

## PROBLEMS AND CURRENT STATE OF MOBILE ROBOTS FOR EXPLORATION PURPOSES

Dimitrov Atanas, Burgas Free University, [atanas@bfu.bg](mailto:atanas@bfu.bg)

**Abstract:** *In this paper, the problems and the current state of mobile robots proposed for research and exploration are analyzed. At first, working environment and scene characteristics are evaluated. Next, evolution and development of locomotion systems for ground mobile robots are studied in terms of increasing their mobility. Current trends and issues in the development of the sensory systems, existing techniques for remote control, metric and map-based navigation also are investigated. At the end of this study, segmentation and feature extraction algorithms, based on one and two dimensional distance measurement sensors are reviewed.*

**Keywords:** *mobile robots, locomotion, sensor systems, remote control, navigation, segmentation, feature extraction*

## ПРОБЛЕМИ И СЪВРЕМЕННО СЪСТОЯНИЕ НА ИЗСЛЕДОВАТЕЛСКИТЕ МОБИЛНИ РОБОТИ

Атанас Димитров, Бургаски свободен университет, [atanas@bfu.bg](mailto:atanas@bfu.bg)

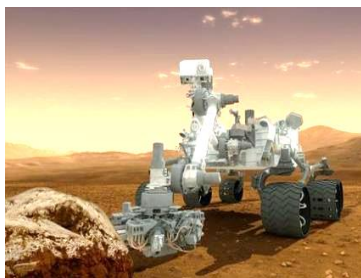
**Абстракт:** *В статията се анализира съвременното състояние на мобилните роботи предназначени за изследователски цели. Първоначално е направен анализ на работната среда и сцена и особеностите на локомоционните системи и развитието им от гледна точка на повишаване проходимостта им, с акцент върху наземните мобилни роботи. Анализирани са и съвременните тенденции и проблеми при развитието на сензорните системи на мобилните роботи, съществуващите техники за телеуправление и водене на мобилни роботи посредством метрични и решетъчни карти, както и особеностите и алгоритмите свързани с извличането на информация за работната сцена и среда посредством едномерни и двумерни сензори за измерване на разстояние.*

**Ключови думи:** *мобилни роботи, локомоции, сензорни системи, телеуправление, навигация, сегментация*

## ПРИЛОЖНИ ОБЛАСТИ НА ИЗСЛЕДОВАТЕЛСКИТЕ МОБИЛНИТЕ РОБОТИ

Когато се заговори за *изследователски мобилни роботи* (ИМР), хората инстинктивно ги свързват с успехите на различните космически агенции, успели да изпратят извън пределите на земята, едни от най-технологично развитите системи. Тези роботи са израз на стотици, дори хиляди човеко-часа неуморен труд, съчетание на върхови технологии и не на последно място – израз на стремежа на хората към опознаване и изследване на неизвестното. И тук възниква въпроса – „Кое ни дава основание да класифицираме един робот, като *изследователски*?”. Еднозначен и универсален отговор на този въпрос не може да се даде. Като *изследователски*, може да бъде определен робот, предназначен както за: - космически и планетарни изследвания [1], [2], [3], [4], [5], изследване на морските дълбини [6], [7], [8] или етологията (поведението) на рибните популации [9], работи за изследване на вулкани [10], [11], [12], руини от земетресения и природни бедствия [13], [14] [15], [16], [17], инспекции под автомобили свързани със сигурността

[18], при промишлени аварии [19], тръбопроводи [20], [21], шахти [22], картографиране на минни галерии, пещери и тунели [23], [24], [25], [26], [27], [28], горски и селскостопански масиви [29], [30], роботи за изследвания в медицината [31], [32], [33] и т.н.(Фиг. 1), така и робот създаден за целите на самите научни изследвания включващи: имплементиране на нови алгоритми свързани с ефективно управление на бордовите системи, сензори, комуникации и потребителски интерфейс [34], [35], [36] [37], локомоционни системи, техники за водене и навигация, локализация и картографиране [38], [39], изследвания свързани с групова работа на роботи [40] и взаимодействието между човек и робот/и [41], [42], когнитивните способности на операторите [43], обучение на специалисти [44] [45], [46], [47] и пр.



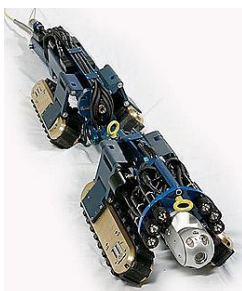
а/ Curiosity Rover Mars Lander



б/ Seaeye Falcon DR



в/ Robovlc



г/ Versatrax 300 VLR™



д/ Gemini Scout



е/ Harvest Vehicle HV-100

*Фиг. 1. Примери за приложение на мобилните роботи: а/ - планетарен изследовател; б/ - инспектиращ подводен робот; в/ робот за изследване на вулкани; г/ робот за инспекция на тръбопроводи; д/ робот за спасителни операции в мини; е/ селскостопански робот за градинарство*

Независимо от голямото разнообразие от приложения на ИМР, определящ фактор при избора на бордови системи са техните физични параметри - габарити и маса, работна среда, както и спецификата на конкретните задачи за които са предназначени. Според размерите и хода на локомоционните им движения, съвременните мобилни роботи се класифицират на *макро*; *мезо*; и *мини*. С развитието на *MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)* технологиите се създадоха условия за изграждане на микророботи с приоритетно приложение в медицината, а все по-често се заговаря и за нано такива [48], [49], [50]. Естествено, най-голямо разнообразие са получили *мезо* системите, което е довело до допълнителното им структуриране на малки, средни и големи МР [51].

Спецификата на работната среда на ИМР е довела до разделянето им в следните основни класове: *летящи системи* с 6 степени на свобода в *атмосферата* (многовитлови платформи [52], аеростати, махащи [53] и др.) и в *космоса* (вкл. многоръки с възможности за придвижване чрез прехващане - пълзене) [54]; *подводни* – с 6 степени на свобода и специфични възможности за движение по дъно, по обекти и по водната повърхност; *специални* - за движение в тръби, по електропроводи, придвижване чрез издърпване, прилепване към стени и тавани, ровене в рохкави структури, движение в организми (вкл. човешки); *наземни МР* за придвижване по повърхност (с до 3 степени на свобода) в условия на гравитация и триене. Работната сцена на наземните мобилни роботи включва: *сградни помещения* и *технически съоръжения* (индустриални и транспортни); *урбанизирани райони* (сгради, дворове, канали, тунели, пътища, площадки и ж.п. линии); *естествена среда* при различен релеф и повърхност. Широкото разпространение в урбанизираните райони на изкуствени, плоски, гладки и твърди основи (подове, улици, тротоари и площадки), позволява бързо и енергийно ефективно придвижване чрез колесни мобилни платформи с конвенционални, статично устойчиви конструкции – триколесни (диференциални) и класически четириколесни [55], [28], както и *новоразвивани* едно и двуколесни системи с динамична устойчивост [56], [57] (Фиг. 2).



Фиг. 2. Конвенционални и новоразвивани мобилни роботи с динамична устойчивост: а/ триколесен диференциален робот; б/ класически четириколесен; в/ двуколесен и г/ едноколесен балансиращ робот.

