

Приложение 1

Описание на работи подходящи за работа в сложна среда и техните характеристики. Критичен анализ.

Приложение към научен отчет на проект:

№ КП-06-Н87/5 от 06.12.2024 г.

със заглавие „Изследване на работи и алгоритми за работа в сложна среда „
Финансиран от ФНИ по „Конкурс за финансиране на фундаментални научни изследвания –
2024 г.“

София, 2026г.

Съдържание

1. Сложна среда и работи подходящи за работа в нея	3
2. Примери от литературата на съществуващи работи работещи в сложна среда	6
3. Редундантни работи	8
4. Критичен анализ и области на изследване	11
5. Заключение	13
Литература	13

1. Сложна среда и роботи подходящи за работа в нея

В литературата няма строга дефиниция на термина сложна среда. Среди като развалини, пещери, области с намалена видимост, области с липса или негодна за дишане атмосфера, се считат за сложни. За да работи в сложна среда от робота си изискват, специализирани сензори, алгоритми за откриване и заобикаляне на статични и динамични препятствия, като и избягване на сингулярни конфигурации. Изследванията на колектива се съсредоточават върху работа на роботи в такъв тип среда. Основната идея на това проучване е да се очертаят проблемните области, нерешените проблеми и тези аспекти в които научния колектив може да допринесе със своите изследвания.

В това приложение се представя съвсем кратко обобщено проучването извършено от колектива на проекта, което съответства на Работен Пакет 2. По-конкретни детайли са дадени във въведенията на статиите които са вече публикувани, а други части ще се ползват в бъдещите разработки от колектива.

а. Видове сложни среди

Подводни и океански дълбини: За да функционират роботите в тази среда те трябва издържат на изключително високо налягане, при липса на светлина и наличие на корозивна солена вода. Роботите в тази категория се използват за дълбоководни проучвания, инспекция на тръбопроводи и подводна археология.

Космическа среда: Безвъздушно пространство, екстремните температурни амплитуди и високите нива на радиация изискват високоспециализирани роботизирани сонди, роувъри и орбитални апарати.

Радиоактивни и токсични зони: Среда създадена от човека която е пагубна за биологични организми. Роботите тук се справят с разчистване на радиоактивни отпадъци, работа в силно замърсени индустриални халета.

Непроходим пресечен терен: Включва гъсти гори, каменисти области или развалини след природни бедствия. Роботите в тази категория обикновено са с крачещи механизми, имитиращи животни (биомимикрия), за преодоляване на вертикални препятствия и нестабилни повърхности.

Подземни пещери и мини: Характеризират се с пълна липса на светлина, тесни пространства, риск от срутвания и невъзможност за използване на стандартен GPS.

Други сложни среди: Стационарните работи които се ползват в индустрията се сблъскват с проблеми свързани със заобикаляне на препятствия. Това може да е съществен проблем когато препятствията са неизвестни или когато са подвижни (динамични препятствия). Планирането на движение на някои работи може да е предизвикателство дори и да няма препятствие. Например роботите със затворена и отворено-затворена структура имат сингулярни конфигурации вътре в работната зона. Преминаването през такива конфигурации обикновено се избягва поради проблеми свързани с управлението на робота. Необходимо е да се ползват специализирани алгоритми за заобикаляне или преминаване през тях.

б. Основни изисквания към роботите работещи в такива среди.

