyfiki działania robota w środowisku człowieka, wymagania jakie powinien spełniać budowany system oraz zaprezentowany zostaje jego projekt i implementacja.

Praca wymagała zrealizowania systemu nawigacyjnego, który na podstawie danych z receptorów i odometrii robota, jest w stanie autonomicznie kierować robotem. Ważnym elementem systemu jest zdolność detekcji człowieka. W tym celu wykorzystano skaner laserowy (LIDAR), sensor RGB-D Kinect oraz odpowiednie algorytmy przetwarzania obrazu, dzięki którym możliwe było uwzględnienie strefy osobistej człowieka.

System zbudowano z wykorzystaniem programowej struktury ramowej ROS, bibliotek OpenCV i Dlib oraz symulatora Gazebo.

## Abstract

**Title:** Avoiding human-robot collision using Kinect sensor

**Keywords:** ROS, Gazebo, simulation, navigation, collision, detection, human-aware

The aim of thesis was to design human-robot collision avoidance system. In order to accomplish this goal, the omnidirectional mobile platform was used.

This paper discusses issues concerning environment that contains people, specification of working in such environment, requirements which need to be met. Afterwards, project and implementation of particular system are presented.

Thesis required implementation of navigation system that allows autonomous navigation, based on received sensor's data and robot's odometry. Crucial part of system is ability to detect human and take human's personal space into consideration. LIDAR sensor, Kinect RGB-D sensor and proper image processing algorithms were utilized for that purpose.

System was implemented based on ROS framework, OpenCV and Dlib libraries and Gazebo simulator.

# **Spis treści**

<b>1 Wstęp</b>	<b>4</b>
1.1 Motywacje . . . . .	4
1.2 Cel pracy . . . . .	5
1.3 Założenia . . . . .	6
<b>2 Przegląd wiedzy</b>	<b>7</b>
2.1 Dotychczasowe dokonania . . . . .	7
<b>3 Opis bazy mobilnej</b>	<b>12</b>
3.1 Efektory . . . . .	12
3.1.1 Dookólna baza jezdna . . . . .	12
3.2 Receptory . . . . .	14
3.2.1 Kinect . . . . .	14
3.2.2 LIDAR . . . . .	16

# Rozdział 1

## Wstęp

### 1.1 Motywacje

Zagadnienie budowy robotów działających w środowisku człowieka stało się w ostatnich latach jedną z wiodących gałęzi robotyki. Wraz z rozwojem branży, zarówno pod względem wzrostu mocy obliczeniowej, poprawy motoryki robotów jak i szeroko rozumianego aspektu wizyjnego to, co dawniej pozostawało w sferze prac teoretycznych, dziś może zostać zaimplementowane. Skutkiem tego coraz częściej mowa o robotach, które współpracują z człowiekiem, bądź pracują w jego towarzystwie. Przykładem takich robotów są roboty asystenci, przewodnicy czy roboty mogące wykonywać pracę fizyczną. Niebagatelizowalną kwestią jest starzenie się społeczeństwa, z czym może zmierzyć się robotyka, dostarczając roboty pomagające starszym ludziom zarówno w aspekcie czysto fizycznym, jako ich pomocnicy, ale również w aspekcie społecznym, w rozumieniu walki z samotnością.

Niezależnie od zadań jakie postawię przed nimi ich twórcy, roboty takie muszą mieć zdolność unikania kolizji z człowiekiem. Jest to zagadnienie nieco szersze niż zagadnienie unikania kolizji z innymi przeszkodami, gdyż należy wziąć pod uwagę kwestie bezpieczeństwa ludzi oraz kwestie społecznej akceptowalności ruchu robota. Ważnym jest, aby robot reagował odpowiednio na położenie ludzi, ich orientacje w przestrzeni, przestrzenne rozmieszczenie grupy ludzi, czy inne aspekty wynikające z uwarunkowań kulturowych. Przykładem niech będzie fakt, iż robot nie powinien zbliżać się do ludzi zbyt blisko, poruszać się tuż za ich plecami, czy wykonywać gwałtownych ruchów w ich pobliżu.

## 1.2 Cel pracy

Celem pracy jest stworzenie całościowego systemu obejmującego nawigacje robota mobilnego, uwzględniającą położenie i orientację ludzi oraz samą detekcję ludzi w środowisku pracy.