Системите са прости, но позволяват само заобикаляне на препятствия в равнината. Разширяването на задачите, профила и вида на основата, както и многообразието от препятствия в пространството, налага използването на високомобилни роботи от следните конструктивни групи: *многоколесни* с 4, 6 и повече активни колела, както и *омниколесни* [58]; *крачеци* с висока адаптивност към терена [59], [60]; *змиевидни* (хипер-редундантни) локомотори [61], [62]; *хибридни*, включващи - *крачецо-колесни* [2]; *крачецо-верижни* [63], [64], [65]; *колесно-верижни* [66]; *верижни* (Фиг. 3). Верижните МР са с доказани предимства пред колесните, когато е необходимо придвижване по







терени с ниско контактно налягане (рохвава пръст, дълбока кал, прясно паднал сняг) и различни неравности.

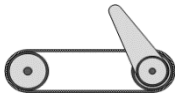

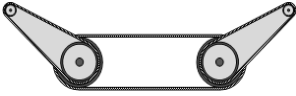

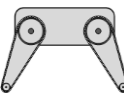



Фиг. 3. Примери за високомобилни роботи

Характерно за двуверижните роботи е диференциалното задвижване, но стремежа към повишаване на проходимостта на системите позволява структурирането им на: компактни [1], [3]; моноверижни [67], [24], [68]; с удължени вериги и с подобрена проходимост [25], [69]; с активни [70], [71] или пасивни [72] флипери; с променлива геометрия [73], [74], [65]; с четири [63], [64] и шест [75], [19] вериги. В

Таблица 1. Класове верижни мобилни роботи

№	Клас МП	Верижна схема	Представител / Име
1	Компактни		 EyeDrive
2	С удължени вериги		 MMP-40T
3	С подобрена проходимост	3.1	 Element
		3.2	 Robotnik Rescuer
		3.3	 Johnny 5
4	С активни флипери		 510 PackBot

5	С пасивни флипери			FirstLook
6	Шест верижни			Silver
7	Крачещо-верижни			AZIMUT

Нова тенденция в развитието на високомобилните роботи са разработките, [76], [77], [78], [79], [80], при които се интегрират функциите на манипулатора и локомотора. Семейството MR *HELIOS* [78], [79], [80] има двуверижен механизъм и манипулатор, който активно помага на робота при преодоляване на сложни препятствия, добавяйки му устойчивост при движение по изключително разнообразен терен. Използването на манипулатора позволява: преодоляване на високи стъпала; възстановяване на ориентацията след преобръщане; поддържане при неустойчиви конфигурации и балансиране по наклони. Освен асистирание при движение на робота, манипулаторът може да се използва и за манипулиране на обекти в сцената.

Роботът на Ben-Tzvi [76], [77] представя новата парадигма при изграждането на подобни системи, при които се разширява интеграцията между двете системи за движения. Чрез хибридизацията на локомотор и манипулатор се постига висока степен на взаимно допълване на същите. Заложена е симетрия и взаимозаменяемост на механизмите. Обединяват се предимствата на верижните и змиевидните системи с висока статична устойчивост. Конструктивната и функционална интеграция на локомотор и манипулатор, както и на локомоции и манипулации позволява да се разширят общите възможности на роботите при малък брой задвижвания и съответно облекчено храняване, комуникация, дистанционно водене. Манипулаторите успешно подпомагат локомоционните функции чрез: допълнителна пасивна опора към основата с цел разширяване на статичната стабилност; пълзене при преодоляване на високи препятствия; статично или динамично балансиране на платформата; издърпване или избутване при стръмни наклони, при съвместна координация на движенията.

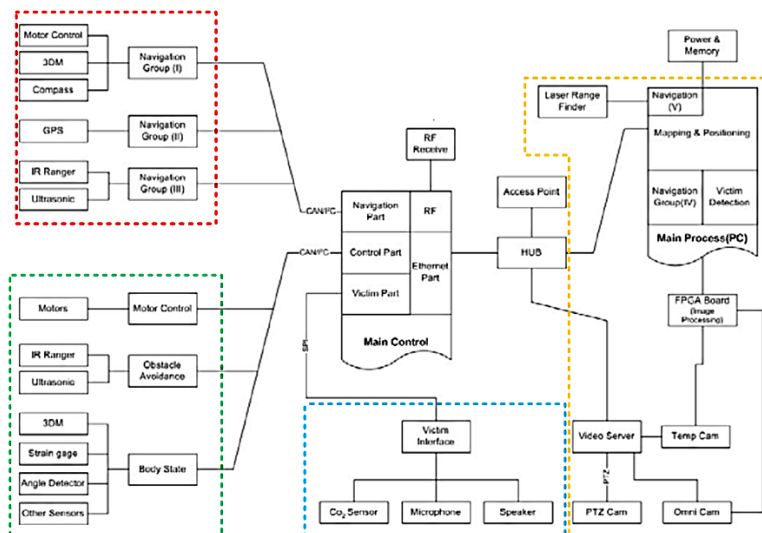
Независимо от голямото разнообразие на приложения, локомоционни системи, специфика на задачите и релефа на работна сцена, обединяващото при роботите проектирани за изследователски нужди, е начина им на управление. Характерно за ИМР е, че са дистанционно управляеми от оператор, като тук трябва да се отбележи, че в контекста на дистанционно управление, се визира управление от разстояние без пряка видима връзка с робота. Подобно управление поставя редици въпроси свързани с избора на сензорна система за възприемане на работната среда, интерпретирането и онагледяването на сензорните данни (картографирането на работна среда), методи за еднозначно определяне на положението на робота в работната сцена (локализацията на робота), техниките за планиране на път без наличието на непреодолими препятствия, осъществяване на непрекъснат и шумоустойчив комуникационен канал и ефективно разпределяне на бордовите енергийни ресурси.

Следващата част е посветена на проблемите свързани с телеуправлението и методите за навигация на наземни мобилни роботи, събирането на информация за работната среда и моделирането на работната сцена.

## ОЦЕНКА НА СЕНЗОРНИТЕ СИСТЕМИ В МОБИЛНИТЕ РОБОТИ

Мобилните роботи възприемат заобикалящият ги свят посредством наличната им сензорна система. Сензорите обуславят възможност за взаимодействие със заобикалящата ги околна среда с определени физически действия. Използваните в съвременните МР сензори се структурират на *вътрешни* и *външни*. Предназначението на вътрешните сензори е за измерване на *кинематичните* (положение, скорост и ускорение), *динамичните* (двигателен момент) и *енергийните* (мощност и капацитет на батериите, температура) параметри на роботите. Задачите на външните сензори обикновено се свързват с *картографиране* на работната сцена, *локализация* и *навигация* на робота, *идентификация на препятствия* по сцената по време на придвижването на робота, както и целеви инспекции на обекти и/или параметри на средата. Групирането на сензорни системи в мобилните роботи е свързано с редица съображения за минимално необходимите или целесъобразни измервания при изпълнение на различните класове задания. Стремещт да се моделират функциите на сетивата на човек-оператор е продиктувана от факта, че неговата автономност и целенасочено поведение в средата са идеален модел за автономен робот [81]. В зависимост от спецификата на целевите задачи, разнообразието в бордовите сензори на роботите е голямо. Характерно за роботите предназначени за подводни изследвания е наличието на една или повече видео камери предназначени за водене на роботите, сонарна система за засичане на препятствия и инерционно-измервателно устройство за определяне положението им [6], [7], [8]. Известен факт е, че локализирането на този клас изследователски работи не може да се осъществи чрез системата за глобално позициониране (GPS), тъй като, радиовълните са „безполезни“ във водни среди [7].