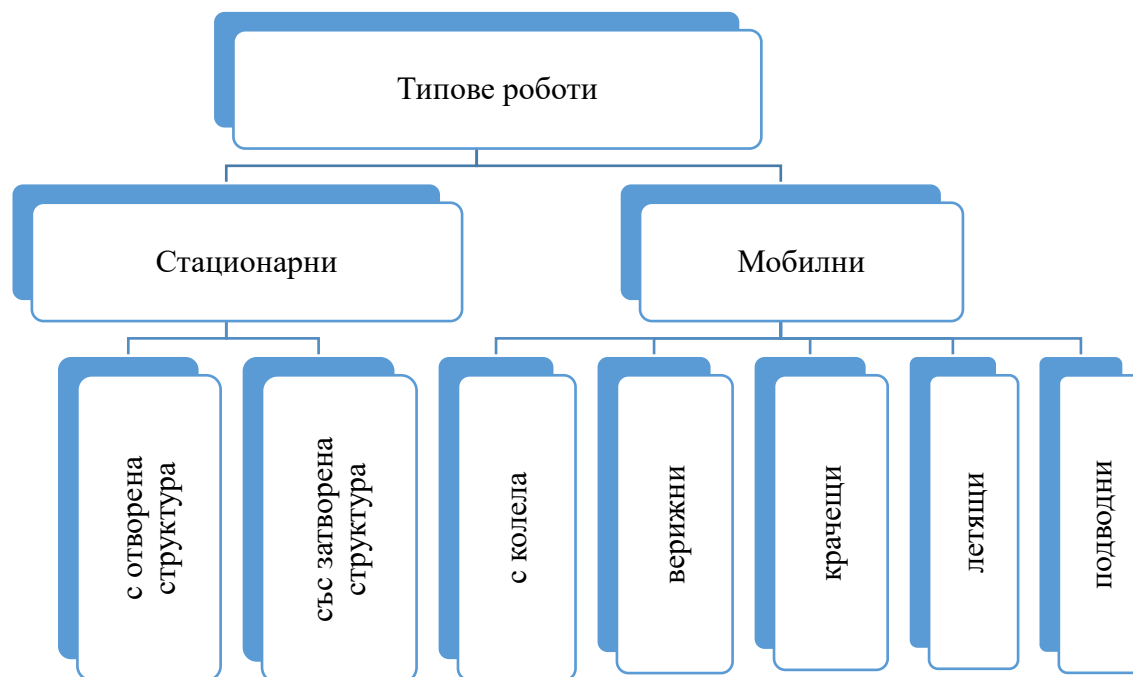
Необходимо е робота да има по-специална механична конструкция. На първо място трябва да се реализират сложни движения по заобикаляне на препятствия. Това означава, че

робота трябва да има голям брой степени на свобода. Често се ползват стационарни редундантни работи с отворена структура. Мобилните работи също трябва да имат възможност за придвижване по сложен терен. Подходящи механични конструкции са базирани на верижни механизми или крачеци работи. Сложната среда налага множество изисквания към материалите и конструкцията. Използват се титан, въглеродни влакна и специални сплави. Те издържат на силен натиск, удари и големи натоварвания. В много случаи е необходимо корпусът да е херметически затворен. Това спира навлизането на вода, прах, газове и фини частици. Термозащита също е от съществено значение много работи имат системи за нагряване или охлаждане.

Предвиждат се специални изисквания към сензорната система. Защита на сензорите: Камерите и лазерите имат предпазни стъкла или системи за самопочистване. Алтернативно зрение: При липса на светлина или при наличие на гъст дим обикновените камери не работят. Използват се инфрачервени камери, радари и сонари. Сензори за допир и баланс: Роботът трябва да усеща терена под себе си. Жироскопите помагат робота да не се преобърне при наличие на стръмен терен. Вграждат се сензори за радиация, опасни газове, температура и налягане.

Основните специфични изисквания към управлението и софтуера са: Висока автономия: В пещери или в космически условия не винаги има стабилен сигнал, и е възможно връзката да прекъсва. Роботът трябва сам да взема решения и да намира пътя. Картографиране без GPS: Използва се технология, наречена SLAM. Тя позволява на робота да чертае карта на непознатото място по време на движение. Устойчивост на повреди: Ако един мотор или сензор спре да работи, софтуерът веднага трябва да се адаптира. Роботът продължава мисията с си части. Умна икономия на енергия: Софтуерът пресмята всеки ход, за да пести батерията в дълги мисии.

Важен фактор при планиране на движенията е типът на робота, който ще ги изпълнява. На фиг.1 е дадена кратка класификация на типовете работи.

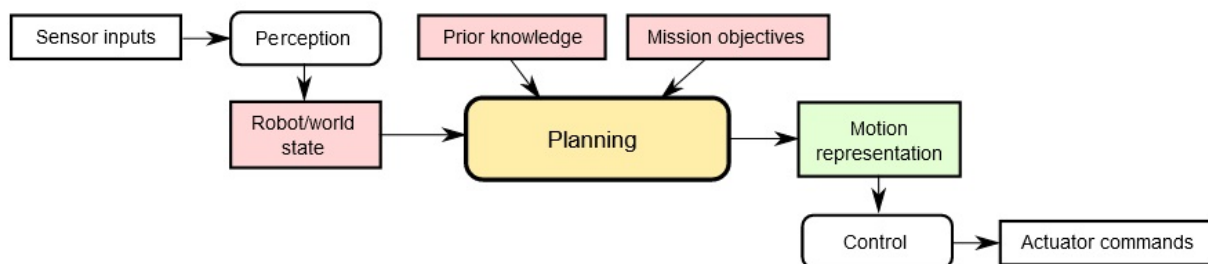


Фиг.1. Класификация на основните типовете работи.