W aspekcie nawigacji istotną część systemu stanowi zdolność do budowy reprezentacji aktualnego środowiska pracy. Reprezentacja ta zawierać powinna informację o lokalizacji robota, występujących przeszkodach oraz o wykrytych osobach. Robot na bazie tych danych powinien generować możliwie optymalną ścieżkę ruchu do punktu zadanego oraz egzekwować ruch robota, poprzez zadawanie odpowiednich prędkości liniowych i kątowych bazy jednej.

Podsystemy detekcji ludzi w środowisku wykrywać będą położenie, rotację oraz prędkość człowieka. Aby zrealizować to zadanie użyte zostaną sensory LIDAR oraz sensor Kinect. Na danych pochodzących z tych czujników operować będą algorytmy detekcji odpowiednio nóg, oraz części głowy osoby. Wykrycie nóg pozwoli na stwierdzenie położenia oraz prędkości danej osoby, natomiast na podstawie aktualnie wykrytych części głowy można estymować kierunek w jaki zwrócona jest twarz człowieka. W efekcie system otrzyma informację o położeniu strefy osobistej człowieka, co z kolei pozwoli na odpowiednią nawigację.

Doprecyzowane zadania niezbędne zrealizowania systemu przedstawiono w poniższej liście:

- Przystosowanie istniejącego symulatora bazy jezdnej do integracji z pozostałymi elementami systemu
- Zdefiniowanie modelu Kinecta, zimplementowanie jego logiki i dodanie do symulacji
- Dodanie możliwości obrotu Kinecta w celu śledzenia wykrytego uprzednio człowieka
- Przygotowanie środowiska testowego w symulatorze Gazebo
- Dodanie do symulacji modelu człowieka oraz możliwości poruszania nim za pomocą klawiatury
- Zapewnienie lokalizacji robota
- Przygotowanie map kosztu

- Implementacja planisty trajektorii
- Implementacja kontrolera platformy mobilnej
- Detekcja nóg człowieka i śledzenie jego położenia oraz prędkości za pomocą sensorów LIDAR
- Detekcja części głowy człowieka za pomocą Kinecta i wyliczenie wektora reprezentującego kierunek twarzy osoby
- Dokonanie konkatenacji list ludzi wykrytych przez sensor LIDAR i Kinecta w celu stworzenia wspólnej listy wszystkich wykrytych ludzi
- Implementacja strefy osobistej człowieka jako odpowiedniego kształtu widocznego na mapie kosztu

### 1.3 Założenia

Fundamentalnym założeniem jest wykorzystanie holonomicznej bazy jezdnej. Baza taka posiada zdolność do ruchu w dowolnym kierunku, w tym obrotu w miejscu. Pozwala to na większą elastyczność w wyborze dopuszczalnych trajektorii ruchu, co mogłoby stanowić istotny problem w przypadku wyboru np. robota o napędzie różnicowym.

W realizacji zadania zostanie użyty istniejący, odpowiednio przystosowany symulator bazy jezdnej robota Velma. Zastosowanie symulatora w znaczący sposób przyspiesza implementację, a przede wszystkim testowanie rozwiązania, bez potrzeby narażenia rzeczywistego robota na uszkodzenie wynikające z wadliwego działania systemu. Ważne jednak, by system w stosunkowo prosty sposób można było przenieść w przyszłości na rzeczywistą platformę.

Przyjętym założeniem jest przyjęcie orientacji człowieka na podstawie orientacji jego głowy. Zadanie można rozwiązać inaczej, biorąc pod uwagę ustawienie jego tułowia, lecz zastosowana koncepcja jest interesująca z punktu widzenia zbadania sprawności detekcji tak niewielkich obiektów jak profil nosa.