Наземните мобилни роботи за разлика от подводните нямат ограничения при избора на сензорна система. Главното изискване е тя да е съобразена с основните дейности на робота и едновременно с това да предоставя цялата необходима информация, както за дистанционното му водене, така и за автономното изпълнение на предварително дефинирани операции и цикли. При роботите, използвани за спасителни операции, сензорните им системи могат условно да се разделят на четири групи: *навигационна*; *картографираща*; *целева* и *управляваща* групи [13], [14], [15], [16], [19], [17], [82]. *Навигационната група* включва сензори и системи за измерване на разстояния до обекти (ултразвукови сонари, инфрачервени локатори и лазерни скенери) и сензори за ориентация и позициониране в равнината и пространството (жироскоп, компас и GPS). За *картографиране* на работната сцена се използват предимно сензори за получаване на двумерни и видео изображения (лазерни скенери, и различни видове камери). *Целевата група* обединява специализирани сензори за откриване и анализ на вредни за човек газови емисии, относителна и абсолютна влажност, радиационен фон, термо камери и сензори с общо предназначение включващи измерване на температура, микрофони и др. *Управляващата група* обхваща сензорите за управление на двигатели, позициониране на флипери, преодоляване на препятствия и сензори за енергиен мениджмънт. Пример за по-горе направеното разпределение е показан на Фиг. 4.



Фиг. 4. Блокова схема на управлението на робота Ariane III, предназначен за спасителни и рискови операции

Както бе споменато, разделянето е условно, защото едни и същи сензори участват в повече от една група (сонари, енкодери, лазерен скенер, жирокопи). В Таблица 2 са обобщени сензорните системи на 9 различни високомобилни наземни роботи от лек и среден тип използвани за изследователски и рискови операции [83], [84], [72], [85], [86], [87], [88], [89], [82], [90]. Анализът на данните показва, че за измерване на средни разстояния се използват предимно сонари с обхват от 1÷7m, като в случая са предпочитани пиезоелектричните сонари (1, 2, 4, 5,9). Сонарите в робот (3) и (6) са от електростатичен тип, а броят на сензорите варира в границите (3÷24бр.).

За измерване на разстояния в диапазона от 10÷80cm се използват предимно инфрачервени (IR) сензори, разположени предимно в основата на платформите. Всички показани роботи в таблицата използват 2D лазерни скенери за създаване на карта на работната сцена, а за определяне на абсолютната равнина и

Таблица 2. Сензорни системи на наземни мобилни роботи за изследователски и рискови операции

№	Мобилни роботи	Сонари	IR	Лидари	Компаси	Жироскопи	GPS	TB Камери	Целеви сензори	Енкодери
1	Arian III (Ariana)*	SRF08 (Devantech)	GP2D02 (Sharp)	URG-04LX (Hokuyo)	CMPS03 (Devantech)	3DM-G (Microstrain)	iQ GPS (Lassen)	IR CCD j” (Panasonic); 360° - (Sony)	IR t°, (Omega); CO <sub>2</sub> - 2015SPI-1 (Valtronic)	AC36, (Acuro Ind.); HEDS558 (Faulhaber)
2	Ringhorne (RFC Uppsala)	SRF08-10pcs. (Devantech)	** 8 pcs. (Sharp)	URG-04LX (Hokuyo)	-	-	-	ToUcam Pro PCVC 740k (Philips)	2 pcs- Pyro-el. IR sensor,(Nippon Ceramic); CO <sub>2</sub>	-
3	Rugbot (IUB)	** (10m; 60°) (Polaroid); ** (7m; 10°), (Baumer)	* (0.7m; 10°) (Sharp)	URG-04LX (Hokuyo)	-	IMU MTi (Xsense)	-	USB (1280x960) – 3 pcs. (Philips); A20 IR (FLIR Sys.);TOF- SR-3000(Mesa Imaging)	CO <sub>2</sub> (Vaisala)	Quadrature (Hewlett Packard)
4	Good Samaritan (Colorado State University)	SRF05 - 6pcs. (Devantech)	GP2Y0A02YK -5pcs, (Sharp)	URG-X003S (Hokuyo)	Vector 2x (PNI Tech)	IMU – 5DOF (Sparkfun)	-	“Zerolux” PC209IR (Supercircuits); IR A10, (FLIR Sys)		HEDS5500 – 6pcs (Faulhaber)
5	Zerg (Universitat Freiburg)	SRF08 - 3pcs (Devantech)	GP2D12 - 2pcs. (Sharp)	URG-04LX (Hokuyo)	CMPS03 (Devantech)	IMU InertiaCube; ADXL202 (Analog Dev)	-	Quickcam 4000 (Logitech) Thermal Eye	Pyro-el. R3-PYRO01 (Acroname)	R238-WW01-KIT (Acroname)
6	PeapleBot (Adept )	** 24pcs+8pcs opt.	**2pcs+2pcs fixed	LMS200 opt. (SICK)	TCM2 (PNI Sensor Corp.)	-	GPS (Novatel)	PTZ camera	2 pcs speakers microphone tactile bumpers	** 2pcs quadrature
7	Seekur Jr. Outdoor Manipulator (Adept Mobile Robot)	-	-	LMS-111 (SICK)	-	** IMU	** dGPS	Color PTZ, (RVision) MobileRanger (Adept Mobile Robots)	-	** 4 pcs
8	Jaguar 4x4 Wheel (Dr. Robot Inc)	-	-	URG-04LX opt. (Hokuyo)	HMC5843 3-axis Magnetometer (Honeywell)	ITG-3200 3-axis Gyro, (InvenSense) ADXL345 3-axis Accel (Analog Dev)	GPS 18x 5Hz (Garmin)	Color Camera- 640x480 with PIR motion sensor (Axis)	-	-
9	Hector (Darmstadt)	SRF05/SFR08 (Devantech)	-	URG-04LX UTM30-LX (Hokuyo)	HM55B (Hitachi)	IMU - ADIS16350 (Analog Dev)	-	uEye UI-2230RE (IDS) ThermalEye 3600AS(L3 communications) Kinect Sensor (Microsoft)	-	Self-made

Забележка: \* в скоби под всеки сензор е посочен производителя, \*\* липсва конкретно название.

пространствена ориентация се използват предимно електронни цифрови компаси и жироскопи комбинирани с акселерометри. Роботи (1, 6÷8) използват GPS система за определяне на глобалното си местоположение.

Всички роботи са съоръжени с една или повече камери, като тук техническото разнообразие е много голямо, както по отношение на параметрите на използваните камери, така и по отношение на технология и производител. Робот (1) използва 360° панорамна камера осигуряваща цялостна картина на работната сцена и среда и една камера монтирана фронтално за предаване на визуална информация по време на движение. Четири от анализираните роботи използват термокамери (3 ÷ 5, 9), а апарати (2) и (7) са екипирани и със стерео камери.

Целевите сензори включват предимно сензори за измерване на температура и въглероден диоксид, като най-често се използват IR сензори за безконтактно измерване на температурата. Одометричните измервания се осъществяват посредством енкодери, като най-често използваните са оптически инкрементални.