Различните типове роботи реализират различни движения, като е необходимо да се решават различни проблеми. Например мобилните роботи с колела се движат по повърхнина и най-често има два управляеми двигателя, докато стационарните роботи реализират пространствени движения с помощта на множество независимо управляеми двигатели. При стационарните роботи е необходимо да се избягват колизии между външни обекти и всяко едно от звената на робота. Мобилния робот с колела обикновено има една платформа (тяло) и е достатъчно то да не влиза в конфликт със средата. При крачещите роботи освен планирането на основния път е необходимо да се планира последователността и начина на движение на краката. Тази последователност се нарича походка на робота. Фиг.2 илюстрира само част от многообразието на роботите. Всеки един от представените типове роботи може да се раздели на подтипове подобно на заобикалящата ни жива природа. Освен това съществуват множество хибридни роботи.

При проблемите с планирането на пътя в известни среди, полученият път трябва да бъде кратък, минимизирайки разстоянието между точките като включва оптимизиране на времето, енергията и плавността на движение. Могат да бъдат взети под внимание и други ограничения, като например търсене на път с достатъчна ширина, избягване на стени, избягване на препятствия, безопасност или намаляване на броя на завоите. Дължината на пътя е един от най-типичните критерии за оптимизация. По-кратък път между начална и целева позиция се очаква да се измине по-бързо и да минимизира консумацията на енергия. Повечето от конвенционалните подходи за планиране на трасета не вземат предвид безопасността и гладкостта на трасето. Ограничението за безопасност е важен фактор както за робота, така и за заобикалящите го обекти. Гладкостта на пътя, от друга страна, подобрява консумацията на енергия и времето за изпълнение. Гладкостта също е ограничение и засяга повечето мобилни роботи поради ограничения радиус на завиване на роботите, използващи метод на завиване с кормило.

Трите входа в програмата за планиране на движение са: състоянието на системата, модела на системата и спецификацията на задачата. Например в контекста на автономните превозни средства състоянието на системата може да определи състоянието на превозното средство, картата около него и състоянието и намеренията на други агенти. Системният модел предсказва как състоянието на системата се променя в бъдеще, обусловено от решенията на робота. Спецификацията на задачата включва функции за разходи, които измерват качеството на предложенията, както и ограничения, на които трябва да отговаря движението. Например, автономно превозно средство може да пожелае да увеличи максимално комфорта на пътуване, като същевременно остане без сблъсък, оставяйки на пътя и т.н. (фиг.2).



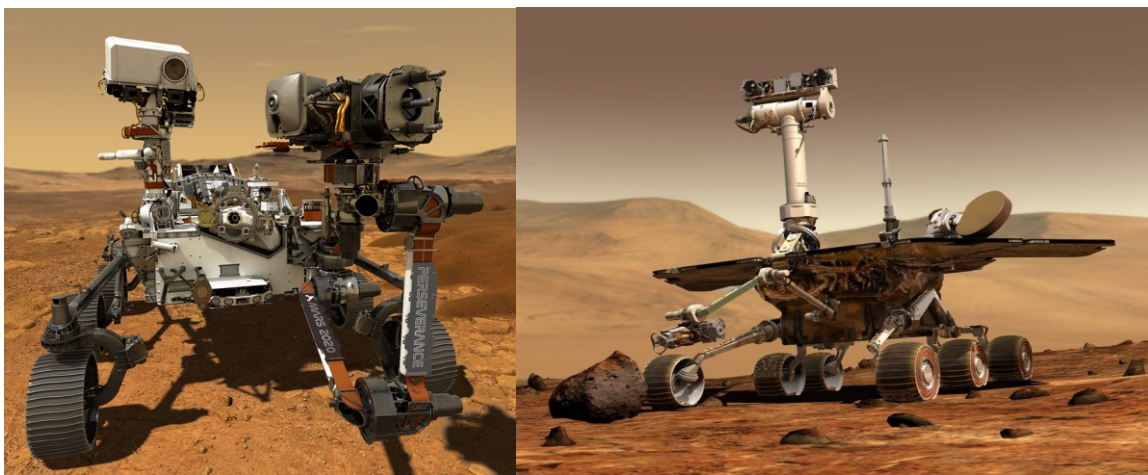
Фиг.2. Ролята на планирането е да използва целите на мисията, резултатите от възприятието и предварителната информация, за да генерира представяне на движението на робота.