# Rozdział 2

## Przegląd wiedzy

### 2.1 Dotychczasowe dokonania

Problem nawigacji robotów w środowisku człowieka, znany w literaturze angielskiej jako *human-aware navigation*, jest tematem o rosnącej popularności. W trakcie badań sklasifikowano następujące problemy odnoszące się do ruchu robota [1]:

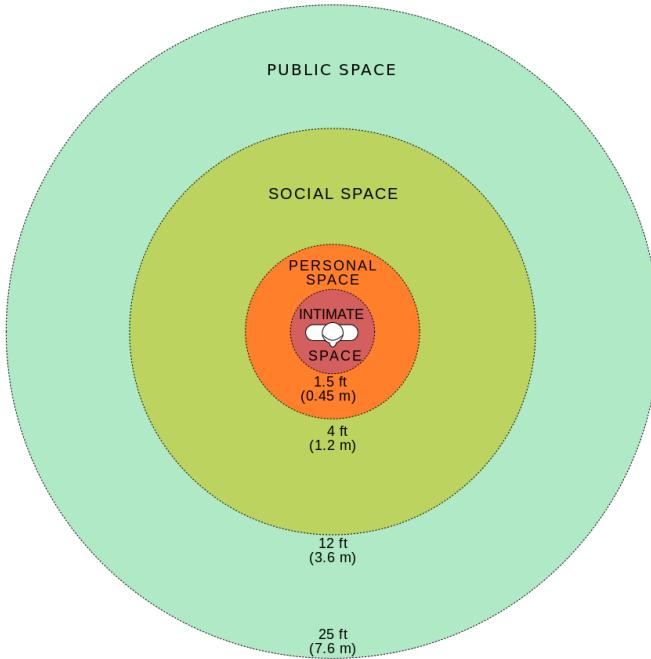
- Komfort ludzi, czyli brak stresu wywołanego nieprawidłowym zachowaniem robota
- Naturalność, a więc podobieństwo zachowania robota do ludzkiego
- Społeczność, czyli zdolność robota do rozumienia i imitacji konwencji kulturowych.

Zauważono również że kwestia bezpieczeństwa ruchu nie jest tożsama z komfortem ludzi, gdyż robot może poruszać się bezpiecznie, nie doprowadzać do kolizji z człowiekiem, lecz dla człowieka jego zachowanie może wydawać się niepewne, nie wzbudzać zaufania do użytej technologii [1]

Podstawą do rozważań jest studium E. T. Halla na temat dystansu interpersonalnego [2], które wyróżnia cztery strefy:

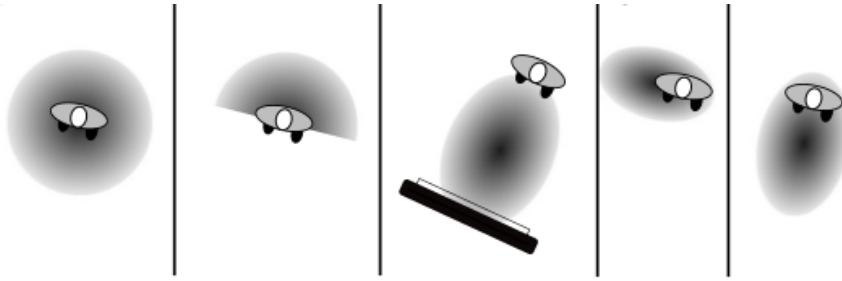
- strefa intymna - strefa bliskich relacji, dotyk - do 0.5m
- strefa personalna - interakcje w obrębie przyjaciół i rodziny - od 0.5m do 1.2m
- strefa społeczna - interakcje ze znajomymi - od 1.2m do 3.7m

- - strefa publiczna - publiczne wystąpienia - od 3.7m.