От гледна точка на избора за монтажно място на отделните класове сензори също има голямо разнообразие. Роботите, чиято информация за разположението на обектите в работната сцена се получава от ултразвукови или инфрачервени сензори, са с изградена, под формата на пояс по обшивката сензорна система [91], [92], [93], [94], [29], [46], [88], [95], [39], [96]. Лазерните скенери (*далекомери*) от друга страна, предоставят на дизайнерите възможност за оптимални конструктивни решения, от гледна точка на това, че повечето съвременни скенери имат ъгъл на сканиране в диапазона 180 ÷ 270°, възможност за софтуерно ограничаване броя на сканиращите точки, с компактни размери са, а ориентацията на сензора влияе в допустимите граници върху точността на измерването, което позволява монтирането им да е на най-подходящото място в конструкцията на робота. Голямата популярност на лазерните далекомери, като средство за възприемане на работната среда се дължи на редица предимства пред останалите сензори за измерване на разстояния: осигуряват голям обем от данни, при това с голяма точност на измерването; имат висока честота на дискретизация малък дисперсионен ъгъл (0.5÷3.5mrad), което обуславя високата им ъглова разрешаваща способност [97].

Работи [98], [99] представят изследванията свързани с характеристиките на компактният 2D лазерен скенер URG-04LX, произвеждан от фирмата Нокуюо. В [98] са изследвани характеристиките свързани с т.нар. „плаващ ефект“, точността на измерването в зависимост от разстоянието до обектите и характеристики на обектите включващи цвят, яркост, материал, както и влиянието на ориентацията на сензора, осветеността на средата и зависимостта на измерването от ъгъла на падане върху обектите. Авторите са установили, че точността на измерването със сензора силно зависи от яркостта на материала и от неговите свойства. Също така е установено, че при попадане на сканиращият лъч под наклон може да доведе до големи отклонения в измерването, особено при по-големи разстояния. Когато е необходима висока надеждност на измерването при разстояния до 5m, авторите препоръчват измерваните обекти да са светли, но не и лъскави. Установено е още, че промяната на осветеността на работната среда не води до повишаване на грешката в измерването, точността на измерването се влияе с времето, т.е. необходимо е сензора първо да се „темпера“ за около 30min и след това да се използва.

Изследванията на Okubo, Ye и Borenstein [99], освен горе споменатите тестове, включват и изпитания за определяне скоростта на сканиране и трансфера на данни и изследват проблема известен, като „обърканите пиксели - mixed pixels”. Получените резултати са

сходни с резултатите в [98], като значителна разлика е получена във времето за темпериране на сензора, което според авторите е *90min*. По проблема свързан със случайно появяващите се пиксели, т.е. отчитане на препятствие, което в действителност може да го няма, авторите съветват, при използване на сензора за задачи свързани с избягване на препятствия или картографиране, работната среда да се визуализира чрез използването на статистически модели.

2D лазерните скенери успешно се използват и за извличане на триизмерна информация от средата. В работи [23], [75], [19], [70] два или повече лазерни скенера са разположени така, че сканиращите им равнини да не съвпадат, което позволява чрез комбиниране на данните за сканираните точки, да се построи триизмерен модел на средата. 3D информация за средата може да се получи и чрез промяна ъгъла на сканиращата равнина при използването само на един лазерен скенер [100], [86], [24] [90], [101], [102], или чрез монтирането му на мобилен манипулатор [103]. Подобни решения са икономически изгодни и предпочитани от болшинството разработчици, понеже цената на 3D комерсиалните лазерни скенери е в пъти по-голяма от масово употребяваните 2D скенери.

## АНАЛИЗ НА МЕТОДИТЕ ЗА ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЕ НА МОБИЛНИ РОБОТИ

*Телеуправлението (teleoperation)*, като понятие означава да се управлява дадена система от разстояние (от гръцки префикса *tele* – буквално означава „от разстояние“ и *operation* – означава „изпълнение на задача“). Така, чрез термина телеуправление се описва взаимодействието на многокомпонентни системи с обкръжаващата среда, в случаите когато, компонентите на системата са дислоцирани на разстояние един от друг. В мобилната роботика, телеуправлението е нарицателно за системи съчетаващи когнитивните способности на оператор-експерт и силата и издръжливостта на мобилен робот. Независимо, че стремежите и търсенията на инженерите конструиращи МР са насочени към създаването на напълно автономни и „разумни“ роботи, когато говорим за ИМР, способността на хората да преценят и взимат решения в екстремни ситуации, не може да се замени дори и от най-напредналата и авангардна технология. Телеуправлението остава основен метод за водене МР в неструктурирани и динамични среди, а телеуправляемите системи функционират на принципа *главен-подчинен (master-slave)* [104], [105], [106], като подчиненото устройство се управлява отдалечено от оператор. В сложни и екстремни ситуации, оператора анализира сензорната информация и взема адекватно решение за последващите действия на робота. В [106] се посочва, че в зависимост от приложението, телеуправлението може да се класифицира в три основни класа: *непосредствено (direct)*; *координирано* и *супервайзорно телеуправление*. Подобна, но разширена класификация се дава и в [107], като тук класификацията е направена в зависимост от степента на участие на управляващите функции и абстрактността на подаваните команди от оператора. Венков дефинира четири режима за опериране на МР: - *теле-операции*; *теле-автономия*; *разпределена автономност* и *пълна автономност*. При непосредственото телеуправление или режим на теле-операции, известни още като, *Closed Loop Control (CLC)*, оператора управлява изпълнителните механизми (актуаторите) на робота непосредствено чрез аналогови сигнали и получава обратна информация в реално време. Това е възможно само тогава, когато има минимално забавяне на получаваната информация. Типичен пример за CLC управление е радио управляемите модели. В режим на теле-автономия или координираното телеуправление,

отново оператора е този, който се грижи за работата на актуаторите, но също така съществува и локална обратна връзка, която допълнително може да изработва сигнали за управление на тези механизми, които оператора не може да контролира, заради закъснението на получаваната информация. В този случай, операторът изпраща към робота команди с високо ниво на абстрактност и анализира обработени от сензорните канали данни за средата. Докато при разпределената автономност (супервайзорно телеуправление), операторът и роботът, работят съвместно като партньори, изпълняват обща задача и обменят информация в диалогов режим, то в режим на пълна автономност, робота трябва да може да изпълни целевата задачата самостоятелно, без намесата на оператора. Независимо, че в областта на телеуправлението се работи вече повече от 70 години [104], [105], [106], [108] все още съществуват редица проблеми свързани с отдалеченото управление на МР. Според [109], [105] [106] [110], [111] главните проблеми произхождат от комуникационната връзка, т.е. скоростта на предаване на данните от робота към оператора, ширината на комуникационният канал, разстоянието между комуникиращите си системи и закъснението при предаване на управляващи команди и приемане на сензорна информация, водещи до влошаване на производителността на телеуправляемата система. Всички тези проблеми са свързани с устойчивостта и надеждността на телеуправляемата система. Постигането на „прозрачна“ високоустойчива система, позволяващи на оператора да възприема отдалечената работна сцена и да изпълнява целевите задачи все едно, че се намира в нея, е довело до разработването на различни техники за телеуправление.

