

Paweł KAJDROWICZ, Tomasz GRZEJSZCZAK
Politechnika Śląska

PRZEGLĄD KONFIGURACJI UKŁADÓW JEZDNYCH ROBOTA MOBILNEGO

Streszczenie. W artykule omówiono plan prowadzenia badań naukowych na temat właściwości ruchowych robotów mobilnych w zależności od ich konfiguracji mechaniczno sensorycznych. Przedstawione zostały zaplanowane konfiguracje do stworzenia i przetestowania oraz wnioski z już zaimplementowanej konstrukcji.

MOBILE ROBOT DRIVE SYSTEM CONFIGURATION OVERVIEW

Summary. The article outlines a research plan concerning the mobility characteristics of mobile robots based on their mechanical and sensory configurations. It presents the configurations scheduled for development and testing, as well as conclusions drawn from a design that has already been implemented.

1. Cel pracy

W tym artykule zostanie przedstawiony plan prowadzenia badań naukowych, których zadaniem jest porównanie kilku konfiguracji mechaniczno-sensorycznych i tego jak czynniki tych konfiguracji wpływają na właściwości ruchowe robota. Praca przedstawia koncepcje platformy mobilnej o zmiennej konfiguracji układu jezdnego. Poniższy artykuł stanowi przegląd odpowiednio dobranych koncepcji robota, pozwalających wyodrębnić i zanalizować wpływ poszczególnych czynników na właściwości ruchowe robota. Artykuł przedstawia różne konfiguracje oraz definicje niezbędne do analizy ruchu robotów mobilnych.

2. Przegląd literatury i klasyfikacja teoretyczna

Współczesne analizy platform wskazują, że niedokładności montażowe elementów jezdnych, takie jak błędy zbieżności czy pochylenia kół, stanowią kluczowe źródło systematycznych odchyłeń od założonego toru ruchu [5]. Istotnym zagadnieniem badawczym staje się zatem ilościowe określenie wpływu sztywności strukturalnej oraz precyzji geometrycznej korpusu na stabilność parametrów kinematycznych robota w warunkach dynamicznych [3, 4].

Rozdział przedstawia kluczowe definicje oraz podstawy teoretyczne niezbędne do analizy kinematyki robotów mobilnych. Skoncentrowano się na parametrach opisujących możliwości ruchowe platform oraz na klasyfikacji stosowanych w nich kół.

2.1. Definicje i parametry kinematyczne

Zgodnie z normą ISO 8373:2021, robot mobilny definiowany jest jako jednostka zdolna do samodzielnego poruszania się [1]. Może on występować w formie platformy z manipulatorami lub bez nich, a jego sterowanie może odbywać się autonomicznie bądź zdalnie. W analizie ruchu takich maszyn kluczowe znaczenie ma rozróżnienie dwóch podstawowych typów rotacji koła: toczenia, czyli obrotu względem osi poziomej opisanego kątem φ , oraz skręcania, rozumianego jako obrót względem osi pionowej opisanego kątem β [6].

Właściwości manewrowe robota opisuje się za pomocą trzech stopni swobody: mobilności, sterowalności oraz manewrowości, zdefiniowanych przez Campiona i in. [2]. Stopień mobilności δ_m określa liczbę kierunków, w których robot może się poruszać bez konieczności zmiany orientacji kół sterowalnych. Zakres tego parametru definiuje równanie:

$$1 \leq \delta_m \leq 3 \quad (1)$$

Stopień sterowalności δ_s opisuje liczbę dodatkowych kierunków ruchu dostępnych dzięki aktywnemu skręcaniu kół. Wartość ta mieści się w przedziale:

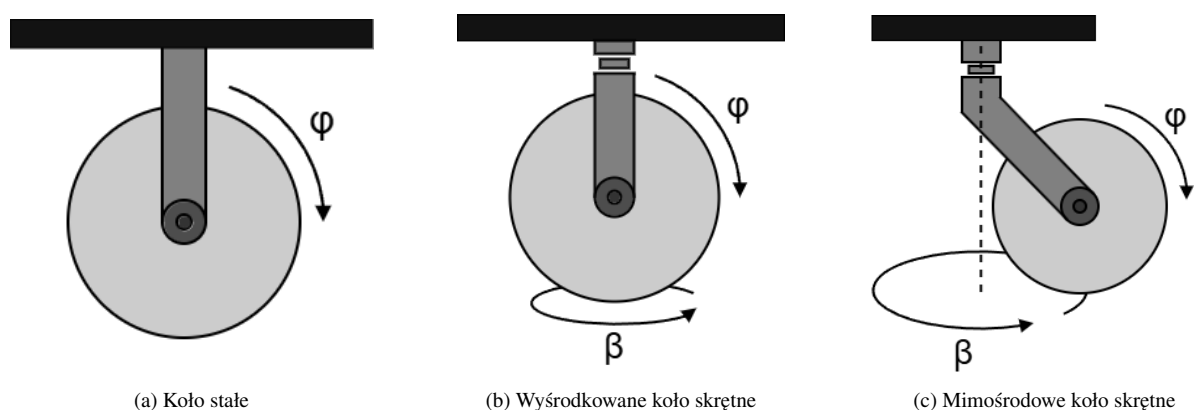
$$0 \leq \delta_s \leq 2 \quad (2)$$

Suma powyższych parametrów wyznacza stopień manewrowości δ_M , który określa całkowitą swobodę ruchu robota w przestrzeni. Aby robot był zdolny do poruszania się, suma ta musi spełniać warunek:

$$\delta_M = \delta_m + \delta_s \quad \text{gdzie} \quad 2 \leq \delta_M \leq 3. \quad (3)$$

2.2. Klasyfikacja kół w robotyce mobilnej

Wybór konfiguracji układu jezdnego zależy od zastosowanych rodzajów kół, które różnią się stopniem swobody oraz wpływem na stabilność ruchu. Wyróżnia się trzy podstawowe konstrukcje:



Rys. 1. Zestawienie rodzajów kół stosowanych w robotach mobilnych: a) koło stałe, b) wyśrodkowane koło skrętne, c) mimośrodowe koło skrętne. [2]

1. **Koło stałe.** Jest to koło sztywno przyczepione do korpusu, toczące się, lecz nie skręcające. Ruch toczenia jest opisany przez φ . Przykładem z życia jest tylne koło samochodu (rys. 1a).

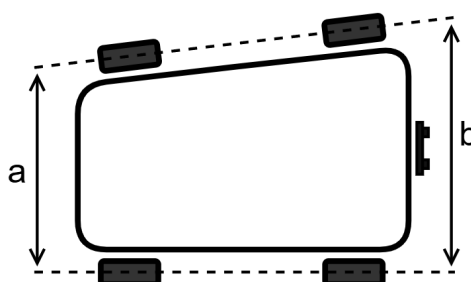
2. **Wyśrodkowane koło skrętne.** To koło, oprócz toczenia się w kierunku φ tak jak koło stałe, obraca się też względem osi pionowej, która przechodzi przez jego środek. Obrót ten opisany jest przez β . Przykładem z życia jest przednie koło samochodu (rys. 1b).
3. **Mimośrodkowe koło skrętne.** Koło to, ma możliwość toczenia w kierunku φ , oraz obrotu w kierunku β względem osi nie przechodzącej przez jego środek. Koło to podąża za ruchem robota w każdym kierunku (rys. 1c).

3. Koncepcje konstrukcji

Analizie poddano cztery warianty konstrukcyjne platformy mobilnej. Każda kolejna konfiguracja stanowi rozwinięcie poprzedniej, mające na celu eliminację zidentyfikowanych ograniczeń ruchowych lub sensorycznych.

3.1. Konfiguracja 1 – Skid-steer z nierówną konstrukcją i jednym czujnikiem ultradźwiękowym

Konfiguracja 1 bazuje na modelu skręcania burtowego (Skid-steer). Model ten złożony jest z 2 zestawów kół stałych ustawionych równolegle do siebie, jeden zestaw po prawej, a drugi po lewej stronie korpusu. Ideą robota jest ruch do przodu i tyłu przez toczenie się zestawów kół w jednym kierunku, oraz obrót robota przez toczenie się zestawów kół w przeciwnych kierunkach, wprowadzając go w poślizg.



Rys. 2. Schemat konfiguracji 1: Skid-steer z zaznaczoną nierównoległością osi (a i b).