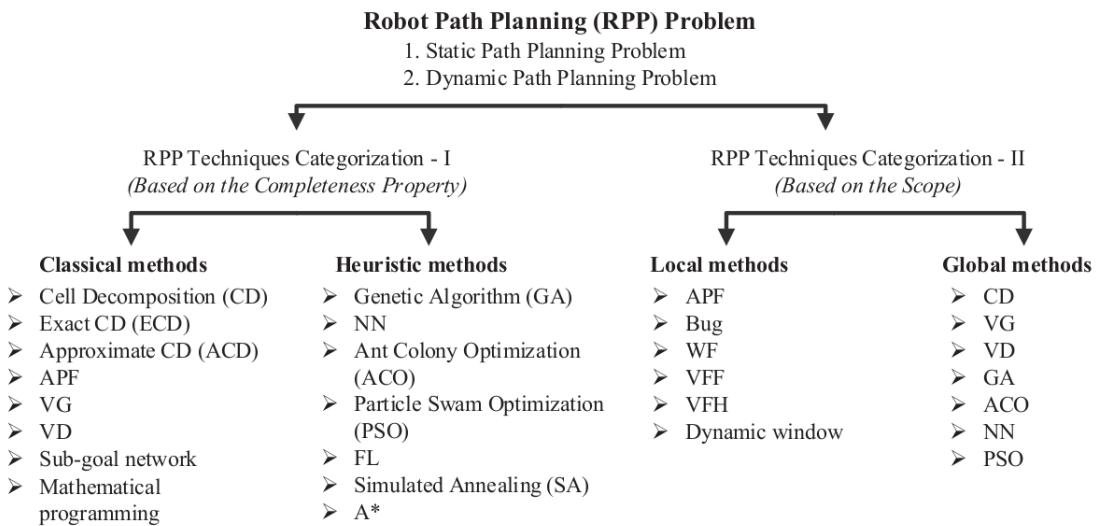
Rysunek 2.1: Przedstawienie stref zaproponowanych przez E.T. Halla w metrach i stopach [3]

Badania dotyczące stref społecznych mają istotny wkład w kwestii naturalności ruchu robota. Robot pracujący z człowiekiem musi przestrzegać odległości, zależnie od wykonywanych zadań i (prawdopodobnie) konstrukcji robota. Strefy personalne implementowane najczęściej za pomocą pól potencjału, bądź pewnych funkcji kosztu [1]. Drugie podejście obrazuje rysunek 2.2. Podobną koncepcję można również wykorzystać w przypadku proszującego się człowieka, gdzie kształt strefy personalnej, na bazie wektora ruchu, można obliczyć przy pomocy funkcji gaussowskich [4]. Część badaczy wysuwa jednak wniosek, że istotniejszym czynnikiem niż przestrzeganie dystansu, jest przestrzeganie zasad społecznych, kulturowych. To ich naruszenie powoduje dyskomfort pracy z robotem [1] [5]. Wskazaną umiejętnością robota jest także redukowanie prędkości przy podejściu do człowieka, oraz zachowanie odpowiedniego kierunku skierowania sensorów, jeżeli robot, w jakimś stopniu, posiada budowę humanoidalną.



Rysunek 2.2: Rysunki przedstawiają przykładowe strefy o zwiększym koszcie ruchu wokół człowieka. Mogą się one różnić w zależności od przyjętych założeń lub kontekstu [1]

Kwestia nawigacji i unikania kolizji robot-człowiek nie byłaby możliwa bez rozwiązania problemu planowania trajektorii ruchu. Opracowane na przestrzeni lat algorytmy przedstawia rysunek 2.3.

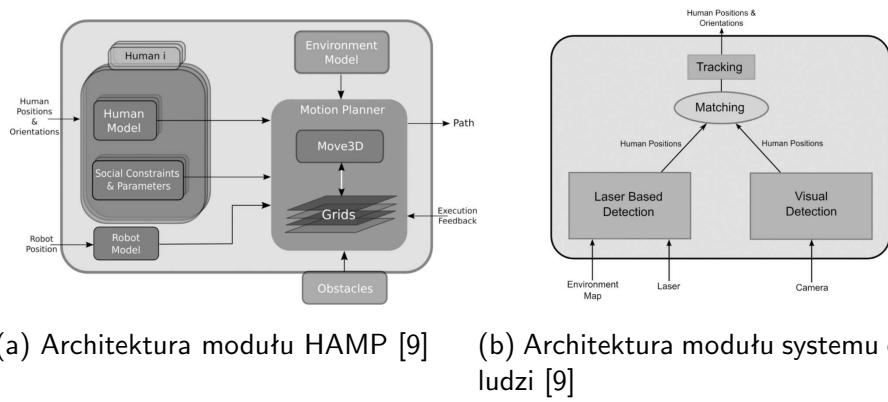


Rysunek 2.3: Taksonomia algorytmów planowania ścieżki dla robotów mobilnych [6]