Сравнителен анализ на 10 стратегии (схеми) за телеуправление е направен в [109]. Всички те имат за цел да подобрят когнитивните способности на операторите, като едновременно с това дават възможност за надеждно и адекватно управление на робота. В [111], *Slawiński, Mut* и *Posigo*, предлагат схема за двустранно управление на мобилен робот, при която компенсирането на време-закъснението се осъществява едновременно и в отдалеченият робот и в операторската станция. За целта, в предложената стратегия, воденето на робота се осъществява на базата на визуална информация посредством симулиран и реален комуникационен канал.

Стратегия основаваща се на сътрудничество и диалог между робот и оператор за постигане на целите е предложена в [94]. Според *Fong et.al.*, предложената от тях стратегия води до по-голяма производителност на системата, породено от факта, че диалоговият процес играе и координираща роля, както и от това, че системата има възможност за адаптиране към възможностите и експертното мнение на конкретният оператор, който работи с нея.

Хибридна стратегия за двупосочно телеуправление е предложена от *Farkhatdinov* и *Ryu* [112], комбинираща стратегиите *позиция-скорост* и *позиция-позиция*, като работата е продължена в [93]. В своите изследвания, авторите използват обратна връзка по сила за определяне разстоянието до препятствията в работната сцена. Поради малката точност в някои ситуации, които авторите са постигнали, *Farkhatdinov et.al.* съветват използването на подобна стратегия да се прецизира. От друга страна, чрез управление по скорост, авторите са постигнали висока продуктивност, а чрез стратегия по позиция – голяма производителност и точност. Използването на комбинирана стратегия, позволява на оператора да избира конкретна техника за водене в зависимост от това дали се нуждае от висока продуктивност или максимална прецизност. За повишаване на точността при воденето на МР при използването на обратна връзка по сила, *Farkhatdinov* и *Ryu*, изследват влиянието на прилагане на променлива сила в обратната връзка при

позиционирането на МР [113] Проведените експерименти, обаче са показали, че качеството на управлението на движението не се влияе от големината на приложената сила, но дава по-добри показатели при позициониране на робота и възможност за плавно водене.

През последните години, опитите в телеуправлението са насочени към разработването на хаптичните интерфейси усилващи осезателните възможности на оператора, които подобряват интуицията и способността на оператора за възприемане структурата и релефа на работната сцена, както и повишаване на телепресъствието му чрез допълване с визуална информация [91], [92], [114], [115], [95], [96]. В МР популярност са получили две от хаптичните форми: - *обратна връзка по сила (force feedback)* и *вибро-тактилна обратна връзка (vibro-tactile feedback)* [95]. При използването на обратната връзка по сила, е необходимо хаптично устройство, което да осигурява, най-често положителна обратна връзка на ръката или пръстите на оператора, при засичане на препятствие от сензорната система на робота и необходимост от предприемане на маневри за избягването на колизия с него.

*Nadrag et al.* [115] използват 7 ултразвукови сензора за измерване на разстоянието до препятствията около робота. Получената информация след това се преобразува в съпротивителна сила приложена върху управляващ лост и подпомагаща оператора при избягването на препятствието. Подобна е и работата на *Cho et. al.* [91], които използват джойстик с вграден двуосев сензор на Хол за детектиране отместването на ръката. Предимството на подобна система се състои в премахването на механичните части, които с времето се износват. Предназначението на датчика на Хол е да засече промяната на магнитното поле в следствие преместването на лоста на джойстика, а контролерът на джойстика изпраща сигнали за скоростта и направлението на движение на робота. Робота е екипиран с 16 ултразвукови сензора, монтирани по обшивката му, които измерват разстоянието до обектите в средата. Информацията приемана от оператора е под формата на рефлекторна сила, която е пропорционална на разстоянието до препятствията и относителната скорост на движение на робота между препятствията.

За осигуряване на допълнително възприемане на работната среда с помощта на хаптична обратна връзка при телеуправлението на мобилни роботи, са разработени различни вибро-тактилни интерфейси. *Tsetserukou et.al.* в своята работа [96], представят интерфейс базиращ се на тактилен колан, монтиран на талията на оператора. Информацията за разстоянието до обектите на сцената се получава от лазерен скенер, като сканираните точки се преобразуват към координатната система на робота за да може да се активират вибраторите на колана задаващи страната от която е засечено препятствието. В зависимост от интензивността на вибрациите на различните актуатори, колана позволява да се определи формата на препятствието – изпъкнало, вдлъбнато или гладко, като и това дали препятствието е динамично.

В [95], *Pamungkas* и *Ward* представят безжичен електро-хаптичен интерфейс за управление на триколесен мобилен робот. Възприемането на средата става посредством ръкавица, от вътрешната страна на която са монтирани електроди. Всеки електрод е асоцииран с конкретен сензор от мобилният робот и в зависимост от разстоянието до препятствията се изработва електрически сигнал, въздействащ върху ръката на оператора. Воденето на робота се базира на решетъчна карта на заетостта, разделена на четири препокриващи се региона, за всяко едно от възможните направления на движение и концентрични сектори, дефиниращи близостта на препятствията. Недостатък на по горе разгледаните системи е, че те включват наличието на електро-механични звена и

актуатори за въздействие върху оператора, отнемащи време за пренастройване при промяна на целевите задачи, както и необходимостта от подмяна на износените механични компоненти.

За осъществяване на съответното управление е важно оператора да е добре осведомен за обкръжаващата среда на робота. Използването на неподходящи средства за визуализация могат да доведат до умствено натоварване, намалена концентрация и работна неефективност [116], [36]. В зависимост от режима на опериране на робота [106], [107], изследователите непрекъснато усъвършенстват съществуващите и предлагат нови подобряващи телеуправлението на МР методи. Подходи базирани на автономност на робота, като теле-автономия [117], разпределената автономност [118], [119] и гарантираната автономност [120], [121] намаляват стреса върху оператора. Ограничения при използването им се явяват резервирането на функционалните им системи и невъзможността за предвиждане и програмиране на всички възможни ситуации. Ефективното телеуправление е в тясна връзка с интерфейса транслиращ командите на оператора и визуализиращ постъпващата сензорна информация. Интерфейсите за непосредствено телеуправление са ефикасни при широколентова комуникация, малки закъснения и управление в реално време [122]. В сложна и/или динамична среда, мултимодалните интерфейси помагат за точно възприемане на средата и навременно вземане на решение. За МР със степен на автономност са подходящи интерфейси за супервайзорно управление. Те позволяват сложна задача да се раздели на подзадачи, изпълнявани от робота самостоятелно, независимо от закъснението в комуникациите [122].

Развитието на Internet технологиите и увеличеният капацитет на преносната среда, направиха възможно телеуправлението на МР да е *web* базирано [92], [123], [124], [114], [110] или чрез *Bluetooth* стандарта [91], [125], [126]. Глобалната мрежа на практика премахва ограниченията в разстоянията между оператор и робот, но непредсказуемостта, динамичността и несигурността при използването и от една страна и различните време-закъснения обаче я правят неподходяща при използването и в реално време. Използването на PDAs (персонални цифрови асистенти) за телеуправление на МР в сравнение с настолни или преносими компютри дават определена мобилност и свобода в движенията на оператора [127], [120], [94], [124]. Малкият размер на екрана и лимитираната им изчислителна мощ обаче са основните им ограничения - не могат да визуализират и обновяват цялата важна информация едновременно.