2. Примери от литературата на съществуващи роботи работещи в сложна среда

Направена е кратка систематизация на областите в които се прилагат роботи в сложна среда. Основните предизвикателства са посочени в скоби.

а. Космически роботи (Екстремни температурни амплитуди, вакуум и радиация)

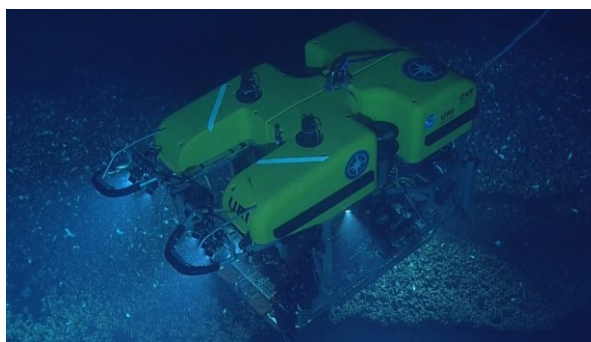
Марсоходът Perseverance (НАСА): Изследва повърхността на Марс, търсейки следи от древен живот. Снабден е с лазери, камери и роботизирана ръка, с която пробива марсианските скали за проби. Роувърът разполага и с автономна система за навигация, която му позволява да прекосява сложни каменисти терени без пряко управление от Земята. Виж. Фиг.3 и <https://www.space.com/nasa-mars-perseverance-rover-mission-photos.html> .



Фиг.3. Марсохода „Perseverance“ от мисията на NASA's Mars 2020.

б. Подводни роботи (Огромно налягане, корозия и пълна липса на светлина)

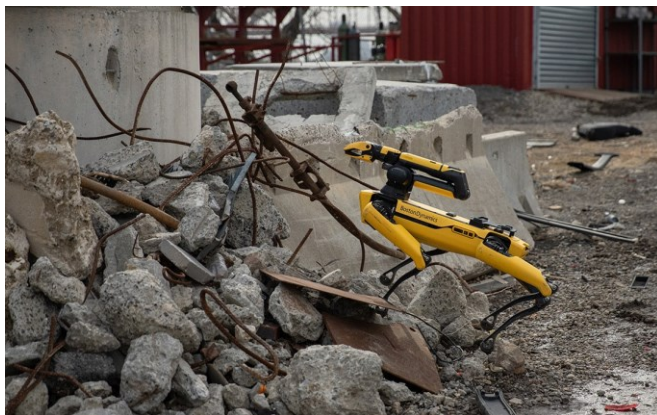
Deep Discoverer (NOAA): Този дистанционно управляван робот (ROV) се спуска на хиляди метри под водата. Той е оборудван с мощни LED светлини и камери с висока разделителна способност за изследване на океанското дъно, хидротермални извори и непознати морски видове. Корпусът му е проектиран да издържа на огромно налягане на дълбините (<https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs-rovs/>) –фиг.4.



Фиг.4. Дистанционно управляван апарат Херкулес изследва океанското дъно с помощта на LED светлини и видеокамери по предната част на апарата.

с. Роботи за пресечен терен и бедствия (Разрушения, препятствия и неравен терен)

Spot (Boston Dynamics): Четириногото роботизирано куче, което притежава изключителен баланс (<https://bostondynamics.com/blog/spot-to-the-rescue/>) – фиг.5. Благодарение на своите крака, то се движи лесно по стълби, чакъл, кал и разрушени сгради след земетресения. Използва се от аварийни екипи за оглед на опасни зони, срутени мини и промишлени инспекции.



Фиг.5. Приложение на робота Spot в спасителни операции след разрушения.

d. Радиоактивни среди (Ядрена радиация и токсични отпадъци)

В Чернобилската електроцентрала и около Новия безопасен похлупак се използват роботи за измерване на нивата на радиация и картографиране на останките. В по-стари мисии роботът Pioneer е проектиран специално да издържа на радиация, която би унищожила обикновената електроника. В наши дни учени изпращат и кучето робот Spot (фиг.5), оборудвано със специални дозиметри, за да създава 3D карти на радиоактивното замърсяване, без да се застрашава човешки живот.



Фиг.6. Мобилен робот „Pioneer“ в атомната електроцентрала в Чернобил.

Американският радиационноустойчив мобилен робот "Pioneer" демонстрира техническите си възможности над разрушения 4-ти блок на Чернобилската АЕЦ. Планирано е роботът, чието разработване е струвало 2 милиона долара на Министерството на енергетиката на САЩ и НАСА, да бъде използван вътре в „саркофага“. Роботът ще събира информация за състоянието на инсталацията.