Algorytmy planowania ścieżki można podzielić na metody klasyczne i heurystyczne. Celem metod klasycznych jest wyznacznie najlepszej możliwej ścieżki, bądź stwierdzenie, że takowa nie istnieje. Odbywa się to jednak kosztem dużego nakładu obliczeniowego. Algorytmy heurystyczne nie gwarantują znalezienia ani optymalnego rozwiązania, ani znalezienia rozwiązania w ogóle [7]. Zaletą algorytmów heurystycznych jest jednak większa szybkość działania. Algorytmy można podzielić również na metody globalne i lokalne. Globalne odnoszą się do pewnego zbioru danych na temat przeszkód w środowisku, które znane jest a priori, nie są one jednak efektywne w przypadku ruchomych przeszkód. Do tego celu wykorzystuje się metody lokalne, które operują na

danych dostarczonych przez receptory, takie jak kamery RGB czy skanery laserowe [6] [7] [8]. Metody lokalne nie są jednak odpowiednie do wyznaczenia globalnej ścieżki ruchu ze względu na możliwość niepowodzenia generacji ścieżki. Często więc systemy planowania trajektorii ruchu budowane są z użyciem dwóch planistów, globalnego, który wyznacza ogólną ścieżkę ruchu od robota do zadanego celu i lokalnego, którego zadaniem jest obliczenie aktualnego wycinka ścieżki [6].

Kompletnym systemem realizującym zadania nawigacji w środowisku człowieka jest system opracowany przez E.A. Sisbota, L.F Marina-Uriasa, R. Alami i T. Simeona w 2007, opisany w pracy *A Human Aware Mobile Robot Motion Planner* [9]. Praca zakładała stworzenie planisty ruchu uwzględniającego pozycję, posturę (siedząca, stojąca) oraz zależności przestrzennych takich jak nie przejeżdżanie w niewielkiej odległości od człowieka, tuż za jego plecami, czy też bliskość przeszkód blokujących pole widzenia danej osoby. Architektura planisty znajduje się na rysunku 2.4a.



Rysunek 2.4: Architektura systemu

Niezależnie od modułu planisty zaimplementowano również system wykrywania człowieka na bazie odczytów sensorów laserowych oraz kamery RGB. Dane pozyskane z sensorów laserowych były przetwarzane przez algorytm pozwalający na wykrycie nóg człowieka. Na tej podstawie można było stwierdzić jego położenie. Obraz z kamery RGB służył do detekcji twarzy z bliskiej odległości. Wykryte osoby były następnie śledzone przez robota. Architektura systemu detekcji znajduje się na rysunku 2.4b.

Badacze sformułowali dwa kryteria: bezpieczeństwa - zapewniające bezpieczeństwo człowieka i robotowi, poprzez zapewnienie odpowiedniego dystansu oraz widoczności - stwierdzono, że

ludzie czują się lepiej, gdy robot znajduje się w ich polu widzenia. Koszt łączny bezpieczeństwa i widoczności 2.1, był następnie nanoszony na mapę kosztu, z której korzystał zaimplementowany planista ruchu.

$$Cost_{merged}(x, y) = w_1 Cost_{safety}(x, y) + w_2 Cost_{visibility}(x, y) \quad (2.1)$$

Wzór kosztu łącznego zastosowany w systemie,  $x$  i  $y$  to współrzędne na mapie, a  $w_1$  i  $w_2$  to współczynniki wagowe.