Интерфейси показващи на оператора гледната точка на робота, най-често използват бордови камери за заснемане на сцената. Това налага използването на видео сървъри и широка честотна лента за пренос на видеосигнала. Комбинирането на информацията от различни видове сензори и визуализацията ѝ по подходящ начин може да разкрие в детайлност особеностите на работната среда, без използването на допълнителни технически средства.

Парадигмата за „*екологичният интерфейс*“ става все по популярна, като средство за подобряване телеуправлението [36], [128], [37]. Чрез използването на сензорната информация и 3D виртуално моделиране на обектите в средата, като допълнение към визуализацията ѝ, значително се подобряват уменията на оператора при воденето на робота в различните приложения и целеви задачи.

## АНАЛИЗ НА МЕТОДИТЕ ЗА НАВИГАЦИЯ НА МОБИЛНИ РОБОТИ

Процесът, определящ еднозначно текущата позиция на един мобилен робот (МР) в работната сцена и задаващ подходящ и безопасен път до целевата дестинация е известен като навигация. В зависимост от използваните технически средства и самият тип на работната сцена и среда, навигацията като инструмент за надеждното водене на МР бива категоризирана по различни начини. Значителен принос за систематизирането на подходите при изграждането на навигационните стратегии, имат изследванията на *DeSouza* и *Kak* [129] и *Bonin-Font, et al.* [130]. Техните проучвания за развитието на визуално ориентираните навигационни методи обхващат периода от 90 години до днес. В проучването си [129], *DeSouza* и *Kak* разделят методите за навигация на такива в закрити и открити среди, като последните допълнително са разделени на структурирани и неструктурирани сцени. Авторите дефинират също и три обобщаващи категории за разделяне на различните техники за навигация в затворени среди:

- навигация базирана на карти (*map-based navigation*) – към тази категория са причислени системите, които зависят от предварително създадени геометрични модели или топологични карти на средата;
- навигация от собствено изградена карта (*map-building-based navigation*) – системите, ползващи тази техника, трябва да са снабдени с подходящото сензорно оборудване за построяването на свои собствени модели на средата;
- безкартова навигация (*mapless navigation*) – основаваща се на методите за разпознаване на обекти в средата и/или проследяване на тези обекти чрез генериране на движения, базирани на пряка визуална информация.

За разлика от *DeSouza* и *Kak*, в работата си [130], *Bonin-Font, et al.* не правят разграничение между различните стратегии за отворени и затворени пространства с аргументите, че стратегии предназначени за единият вид среда, лесно могат да се адаптират за другия вид и обратното. Поради тази причина, класификацията направена от авторите е в двете основни групи – картово- и безкартово- базирани навигационни стратегии. Най-просто казано, навигацията на един робот се свежда до отговарянето на следните три въпроса: *Къде се намирам? Къде отивам? Как да стигна дотам?* На тези три въпроса отговор се дават чрез техниките за локализация, картографиране и планиране на движението на робота [131].

Една от първите широко използвани техники за навигация и избягване на препятствия се основава на метода за засичане на вертикалните ръбове на препятствията. *Borenstein* и *Koren* [132] споменават, че този метод има два съществени недостатъка: голяма чувствителност към точността на използваните ултразвукови сензори и необходимостта от допълнително време за измерване на препятствието, след като е засечено. Метода е неефективен за работа в реално време и при бързо движещи се роботи. За преодоляване на тези ограничения *Borenstein* и *Koren* разработват техника наречена виртуално силово поле (ВСП) (*Virtual Force Field - VFF*), обединяваща карта на заетостта (*occupancy grid*) и метода на потенциалните полета (*Potential Field Method - PFM*). Основните предимства на разработеният метод са: - пълното игнориране на изолирани клетки от картата на заетостта отчитайки ги като случайни грешки; - премахване на необходимостта робота да спира при детекция на препятствие; - паралелно обновяване и използване на картата за навигация; - възможност за използване с разнородни по вид и функционалност сензори.

Навигацията основаваща се на ВСП метода е подходяща за детекция и избягване на препятствия разположени на сравнително големи разстояния едно от друго. В случаи на преминаване по тесни коридори или между близко разположени препятствия този метод е неефективен заради нестабилността на самото движение [133], [134] изразяващо се в резки промени на скоростта на движението. За получаването на плавно движение без да е необходимо ограничение на скоростта на работа авторите предлагат използването на двумерна декартова хистограма за моделиране на работната сцена. Предложеният метод е известен, като хистограма на векторното поле (ХВП) (*Vector Field Histogram* - VFH) и се използва за откриването на проходим път между гъсто разположени препятствия по сцената в реално време. За целта двумерната хистограма се трансформира в полярна, като индикация за проходими трасета служат тези участъци от хистограмата, които са с тегловен номер по-малък от предварително зададен праг. Предимствата на този метод са намалените изисквания към бордовите изчислителни ресурси на работа, има голямо бързодействие позволяващо адекватна реакция при детекция на неочаквано препятствие, както и възможността му за имплементиране в МР с полуавтономно или автономно управление. Основното ограничение на този метод е, че може да се използва само за локално планиране на пътя на работа (*local minima problem*), но не и за намиране на оптимален път, което може да доведе и до ситуацията „задънена улица“. За намаляване риска от подобна ситуация авторите предлагат използването на алгоритъм за глобално планиране на пътя или осигуряването на детайлен модел на работната среда [134].

*Ulrich* и *Borenstein* [135] предлагат усъвършенствана версия на оригиналният ХВП метод. В новият метод, наречен “VFH+”, отчитането на физическите габарити на работа, позволява използването на двоична полярна хистограма за определяне на свободните трасета. Допълнително се въвежда „маскирана полярна хистограма“ отчитаща динамиката и кинематиката на работа и показваща свободното за движение направление, взимайки под внимание текущата скорост на работа. Оптимизираният VFH+ позволява изглаждане на траекторията на движение на МР, повишава се бързодействието на процеса за съставяне на хистограмата, премахва се възможността за погрешно насочване на работа в направление с непреодолимо препятствие и се дава възможност за промяна поведението на работа. Неразрешен остава проблемът свързан с локалният характер на метода. Също така, метода е подходящ предимно за работи с не нулев радиус на завиване и с конструктивна форма близка до формата на кръг. При работи с изразена асиметрична форма, процеса по съставянето на хистограмата се усложнява заради необходимостта от отчитане и на моментната ориентация на работа.

Комбинирането на VFH+ алгоритъмът за избягване на препятствия с алгоритъмът за търсене  $A^*$  в [136], цели преодоляване на проблема свързан с намирането на проходим път до целевата дестинация на работа. Метода е известен, като VFH\* и се изразява в оценка на „последствията“, ако работа избере конкретен път за заобикаляне на дадено препятствие. За разлика от предшествениците си, ефективността на VFH\* се състои в предварително определяне на нова позиция и ориентация на работа, ако се придвижи на няколко стъпки напред.