е. Хуманоидни ръце и планиране на движения при хващане.

Планирането на движенията за хващане (Grasp and Motion Planning) е едно от най-големите предизвикателства в роботиката. Когато една хуманоидна или роботизирана ръка трябва да хване предмет, тя не просто движи пръстите си. Тя трябва да изчисли как да

премести цялата си структура от точка А до точка Б, без да се блъсне в препятствие и без да изпусне обекта. Примери за такива роботи са: Роботът ARMAR-6 (Технологичен институт в Карлсруе): Този хуманоиден робот е създаден за работа в индустриална среда и складове. Той може автономно да планира движението на ръцете си, за да подава инструменти на хората; Shadow Robot Hand (в комбинация с роботизирани ръце като UR5/UR10): Това е една от най-напредналите роботизирани длани в света, която имитира човешката ръка с 24 степени на свобода. Използвайки изкуствен интелект и сензори за допир, системата планира движенията на всеки пръст, за да хваща деликатни предмети.

3. Редундантни роботи

Редундантните роботи притежават повече ресурси от тези, които са строго необходими за изпълнение на тяхната задача. Това осигурява на робота увеличен капацитет за справяне с приложения от реалния свят, като позволява да се справят с проблеми свързани с оптимизация на параметри и заобикаляне на препятствия по време на изпълнение на основната задача. В общия случай редундантността може да се разглежда от различни аспекти, като ние ще се съсредоточим върху механичната редундантност.



Фиг.7. Редундантните роботи са роботи, които могат да изпълнят една и съща задача по повече от един начин.

Решенията на обратната задача на кинематиката при редундантните роботи обикновено са безброй много. Това позволяват по-висока гъвкавост, в сравнение с конвенционалните роботи. Ресурсите като: допълнителна конструктивна сила в ставите; допълнителна възможност за контролиране на изходната сила; допълнителни степени на свобода (DOF); на редундантен робот могат да се използват оптимално според задачата. Тъй като има няколко възможни конфигурации, за които крайният ефектор може да достигне до определена желана поза (позиция и ориентация на изпълнителното звено), алгоритъмът може да избере тази, която служи по-добре за допълнителна цел чрез оптимизация.

Примерите за допълнителните цели са многобройни. Роботът може да избере решението, което най-добре предава сила (въртящ момент) към крайния ефектор. Може да се търси решението, което изисква най-малкото движение, за да се сведе до минимум скоростта или консумираната енергия. Решение за което се максимизира сръчността чрез избягване на сингулярните конфигурации. Роботът може да избере решението, което максимизира структурната коравина, за да намали грешките и др. Множеството решения могат да се използват от манипулатора, за да се избегнат препятствия, които иначе биха попречили на крайния ефектор да достигне желаната поза. Редундантния робот има възможност да преразпредели ресурсите, за да компенсира загубата на механична степен на свобода. Редундантните роботи могат да използват допълнителните DOF в своя полза, за да избегнат

общите си ограничения и заобикалят препятствията в работното пространство, докато все още достигат желаната крайна поза в работното пространство. Всички цели обаче трябва да бъдат количествено „измерими“.

За един манипулатор пространството на задачите е пространството, което определя необходимите позиции и ориентации на изпълнителното звено. Например, за робот, чието изпълнително звено трябва да извършва равнинни движения, позицията се дефинирана от два компонента (x,y) и още един ъгъл ни трябва за определяне на ориентацията му. Следователно, измерението на пространството на задачите в този случай ще е тримерно. Пространството на обобщените координати за робота се състои от всички променливи, които определят конфигурациите му. Редундантния робот има повече обобщени променливи, отколкото DOF са необходими за изпълнителното звено. С други думи, когато размерността на работното пространство m за манипулатора е по-малка от размера на ставното (независимо управляемо) пространство n , манипулаторът се нарича редундантен.

Обикновено, променливите, които дефинират **позицията и ориентацията на изпълнителното звено** по отношение на фиксирана референтна координатна система, се събират в един единствен вектор. Тук този вектор се обозначава с x ($m \times 1$). Също така, променливите, които дефинират **конфигурацията** (обобщените координати) е организирана в друг вектор. Този вектор се означава с q (той е $n \times 1$).

Определение 1: Кинематична редундантност

Манипулаторът се счита за кинематично излишен (редундантен), ако измерението на неговото работно пространство W е по-ниско от измерението на конфигурационното му пространство C ,

$$\text{т.е. } m := \dim W < n := \dim C,$$

и работното пространство се съдържа в конфигурационното пространство в своята цялост, т.е. $W \subset C$.