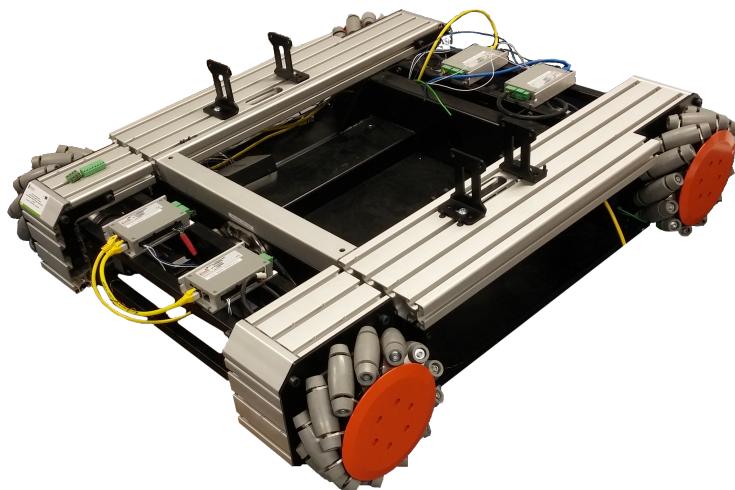
# Rozdział 3

## Opis bazy mobilnej

### 3.1 Efektory

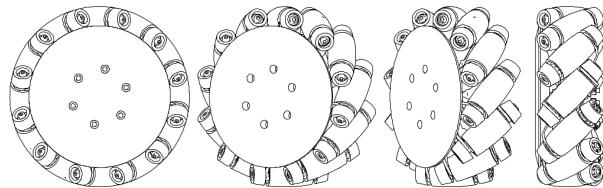
#### 3.1.1 Dookólna baza jezdna

Bazą sprzętową na której opiera się niniejsza praca jest dookólna baza mobilna. Jest to baza holonomiczna, która może poruszać się w dowolnym kierunku oraz zmienić swoją orientację w miejscu. Możliwe jest to dzięki zastosowaniu kół szwedzkich. Koła te umieszczone są w narożnikach prostokątnej platformy i napędzane są niezależnie przez serwomotory. Dzięki zamontowanym enkoderom możliwy jest odczyt odometrii robota. Opisywaną platformę przedstawia rysunek 3.1.



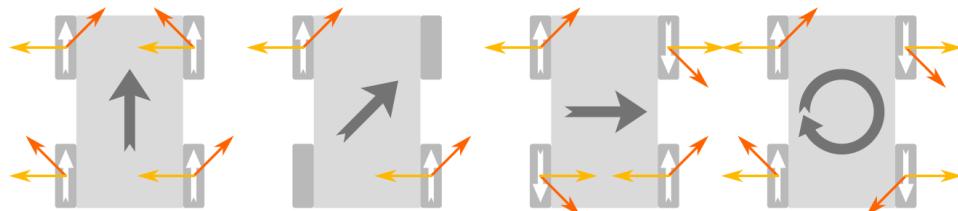
Rysunek 3.1: Dookólna baza mobilna [10]

Koła szwedzkie posiadają specjalne rolki ustawione pod kątem  $45^\circ$  w stosunku do osi obrotu koła. Rolki te nie posiadają zdolności aktywnego ruchu, podążają jedynie za ruchem koła macierzystego. Ustawienie globalne kół, w znaczeniu skierowania rolek, na platformie odpowiada literze  $X$ , patrząc na platformę z góry 3.1. Szkic kół szwedzkich można znaleźć na rysunku 3.2.



Rysunek 3.2: Koła szwedzkie [10]

Ruch platformy odbywa się poprzez odpowiednie zadawawanie prędkości każdemu z kół. Konstrukcja koła szwedzkiego powoduje, że koło to nie posiada tarcia w kierunku  $45^\circ$  do osi obrotu macierzystego koła. Ma to istotne, gdyż siła jaka działa na koło jest prostopadła do tego kierunku (moment siły jest równoległy do osi koła). Konstrukcyjnie więc ustawiając koła w literę  $X$  i odpowiednio manipulując wartościami prędkości dla każdego z kół, otrzymujemy możliwość ruchu w dowolnym kierunku 3.1.

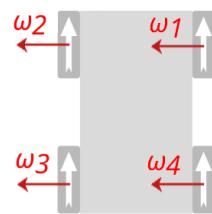


Rysunek 3.3: Ruch platformy mobilnej - platforma widziana jest od góry, ciemna strzałka symbolizują kierunek ruchu platformy, biała ruch koła, strzałka żółta to moment siły działający na dane koło, a czerwono-pomarańczowa to kierunek siły działającej na to koło [10]

Z matematycznego punktu widzenia ruch platformy można opisać następującą macierzą, reprezentującą model kinematyki robota 3.1:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{r}{4} \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{2}{a+b} & \frac{-2}{a+b} & \frac{-2}{a+b} & \frac{2}{a+b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

(a) Równania kinematyki



(b) Numeracja kół

Rysunek 3.4: Równania kinematyki robota oraz rysunek przedstawiający numerację kół [10]