## **АНАЛИЗ НА СРЕДСТВАТА ЗА КАРТОГРАФИРАНЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА**

Картографирането на работната среда, адресира проблема свързан с придобиване на пространствени модели на средата, на базата на която, оператора водещ МР да планира безопасен маршрут за достигане до крайната дестинация. За целта работа трябва да има

изградена развита сензорна система, данните от която, се явяват първични за интерпретиращите я алгоритми. Съществуването на различни методи за локализация и планиране на движението обуславят и голямото разнообразие на карти които се използват в мобилната роботика [137]. Най-общо, картите се разделят на *метрични* и *топологични*, като при метричните карти за определяне на позицията се използва фиксирана координатна система, а при топологичните се използват пространствените връзки между обектите.

## **Видове метрични карти**

### *Сензорни карти*

Сензорните карти [138] се получават чрез записване и съхранение на информацията получена от сензорите, без да се извършва допълнителна обработка на информацията от тях. Пример за сензорна карта е облак от точки, всяка от която се записва с нейните координати в една глобална референтна координатна система. Независимо от факта, че такава карта не е много полезна сама по себе си, тя се характеризира с това че съхранява данните за всички направени измервания, които могат в последствие да се обработят и послужат за в бъдеще. В някои приложения, като например археологически проучвания или градоустройствено планиране, целта на картата е създаването на точни модели на вече картографираната работна среда само за целите на визуализацията ѝ. В такъв случай 3D облака от точки се триангулира и се създава триизмерно изображение [23], [24], [28]. След като е създадено, то може допълнително да бъде опростено с цел намаляване изискванията към паметта за съхранение. Въпреки, че целта е визуализация, редуцираното изображение може да се използва за симулации и планиране на пътя на робота.

### *Решетъчни карти*

Едни от най-старите и най-популярните карти в мобилната роботика са решетъчните карти [139], [97]. Чрез тях, околната среда се представя под формата на решетка изградена от еднакви клетки. На всяка клетка е присвоен вектор, който описва определени физически свойства на вътрешното си пространство. Ако клетките съдържат информация за височината на терена, то картата се нарича градирана мрежа [138].

В най-често срещаната форма на този вид карти, всяка клетка съдържа числен индекс отбелязващ вероятността тя да е заета, което води до така наречените *Occupancy grids* - заети мрежи [84], [130], [140], [129], [141], [142], [137], [71]. Предполага се, че отделните вероятности са независими една от друга, което позволява самостоятелно определяне влиянието от измерването на отделните сензори. Всеки сензор може да промени индекса за заетост на няколко клетки едновременно в зависимост от модела му. Като пример може да се посочи далекомер, който увеличава индекса на клетките разположени на разстояние по-голямо от измервателният му обхват и намалява индексите на клетки попадащи в обхвата му. Тъй като, клетките на мрежата могат да бъдат достъпни директно, обновяването на мрежата след измерването зависи само от модела на сензора, а не на размера на мрежата. Предимството на тези карти е, че няколко сензора могат да се използват едновременно за актуализиране на мрежата. Това опростява значително синтеза им. Основният им недостатъкът е неефективното използване на паметта особено

при използването на 3D мрежи, тъй като повечето клетки на решетката, ще останат неизползвани заради наличието на празно пространство между обектите.

#### *Геометрични карти*

Използването на геометрични карти [143], [144], [138], [145], [139] за представяне на работната среда цели да преодолее недостатъка свързан с неефективното използване на изчислителните ресурси на работа. За целта, геометричните карти изобразяват само важни участъци на работната сцена. Освен това, те не дискретизират средата и следователно са по-точни в сравнение с решетъчните карти. Геометричните карти моделират околната среда чрез набор от геометрични примитиви, обикновено чрез извличане на линейни сегменти или полигони [139] в двумерното и с равнини в тримерното пространство. Геометричните карти са подходящи за планиране на движението предимно в структурирани и закрити среди, тъй като откритите среди, обикновено са твърде сложни, за да бъдат представени и моделирани само от няколко геометрични примитиви. Най-голямото предимство на геометрични карти е възможността за изобразяване на обектите в средата под формата на CAD модели.

Картите съдържащи маркери [127], са набор от добре различими обекти с известни позиции. За разлика от маяците, маркерите не се поставят в околната среда за целите на локализация. Основната цел на такива карти е локализацията на работа, но могат да се използват и за планиране на движението на работа. Важен проблем свързан с употребата им е извличането на най-характерните особености от информационният поток с данни от сензорите, което прави използването им скъпо от гледна точка на необходим изчислителен ресурс. По време на изграждането на картата, идентифицираните маркери трябва да могат да се свържат с маркерите съхранявани в локалната картата. Освен ако не се осъществява предварителен избор, изчислителните разходи в процеса на асоцииране се увеличава с нарастването на размера на картата. Обикновено тези маркери се идентифицират чрез изображения получени от бордова камера, но екстракцията им е възможна от данни получени от лазер, сонар или радар. Пример за маркери в закрыта среда най-често са врати, плакати и ъглите на стените. В открити среди ситуацията става още по-трудна, защото типизираните маркери са по-трудни за идентифициране и са обект на промени на естествената околна среда.

#### *Топологични и смесени (топологични и метрични) карти*

Топологичните карти представляват графично представяне на работната среда [130], [137], [146], [147], [97]. Чрез тях се изобразяват геометричните съотношения между наблюдаваните обекти в средата. За представянето им се използват графи, в които върховете са обектите, а ребрата на графа определят свързаността между отделните обекти. *Thrun* и *Bücken* [146], специфицират основните предимства и недостатъци на топологичните карти. Според авторите, предимствата при използването им са: *позволяват ефективно планиране на пътя, поради малката сложност на представянето на средата (разделителната способност на картата зависи от сложността на сцената); не изискват точно определяне позицията на работа в средата; удобни са за използване при символно представяне на средата на родният език на оператора.* Недостатъците посочени от авторите от друга страна са: *трудни са за построяване и обновяване при картографиране на големи площи; разпознаването на места, на базата на характерни белези може да е нееднозначно в зависимост от*

гледната точка; могат да не посочат оптимален път за достигане до целевата дестинация.

В [148], [146], [147], са представени решения с интегриране на метрични и топологични карти при изследване на закрити среди. Целта на подобно съчетаване е да се използва точността на метричните карти и компактността на топологичните карти при изследване на големи среди. В [146], авторите използват вероятностен подход в комбинация от невронна мрежа за построяването на решетъчна карта, служеща за последващо генериране на топологична карта. За целта, имплементираният алгоритъм избира неизследвана клетка от мрежата по два критерия: 1-во клетката да е възможно най-близка до клетката в която се е намирал робота и 2-ро тази клетка да има възможно най-малък тегловен коефициент. *Thrun* и *Bücken* наричат този начин на създаване на карта *greedy exploration*. Преминаването от решетъчна към топологична карта се осъществява в пет стъпки. Първата стъпка е да се отделят тези клетки от мрежата, чийто тегловен индекс е по-малък от един предварително зададен от авторите праг и да се обозначат, като свободни за преминаване. Втората стъпка е построяване на диаграма на *Voronoi* обхващаща свободните клетки, които имат най-малко две съседни и равноотстоящи клетки с тегловен индекс над праговият наречени базови точки. При третата стъпка се отделят критичните точки (*critical points*). Авторите дефинират като критични, тези точки, които са част от *Voronoi* диаграмата и разстоянието до всички съседни точки не е по-малко от индекса на критичната точка. В четвъртата стъпка всяка критична точка се свързва с базовите си точки, а получените критични линии – *critical lines* разделят свободното пространство на непресичащи се региони. В петата стъпка, разделената на региони карта се преобразува в изоморфен граф на който, всеки регион съответства на връх в топологичният граф, а ребрата на графа се задават от критичните линии получени от предходната стъпка.