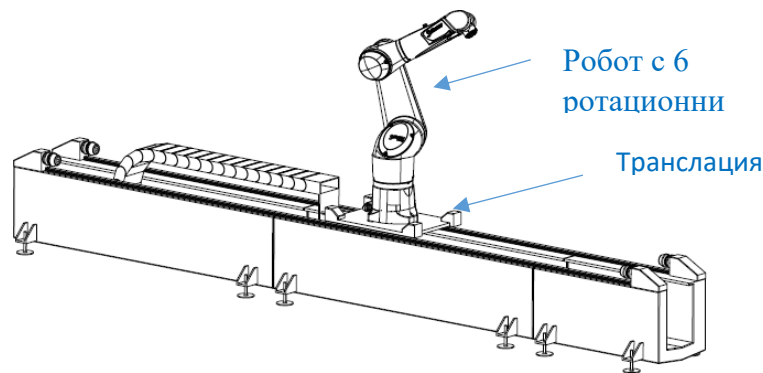
Понякога такава структура се нарича също изначално кинематично излишна, тъй като това свойство е вградено в робота и не зависи от задачата, която трябва да бъде изпълнена. От тази дефиниция е очевидно, че пространственият робот е кинематично излишен, ако $n = \dim C > 6$, а равнинният манипулатор е кинематично излишен, ако $n = \dim C > 3$.

Определение 2: Степен на кинематичен излишък (степен на редундантност)

*Разликата r в пространственото измерение на пространството на управляемите обобщени координати q и пространството на задачите се нарича **степен на излишък**, (или **степен на редундантност**).*

$$r = n - m, (r \geq 1) \quad (1)$$

Пример 1. Пространственият индустриален робот Stäubli TX90L от Фиг. 8 е присъщо кинематично излишен, тъй като има 7 стави с $n = \dim C = 7$.



Фиг. 8. Индустриален манипулатор Stäubli TX90L върху линейна ос

Определение 3: Редундантност (излишък) на задачата

Манипулаторът се счита за кинематично излишен по отношение на възложената му задача, ако измерението на пространството на задачите T е по-ниско от измерението на конфигурационното пространство C за изпълнението на T , т.е.

$$l = \dim T < n = \dim C.$$

Следствието от това определение е, разбира се, че всички присъщо кинематично излишни манипулатори също са излишни за задачите, но не непременно да е вярно обратното.

Определение 4: Степен на излишък на задачата

Степента на излишък на задачата се дава от: $r_T = \dim C - \dim T = n - l$.

Пример 2: Въпреки че (равнинният) робот SCARA3 не е присъщо кинематично излишен, той е излишен за задачата, ако задачата му е ограничена до чисто позициониране на изпълнителното звено без оглед на неговата ориентация, т.е. $l = \dim T = 2$. В този случай степента на излишъкът е $r_T = \dim C - \dim T = n - l = 3 - 2 = 1$.

Следователно „редундантността“ на робот е относителна концепция, т.е важи по отношение на дадена задача.

Някои задачи за изпълнителното звено на робота и техните измерения

- позиция в равнината $n=2$
- позиция в 3D пространството $n=3$
- ориентация в равнината $n=1$
- сочещи в 3D пространство $n=2$
- позиция и ориентация в 3D пространството $n=6$

Равнинен робот с $n=3$ стави е излишен за задачата за позициониране на изпълнителното му звено в равнината ($m=2$), но НЕ и за задача за позициониране И ориентиране на изпълнителното звено в равнината ($m=3$)

Основни приложения на редундантите роботи за работа в сложна среда са:

- В промишлеността за инспекция и работа вътре в сложни конструкции. В самолетостроенето, корабостроенето и ядрената енергетика често се налага работа в тесни пространства. Роботът трябва да премине през малък отвор, за да завари детайл или да провери за дефекти. Стандартният индустриален робот би могъл да премине

стените на отвора. Редундантният робот има повече степени на свобода с помощта на които, заобикаля вътрешните прегради и достига до целта.

- Асистираща хирургия (Медицински роботи). В операционната зала човешкото тяло и лекарите наоколо са деликатни „препятствия“. Роботизирани ръце държат камери или инструменти вътре в тялото на пациента по време на медицинската манипулация, това са така наречените лапароскопски операции. Роботът трябва да движи инструмента вътре в тялото, без да докосва или притиска органите наоколо.
- Складова логистика. В модерните складове предметите са подредени максимално плътно един до друг. Редундантни роботи се ползват за вземане на конкретен пакет, които може да се намира зад или под други обекти.
- Боядисване и заваряване на сложни детайли в автомобилостроенето. При сглобяването на купето на автомобила има зони, които са труднодостъпни. Роботът пресмята траектория, при която се следва перфектна траектория за заваряване, като звената на робота се въртят, за да избягват сблъсък с останалата част от купето на колата.