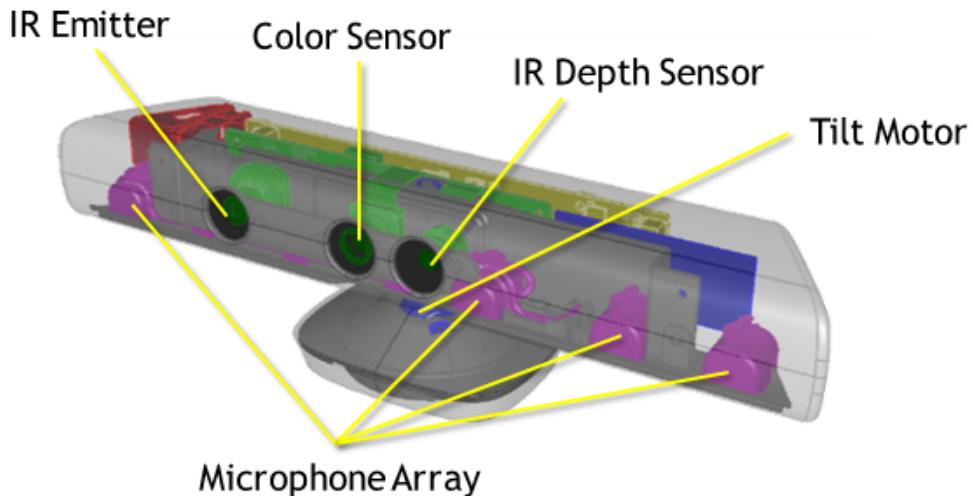
Użycie platformy dookółnej w przedstawionej pracy ma głębokie uzasadnienie. Holonomiczność robota pozwala na elastyczne tworzenie trajektorii, bez narzutu ograniczeń ruchu bazy nieholonicznej. Przy bardzo bliskiej detekcji człowieka, bądź jego względnie dużej prędkości, system nie byłby w stanie stworzyć odpowiedniej trajektorii dla robota, co mogłoby powodać zatrzymanie ruchu do czasu oddalenie się osoby. Dodatkowo platforma dookólna ma ułatwione zadanie poruszania się w ciasnych przejściach, potrafi również obrócić się w miejscu.

Więcej na temat samej platformy przeczytać można w dedykowanej jej pracy [10].

## 3.2 Receptory

### 3.2.1 Kinect

Kinect jest sensorem wyprodukowanym przez Microsoft na potrzeby konsoli Xbox 360. Pierwotnym zadaniem była obsługa konsoli za pomocą gestów i poleceń głosowych oraz wykorzystanie w grach wideo. Jest również często wykorzystywany w robotyce ze względu na spore możliwości i niską cenę. Urządzenie składa się z promiennika podczerwieni oraz dwóch kamer - kamery wizyjnej RGB oraz kamery zwracającej informację o głębokości obrazu. Emiter podczerwieni emituje wiązki promieni podczerwonych, a kamera podczerwieni bada odbicia promieni od obiektów. Im obiekt jest bliżej, tym mocniejsze pada na niego światło. W ten sposób otrzymujemy się chmurę punktów i interpolowany obraz głębi [11].



Rysunek 3.5: Budowa Kinecta - emiter podczerwieni, kamera RGB, sensor głębi, silnik i macierz mikrofonów [11]

Kinect posiada również macierz mikrofonów, pozwalającą na realizację wykrywania komend użytkownika oraz silnik pozwalający na przechylanie Kinecta. Tabela przedstawia specyfikacje urządzenia.

Rozdzielcość obrazu RGB	640x480
Rozdzielcość obrazu głębo-kości (interpolowana)	300x200 (640x480)
Zakres pracy	0.4m-6.5m
Pole widzenia	43° pionowo, 57° poziomo
Klatki na sekunde (dla obu kamer)	30
Format audio	16-kHz, 24-bit, modulacja PCM
Charakterystyka audio	Macierz czterech mikrofonów 24-bit, konwerter ADC, niwelacja echa i szumu

Tablica 3.1: Oficjalna specyfikacja Kinecta [11]

W procesie inżynierii wstępnej ustalono, że Kinect jest w stanie dostarczyć obraz RGB o rozdzielcości do 1280x1024, lecz przy zmniejszonej liczbie klatek na sekundę. Wysyła on także bezpośrednio (zanim zostanie skonwertowany na mapę głębości) obraz z kamery IR w rozdzielcości 640x480, lub 1280x1024 przy zmniejszeniu liczby klatek na sekundę. Realny zakres pracy

oceniono dla 1.2m-3.5m [12].