Krzywizna konstrukcji jest składową wielu czynników, takich jak nie idealnie równoległy rozstaw zestawów kół, nierówne wykonanie części, niedokładne złożenie części, itp. Z przodu robota zamontowany jest jeden czujnik ultradźwiękowy, umożliwiający robotowi autonomiczną jazdę.

3.1.1. Analiza kinematyczna

Jest to podstawowa konfiguracja, która została zrealizowana fizycznie jako pierwszy projekt. Konfiguracja ta ma podstawowy model ruchu, podstawową konfigurację sensoryczną oraz realistyczny aspekt krzywizny korpusu. Konfiguracja ta bardzo dobrze nadaje się jako punkt wyjścia analizy i badań.

Stopnie mobilności, sterowalności oraz manewrowości opisane w rozdziale 2., działają przy założeniu braku poślizgu kół. Z definicji model Skid-steer oparty jest na wprowadzaniu robota w poślizg, co przeczy założeniom opisu. Ze względu na to, zostało stworzone uproszczenie, w którym zestawy kół traktowane są jako pojedyncze koła stałe.

Robot bez skreću kół jest w stanie ruszać się do przodu i do tyłu oraz obracać wokół swojego środka ciężkości, co oznacza, że stopień mobilności $\delta_m = 2$. Ze względu na brak kół sterowalnych, stopień sterowalności robota $\delta_s = 0$. Suma stopnia mobilności δ_m i sterowalności δ_s , czyli stopień manewrowości $\delta_M = 2 + 0 = 2$. Warunek (3), jest spełniony, więc robot może się poruszać.

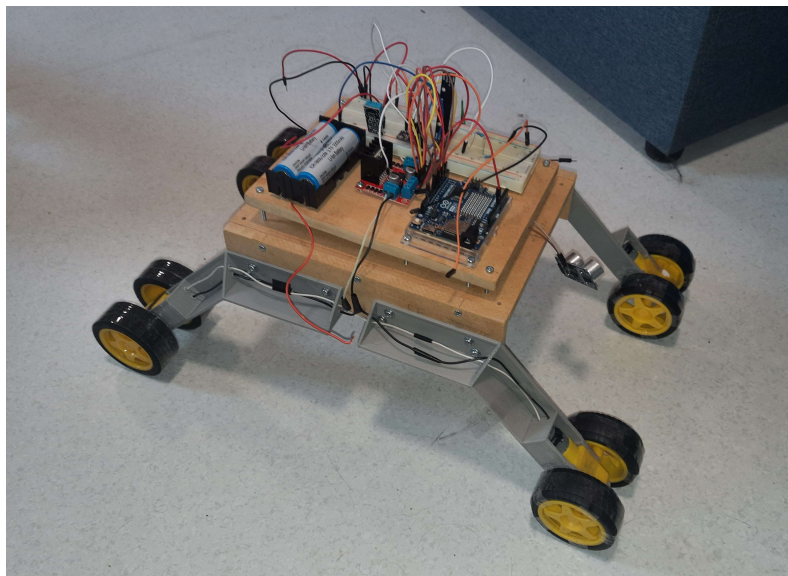
3.1.2. Zasada działania konfiguracji

Działanie modelu ruchu Skid-steer, jest uzależnione od czynników jak rozstaw zestawów kół, długość zestawów kół, ciężar robota i powierzchnia tarcia kół robota o podłoże. Dla robota o małej wadze, odstępem między zestawami kół zbliżonym do długości pojedynczego zestawu i niewielką powierzchnią styku kół z podłożem, model ten pozwala na sprawne przemieszczanie.

Poziom krzywizny korpusu bezpośrednio przełoży się na krzywiznę toru ruchu. Wszystkie wymienione czynniki wpływają na nieliniowość toru ruchu robota. Rozsądnym jest założyć, że robot w tej konfiguracji będzie poruszał się po wyraźnym łuku.

Jeden czujnik ultradźwiękowy do mierzenia odległości, nie będzie wystarczający do sprawnego poruszania się robota po przestrzeni z przeszkodami. Algorytm zastosowany, umożliwiający takiemu robotowi pokonanie np. labiryntu, będzie się opierał na wycofywaniu się robota po napotkaniu przeszkody z przodu, obrót i ponowną próbę jazdy do przodu. Sposób ten jest bardzo powolny.