4. Критичен анализ и области на изследване

След като колектива на проекта се запозна с голям брой научни публикации свързани с темата и въз основа на компетенциите и опита на членовете, се взе решение изследванията да се съсредоточат върху няколко по-конкретни области. Това се налага поради големия обхват на темата. Областите и критичните бележки свързани с тях са:

а. Приложение на редундантни роботи в сложни среди.

Задачите, изпълнявани в спасителни операции, космически роботи и др. изискват да се работи в неструктурирана динамична среда, където траекторията на изпълнителното звено и избягването на препятствия трябва да бъдат едновременно гарантирани. Това изисква използването на специализирани роботи с голям брой степени на свобода, които от своя страна изискват специфични алгоритми за управление. Например, наличието на допълнителни степени на свобода позволява на космическите манипулаторни системи (SMS) да се справят с неочаквани задачи, тъй като е невъзможно да се определят всички условия в космическата среда. Основните предимства на редундантните роботи в сложна среда са:

- Използването на редундантни роботи позволява да се изпълняват по-сложни задачи в среда, пълна с препятствия;
- Позволява да се избегнат сингулярни конфигурации и да се изпълняват повече от една задача едновременно;
- Редундантността подобрява способността за оптимизиране на движението;
- Използването на излишни степени на свобода подобрява стабилността, намалява вибрациите и стабилизира движението при контакт с външен обект;
- Най-важните предимства на хипер-редундантните роботи са, че те могат да преминават през сложни препятствия. Могат да се въртят и усукват около обекти със сложни форми, например, за да ги хванат. Те имат широк обхват на движение и добра маневреност
- Самата редундантност осигурява допълнителни възможности в задвижващите системи на манипулатора. В случай на повреда на един от двигателите поради екстремни условия на околната среда, като радиация и температурни разлики, редундантният робот ще може да продължи да изпълнява част от задачите си.

- Използването на методи за машинно обучение и изкуствен интелект в редувантни работи играе ключова роля за повишаване на тяхната устойчивост, надеждност и ефективност, особено в среда с висока степен на автономност и динамика. Интегрирането на такива алгоритми за съвременната роботика позволява на излишните работи да преодолеят ограниченията на класическите алгоритми.

Недостатъците на редувантните работи са свързани с:

- Конструкцията хардуера и софтуера им са по-сложни от тези на класическите работи.
- Тези работи са по-скъпи.
- Управлението им е сложно. Обратната задача на кинематиката има безброй много решения. Този проблем обикновено се решава с поставяне на допълнителни оптимизационни задачи.
- Моделирането и изследването на сингулярни конфигурации е по-сложно, поради сложността на конструкцията и многото DOF. Сингулярности могат да се появят не само за основната задача но и за допълнителните задачи.

б. Мобилни работи за работа в среда с препятствия.

Друга област за изследване към която се насочва колектива на проекта е свързана с приложението на мобилни работи за работа в сложна среда. Тези работи позволяват да се придвижват по неравен терен като заобикалят или преодоляват препятствия. Разбира се това е широка област. Нашия фокус на изследване ще е свързан с няколко вида мобилни работи: Модели на колесни роботизирани платформи с помощта на които се изследват иновативни алгоритми за движение в среда с множество предварително неизвестни препятствия; Роботизирана платформа с омниул колела която е закупена по проекта и крачещ робот. Колектива има предишен опит с изследване на оригиналната конструкция на крачещия робот "Big Foot". Във втория етап на проекта се предвижда да се проведат изследвания за преодоляване на препятствия от крачещия робот и да се изследва поведението му в сложна среда. Предимствата на крачещите работи се отнасят до:

- движение по терен без предварително създаден път;
- възможност за изкачване на препятствия;
- движение по неравен или наклонен терен;
- повечето крачещи работи могат да се движат по терени с различни качества на настилка (с различна плътност). Това се дължи на голямата площ на стъпалата им. Роботите с колела се допират към терена с много по-малка площ.