Obraz RGB oraz dane o błędności obrazu posłużą do wykrycia i ustalenia orientacji człowieka w przestrzeni. Baza mobilna sama w sobie nie posiada jednak zamontowanego Kinecta, co będzie poruszane w trakcie implementacji.

### 3.2.2 LIDAR

Zasada działania sensorów LIDAR opiera się na wysyłaniu wiązki laserowej i mierzeniu czasu jej powrotu po odbiciu od przedmiotów. Na tej podstawie otrzymuję się informację o rozmieszczeniu przedmiotów w polu widzenia sensora. Wewnątrz sensora znajduje się ustawione pod kątem  $45^\circ$  w stosunku do pionu lustro. Lustro zamontowane jest na silniku wraz z enkoderem. Urządzenie emituje wiązkę laserową i na podstawie opóźnień w czasie powrotu wiązki do detektora oraz odometrii silnika (kąta jego obrotu) generuje się wyniki pomiarów [13].



Rysunek 3.6: LIDAR LMS100-1000 firmy SICK

Platforma mobilna wyposażona jest w dwa sensory LIDAR LMS100-1000 firmy SICK 3.6 3.2, umiejscowione po jej przeciwnych stronach. Powodem zastosowania dwóch sensorów jest

ograniczone pole widzenia jednego tylko sensora. Dwa sensory pozwalają na niemal dookólne mapowanie przestrzeni.

Pole widzenia	270°
Długość wykorzystanej fali lasera	905nm (podczerwień)
Częstotliwość pracy	50Hz
Maksymalna odległość pomiaru	20m
Rozdzielcość pomiaru	0.5°
Systematyczny błąd pomiarowy	0.03m
Przypadkowy błąd pomiaru odległości	0.012m

Tablica 3.2: Specyfikacja sensora LIDAR LMS100-1000 firmy SICK [10]

Sensory LIDAR posłużą do tworzenia mapy środowiska, wykrywania przeszkód oraz detekcji człowieka.

# Bibliografia

- [1] T. Kruse, A. K. Pandey, R. Alami, and A. Kirsch, "Human-aware robot navigation: A survey," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, pp. 1726–1743, 2013.
- [2] E. T. Hall, *The Hidden Dimension*. Anchor Books, 1966.
- [3] "E. t. hall – proxemics /personal space in different cultures @ONLINE." <https://laofutze.wordpress.com/category/e-t-hall-2/>.
- [4] A. Mateus", "Human-aware navigation in networked robot systems." Instituto Superior Tecnico.
- [5] P. Althaus, H. Ishiguro, and T. M. nad H. Christensen", "Navigation for human–robot interaction tasks," *ICRA IEEE*, 2004.
- [6] T. Weerakoon, K. Ishii, and A. A. F. Nassiraei, "An artificial potential field based mobile robot navigation method to prevent from deadlock," *JAISCR*, vol. 5, no. 3, pp. 189–203, 2015.
- [7] Y. K. Hwang and N. Ahuja, "Gross motion planning: a survey," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 24, no. 3, pp. 219–291, 1992.
- [8] P. K. Mohanty and D. R. Parhi, "Controlling the motion of an autonomous mobile robot using various techniques: a review," *Journal of Advance Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 24–39, 2013.
- [9] E. A. Sisbot, L. F. Marin-Urias, R. Alami, and T. Siméon, "A human aware mobile robot motion planner," *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, vol. 23, no. 5, 2007.

- [10] R. Świątkiewicz, "Symulacja dookólnej bazy mobilnej," 2018.
- [11] Microsoft, "Kinect for windows sensor components and specifications." <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131033.aspx>.
- [12] OpenKinect, "Openkinect protocol documentation." [https://openkinect.org/wiki/Protocol\\_Documentation#Control\\_Commands;a=summary](https://openkinect.org/wiki/Protocol_Documentation#Control_Commands;a=summary).
- [13] H. E., "3d laser scanning for heritage. advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture." [www.english-heritage.org.uk](http://www.english-heritage.org.uk).