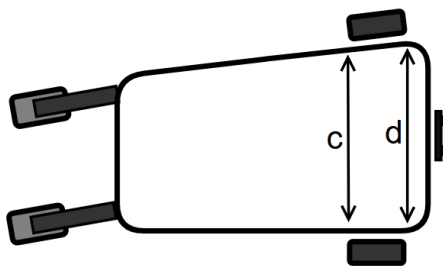
3.1.3. Wstępna implementacja



Rys. 3. Zdjęcie ukazujące implementację konfiguracji 1

Opisana konfiguracja została wstępnie zaimplementowana (rys. 3). Po wykonaniu wstępnych testów zaobserwowano, że ze względu na duży ciężar robota, znaczną długość zestawów kół, oraz dużą powierzchnię styku kół z podłożem, robot obracał się bardzo powoli. Krzywa struktura korpusu, jak i nierównoległość zestawów kół, przyczyniły się do krzywej jazdy robota, przy zleceniu jazdy na wprost.

3.2. Konfiguracja 2 – Koła pasywne oraz koła stałe z nierówną konstrukcją i jednym czujnikiem ultradźwiękowym



Rys. 4. Graficzna prezentacja konfiguracji 2. Tylne koła robota są kołami skrętnymi mimośrodowymi. Odcinek c opisuje odległość między tylnymi końcami kół stałych, a odcinek d między przednimi.

W konfiguracji drugiej zamieniono tylne koła stałe na pasywne koła skątne mimośrodowe. Jedynymi kołami napędowymi są przednie koła stałe. Robot w tej konfiguracji może obracać się wokół osi pionowej przechodzącej między kołami stałymi, lub wokół osi pionowej przechodzącej przez środek jedno z kół stałych, podczas gdy toczy się tylko koło stałe przeciwne – ten sposób obrotu nie będzie omawiany w tym artykule.

Krzywizna konstrukcji wynika z nierównych odległości c i d wynikających z rzeczywistych niedoskonałości konstrukcyjnych. Tak samo jak w konfiguracji 1, z przodu zamontowany jest jeden czujnik ultradźwiękowy.

3.2.1. Analiza kinematyczna

Konfiguracja druga ma na celu znaczne ułatwienie obrotu robota, poprzez zminimalizowanie tarcia wywołanego koniecznością poślizgu w modelu Skid-steer.

W przypadku tej konfiguracji, ruch nie polega na wprowadzaniu robota w poślizg, więc nie ma konieczności stosowania przybliżeń w celu ustalenia opisanych w tym artykule stopni. Stopień mobilności δ_m jest równy 2, ponieważ bez skręcania kół, robot może jechać do przodu i tyłu, oraz obracać się w lewo i prawo. Stopień sterowalności $\delta_s = 0$, ponieważ nie ma żadnych napędowych kół skrętnych, które dodałyby kierunki poruszania się robota.

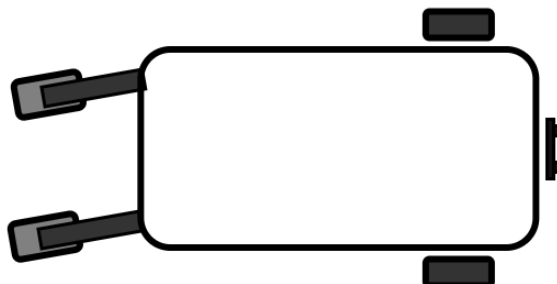
Warto zauważyć, że tylko koła pasywne mimośrodowe nie wpływają w żaden sposób na stopień mobilności bądź sterowalności, ponieważ podążają za ruchem robota, wykonywanym przez napędowe koła stałe. Stopień manewrowości $\delta_M = 2 + 0$, więc warunek (3) jest spełniony co oznacza, że robot może się poruszać. Warto również zauważyć, że mimo znacznie innej charakterystyki ruchu konfiguracji 2 względem pierwszej, każdy z opisywanych stopni pozostaje taki sam.