Основните им недостатъци са:

- по-сложна конструкция в сравнение с роботите на колела;
- по-сложно управление. Необходимо е да се контролират независимите движенията на краката, като едновременно с това се следи за базова стратегия на придвижване;
- ниска скорост на движение. Крачещите работи имат по-ниска скорост на придвижване от роботизирани колички;
- висок разход на енергия. Крачещите работи обикновено имат голям брой двигатели. Освен това в много случаи се налага да се повдига тялото на робота, което изисква много енергия.

с. Роботизирани хуманоидни ръце и планиране на движения при хващане.

Част от колектива се занимава с разработването и изследването на 3D принтирана хуманоидна ръка. Това е пряко свързано с разработването на дисертацията на един от докторантите. Изучават се различни алгоритми за планиране на движения за хващане на обекти; подготвя се алгоритъм за езика на жестовите от създадената ръка и др. По-подробна информация и критичен анализ свързан с темата може да се намери в [дисертацията на Ивайло Георгиев](#).

5. Заключение

Това приложение обобщава работата на колектива на проекта свързана с дейност 2.1. Разгледани са работи подходящи за работа в сложна среда и техните характеристики. Направен е критичен анализи. Проучването и анализите са в основата за развитие на публикуваните до момента статии по проекта и ще се ползват за развитието му в етап 2.

Литература

1. Kexin Li, Tinghe Na, Kaiming Zhang, Application of Robotics Technology in Extreme Environments, Proceedings of the International Workshop on Advances in Deep Learning for Image Analysis and Computer Vision (IWADIC 2025), DOI10.2991/978-94-6239-648-7_5.
2. Ke You, Cheng Zhou, Lieyun Ding, Yuxiang Wang, Construction Robotics in Extreme Environments: From Earth to Space, Engineering, Volume 55, December 2025, Pages 107-124, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.11.037>
3. Himangshu Kalita, Jekan Thangavelautham, Exploration of Extreme Environments with Current and Emerging Robot Systems, Springer Nature Switzerland AG 2020, Current Robotics Reports, <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00016-3>
4. Yuhan Li, Shengzhi Wang, Juan Du, Wen qiWen qi, A Review of Mobile Robots in Extreme Environments, Conference: 2023 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA), DOI: 10.1109/WRC SARA60131.2023.10261808
5. Mario Gianni, Towards Expendable Robot Teaming in Extreme Environments, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research Vol. 8, No. 6, November 2019, doi: 10.18178/ijmerr.8.6.830-838
6. Papadopoulos, E.; Aghili, F.; Ma, O.; Lampariello, R. Robotic manipulation and capture in space: A survey. Front. Robot. AI 2021, 8, 686723.
7. Zhang, X.; Liu, J.; Gao, Q.; Ju, Z. Adaptive robust decoupling control of multi-arm space robots using time-delay estimation technique. Nonlinear Dyn. 2020, 100, 2449–2467.
8. Moghaddam, B.M.; Chhabra, R. On the guidance, navigation and control of in-orbit space robotic missions: A survey and prospective vision. Acta Astronaut. 2021, 184, 70–100.
9. Flores-Abad, A.; Ma, O.; Pham, K.; Ulrich, S. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing. Prog. Aerosp. Sci. 2014, 68, 1–26.
10. Siciliano, B.; Sciavicco, L.; Villani, L.; Oriolo, G. Robotics: Modelling, Planning and Control; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009.
11. Conkur, E.S.; Buckingham, R. Clarifying the definition of redundancy as used in robotics. Robotica 1997, 15, 583–586.

12. Reiter, A. Optimal Path and Trajectory Planning for Serial Robots Inverse Kinematics for Redundant Robots and Fast Solution of Parametric Problems; Springer: Wiesbaden, Germany, 2020.
13. Nakamura, Y.; Robotics, A. Advanced Robotics: Redundancy and Optimization; Addison-Wesley: Reading, MA, USA, 1991.
14. Siciliano, B.B.; Khatib, O.; Kröger, T. Handbook of Robotics; Springer: Berlin, Germany, 2016.
15. Khatib, O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Int. J. Robot. Res.* 1986, 5, 90.
16. GE, S.; Cui, Y. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method. *Auton. Robot.* 2002, 13, 207–222.
17. Rybus, T. Obstacle avoidance in space robotics: Review of major challenges and proposed solutions. *Prog. Aerosp. Sci.* **2018**, 101, 31–48.
18. Yan, J.; Jin, L.; Hu, B. Data-Driven Model Predictive Control for Redundant Manipulators with Unknown Model. *IEEE Trans. Cybern.* **2024**
19. Avinash, K.S. AI-Driven Robotics in Space Exploration. *Int. Res. J. Eng. Technol.* **2025**