3.2.2. Zasada działania konfiguracji

Robot w drugiej konfiguracji znacznie łatwiej się będzie obracał, pod warunkiem wystarczającej mocy silników do wprowadzenia w ruch robota o danym ciężarze. Tak jak w przypadku konfiguracji pierwszej, ze względu na krzywiznę konstrukcji, robot będzie jeździł po łuku, przy nakazie jazdy na wprost. Algorytm używany do autonomicznej jazdy korzystają z jednego sensora ultradźwiękowego będzie działać tam samo, jednak wzrasta ryzyko kolizji tyłem robota o przeszkodę, przy obracaniu. Kolejną wadą tej konfiguracji

jest potrzeba zwiększenia mocy oraz momentu obrotowego silników, ponieważ liczba kół napędowych zmieniła się z 4 w konfiguracji 1, do 2 w tej konfiguracji.

3.3. Konfiguracja 3 – Koła pasywne oraz koła stałe z równą konstrukcją i jednym czujnikiem ultradźwiękowym



Rys. 5. Graficzna prezentacja konfiguracji 3. Tylne koła robota są kołami skrętnymi mimośrodowymi.

Konfiguracja trzecia posiada precyzyjnie wykonany korpus, więc nie ma żadnych nierówności konstrukcyjnych. Reszta cech tej konfiguracji jest niezmienna względem konfiguracji drugiej.

3.3.1. Analiza kinematyczna

Celem tej konfiguracji jest zbadanie wpływu krzywizny konstrukcji na właściwości ruchowe robota, w szczególności jego możliwości jazdy po linii prostej.

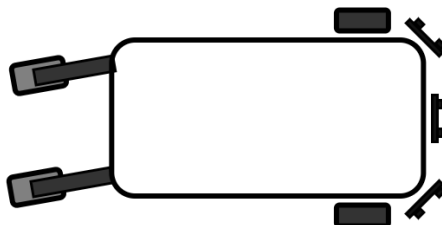
Fakt poprawienia korpusu nie zmienia żadnego z omawianych stopni, więc ich wartości pozostają takie same jak w konfiguracji 2.

3.3.2. Zasada działania konfiguracji

Poprawienie precyzji wykonania i montowania korpusu znacznie wpływa na liniowość toru ruchu robota. W tej konfiguracji nie ma czynników konstrukcyjnych zakrzywiających tor ruchu robota.

Charakterystyka modelu ruchu oraz jazdy autonomicznej zostaje taka sama jak w przypadku konfiguracji 2.

3.4. Konfiguracja 4 – Koła pasywne oraz koła stałe z równą konstrukcją i trzema czujnikami ultradźwiękowymi



Rys. 6. Graficzna prezentacja konfiguracji 4. Tylne koła robota są kołami skrętnymi mimośrodowymi. Z przodu znajdują się 3 czujniki ultradźwiękowe 2 będące pod kątem 45 stopni.

Konfiguracja 4 zakłada dodanie 2 nowych czujników ultradźwiękowych. Tak jak w poprzednich konfiguracjach, jeden czujnik jest zamontowany z przodu podczas gdy 2 są zamontowane na przednich rogach korpusu pod kątem 45 stopni – jeden z lewej, drugi z prawej strony. Reszta właściwości tej konstrukcji jest taka sama jak w przypadku konstrukcji 3.

3.4.1. Analiza kinematyki

Celem ten konfiguracji jest zbadanie jak dodanie czujników zwiększa sprawności robota w jeździe autonomicznej w przestrzeni z przeszkodami. Omawiane w tym artykule stopnie są takie same jak w przypadku poprzednich konfiguracji

3.4.2. Zasada działania konfiguracji

Jedyną zmianą w tej konfiguracji względem poprzedniej, jest dodanie czujników, zatem zmieni się tylko zdolność robota do autonomicznej jazdy w przestrzeni z przeszkodami.

Dzięki dodaniu nowych czujników, robot pozyskuje informacje zwrotne o obiektach znajdujących się na ukos od niego, a nie tylko z przodu. Jeden z najprostszych algorytmów realizujących autonomiczną jazdę używając 3 czujników ultradźwiękowych polega na prostej reakcji: jeśli lewy czujnik wykrywa przeszkodę, odbij w prawo, jeśli, prawy, w lewo, jeśli lewy i przedni to wykonaj większy ruch w prawo, i analogicznie odwrotnie. Takie rozwiązanie powinno znacznie skrócić czas potrzebny robotowi do poruszania się w przestrzeni z przeszkodami. Jedynym minusem względem konfiguracji 3 jest ryzyko interferencji sygnałów wysyłanych z czujników, jednak dla 3 czujników odpowiednio rozstawionych, to ryzyko jest bardzo małe.

4. Analiza porównawcza i dalsze prace

Przedstawione w rozdziale 3. konfiguracje mają szereg wad i zalet. Każda następna konfiguracja ma na celu poprawienie jednej wady konfiguracji poprzedniej.

Konfiguracja druga wprowadziła zmianę tylnych kół na koła skrętne mimośrodowe pasywne, w celu poprawy skrętności implementacji robota konfiguracji 1. Zmiana ta pozwala na sprawniejsze skręcanie robota, jednak wprowadza ryzyko kolizji poprzez zachodzenie przy skręcie oraz wymaga większej mocy silników.

Konfiguracja trzecia poprawia konstrukcję, aby wyeliminować zakrzywienie toru robota spowodowane jej krzywizną. Jest to ulepszenie nie niosące za sobą negatywnych konsekwencji.

W konfiguracji 4, dodanie 2 czujników ultradźwiękowych jest fundamentalnym krokiem do zwiększenia sprawności robota w obszarze z przeszkodami. Jedynym minusem zmian wprowadzonych w tej konfiguracji jest ryzyko interferencji sygnałów z czujników ultradźwiękowych.

Ze względu na zmianę modelu ruchu, poprawienie dokładności wykonania konstrukcji oraz dodanie 2 czujników ultradźwiękowych, ostateczna konfiguracja powinna wypaść najlepiej w badaniach opisanych poniżej.

Dalszy plan pracy obejmuje stworzenie konfiguracji 2, 3 i 4. Przebadane zostaną:

- pomiar czasu do wyznaczenia zdolności konfiguracji do szybkiego obrotu o 90 stopni;
- efekt dryfowania mierzony jako zdolności robota do jazdy po prostej linii;

- zdolności robota do autonomicznego pokonania toru przeszkód. Mierzony zostanie czas pokonania toru oraz ewentualne kolizje.

5. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono przegląd i klasyfikację konfiguracji układów jezdnych robotów mobilnych, stanowiące fundament dla planowanych badań eksperymentalnych. Poprzez zestawienie definicji parametrów kinematycznych oraz rodzajów kół, dokonano analizy czterech wariantów konstrukcyjnych platformy. Zaproponowane koncepcje pozwalają na precyzyjne wyodrębnienie wpływu poszczególnych czynników: od asymetrii mechanicznej korpusu, przez charakterystykę kół pasywnych, aż po rozbudowę systemów sensorycznych. Wyznaczono kierunek dalszych prac nad optymalizacją systemów autonomicznych. Realizacja zaprezentowanego planu badań pozwoli na ilościową ocenę zidentyfikowanych zależności, co przyczyni się do zwiększenia precyzji i efektywności projektowanych platform mobilnych.

Praca zrealizowana przy wsparciu finansowym Studenckiego Koła Naukowego SpaceCoffee.

LITERATURA

1. Iso 8373:2021(en) robotics and robotic devices — vocabulary. <https://www.iso.org/standard/75539.html> 2021.
2. Champion G., Bastin G., D'Andréa-Novel B.: Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, Vol.12(1), p. 47–62.
3. Liu Y., Cui X., Fan S., Wang Q., Liu Y., Sun Y., Wang G.: Dynamic validation of calibration accuracy and structural robustness of a multi-sensor mobile robot. Sensors, 2024, Vol.24(12).
4. Moon C.: Misalignment diagnostic system for linear motion robots using long short-term memory. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2024, Vol.13(6), p. 595–601.
5. Paudel S., Abeykoon A. M. H. S., Senadeera S. D. A. P.: Sensor-less detection of wheel alignment error for a wheeled mobile robot using the disturbance observer. 2020 IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), 2020, p. 410–415.
6. Siegwart R., Nourbakhsh I. R., Scaramuzza D.: Introduction to autonomous mobile robots. MIT press 2011.