В [147], *Thrun et al.* предлагат статистически подход за интегриране на топологични с метрични карти, като за разлика от предходният алгоритъм [146], тук първо се създава топологична карта, която в последствие се преобразува в метрична. За получаване на информация за средата авторите използват лазерен скенер, а първичните данни от сензора се подлагат на статистическа оценка даваща най-голямата вероятност за създаване на правдоподобна карта на средата. Плюсовете на работата са в използването на единствен статистически подход при оценка на получените топологична и метрична карти.

## **АНАЛИЗ НА АЛГОРИТМИ ЗА СЕГМЕНТАЦИЯ БАЗИРАНИ НА СЕНЗОРИ ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА РАЗСТОЯНИЕ**

Процесът на извличане на геометрична информация от потока данни, получени от 2D лазерен скенер е известен като сегментация. В зависимост от начина по който се обработва информацията за сегментите, в литературата се дискутират два основни метода: *последователен (successive process)* и *обобщен (total process)* [149]. При първият метод, сканираните точки се обработват последователно и една по една. За разлика от него, обработката на данните при вторият метод се извършва след получаването на всички точки от едно сканиране. Предимството, което последователните алгоритми дават, се състои в тяхното бързодействие, т.е. процесът по сегментация може да започне дори и при непълнен набор от данни. Предимството на обобщените алгоритми е в по качествената и надеждна сегментация, тъй като в процеса на сегментиране разполагат с

всички данни за съответното сканиране. В зависимост от начина на сегментация са разработени алгоритми имплементиращи различни техники за откриване и обхождане на граничните контури в едно цифрово изображение наречени *Edge Following algorithms* и алгоритми за откриване и напасване на линии наречени - *Line Fitting algorithms*. Оценка на различни видове алгоритми за извличане и напасване на линейни примитиви могат да се видят в [150], [151], [145], [149].

Създаването на точна карта на средата е сложна задача, особено ако картата трябва да служи за безпрепятствено водене на мобилен робот. *Gutmann* и *Schlegel* [150] изследват три алгоритъма за съвпадение от сканирани данни включващи: съвпадение чрез задаване на точки от линеен сегмент; съвпадение чрез използване на крос (кръстосана)-корелационна функция и съответствие от точка до точка. Изборът на авторите за първият тип алгоритъм се базира на идеята на *Cox* [140] (вж. по нататък) за намиране на съвпадение на точки от текущото сканиране с точки от предходното сканиране. Авторите модифицират алгоритъма, като вместо да търсят съвпадащи точки, те сегментират текущият скен, а извлечените линейни участъци използват като, априорен модел на сцената. Отделните стъпки на алгоритъма включват: линейна филтрация на сканираните точки, които не попадат в даден линеен сегмент; премахване на точки отдалечени на разстояние по-голямо от предварително дефинирано такова и сортиране на сегментите според тяхната дължина. Вторият използван алгоритъм от авторите, заменя две последователни сканирания с техните хистограми, а съответствието се търси като, се намери максимума на крос-корелационната функция. Характерното за корелацията е, че е приложима само за сцени от тип полигон. За да решат проблема свързан с „неперпендикулярните“ сцени, авторите модифицират оригиналният алгоритъм от [152] в следните четири стъпки: сегментиране на текущият скен и изчисляване ъгъла между текущият и референтният скен заедно с грешката за получаване на ъглова хистограма. Сканирането се повтаря, като лазера се ориентира в друго избрано за основно направление и ъгловата хистограма се допълва с измерените ъгли по новото направление. Във втора и трета стъпка, ъгловата хистограма се ориентира, така че, направлението на хистограмата да лежат последователно на оста X, което подsigурява, че по оста Y хистограмата ще има винаги най-високите пикове и се изчислява грешката за всеки един компонент получен от стойностите след нормализиране на крос-корелационна функция. В четвъртата стъпка се преобразуват резултатите от стъпки две и три и се определя мястото на всички компоненти в крайният резултат. Третият алгоритъм, изследван от авторите цели откриването на съвпадение от точка до точка. Алгоритъма по който работят авторите за първи път е предложен в [153] и е известен още като, *повтарящо се двойно съответствие - Iterative Dual Correspondence (IDC)* алгоритъм. Най-голямото предимство на алгоритъмът е, че може да се използва за откриване на съответствие между два скен-а, които не съдържат геометрични примитиви.

Предложеният от *Gutmann* и *Schlegel* алгоритъм наречен *combined scan matcher* съчетава функционалността на *IDC* и бързодействието на разширеният от авторите, алгоритъм на *Cox* [140]. Действието на алгоритъма се основава на филтрация на данните от две последователни сканирания чрез проекционен филтър, след който остават само общите точки и за двата скен-а. В зависимост от броя на сканираните точки за един линеен сегмент се използва или модифицираният алгоритъм на *Cox* (при голям брой точки) или *IDC* при малък брой.

В [151] *Nguyen et. al.* правят експериментална оценка на шест популярни алгоритъма използвани в мобилната роботика и компютърно зрение подходящи за сегментиране на данни получени от 2D лазерни далекомири. Основните критерии по които авторите оценяват алгоритмите са бързодействие, сложност, коректност на данните и прецизност. Сравнението на алгоритмите е извършено чрез статистическия математичен апарат, а за оценка са подбрани алгоритми подходящи за мобилни роботи опериращи в закрити среди. От анализиранияте алгоритми: *Split and Merge* – разделяне и обединяване; *Line Regression* – линейна регресия; *Incremental* известен още като (*Line Tracking*) Algorithm – алгоритъм за проследяване на линия; *RANdOm SAmple Consensus* (RANSAC) – итеративен алгоритъм за намиране на функционална (линейна) зависимост от възможно най-малко случайно подбрани данни [154]; *Hough Transformation* (HT) – Хаф трансформация и *Expectation-Maximization* (EM) – алгоритъм за търсене на максимално правдоподобие [155], най-добри резултати от гледна точка на бързодействие и коректност на данните са показали алгоритмите *Split and Merge* и *Incremental (Line Tracking)*. За приложения работещи в реално време, авторите препоръчват *Split and Merge* алгоритъма заради „превъзхождащата“ го скорост в сравнение с другите. *Line Tracking* алгоритъмът е подходящ при приложения за едновременна локализация и картографиране (*Simultaneous Localization And Mapping*) заради много малкият брой неверни позитиви. RANSAC, HT и EM алгоритмите са относително по-прецизни в процеса на сегментация, но това е за сметка на скоростта и коректността на изображението.

Подобно на *Nguyen et. al.* [151], *Sack* и *Burgard* [145], изследват функционалността на *Line Tracking (LT)*, *Hough Transform* и вариант на EM алгоритъма за сегментиране на данни получени от лазерен скенер. Критериите, по които авторите оценяват алгоритмите са: *необходим изчислителен ресурс; брой на извлечените линейни сегменти; способността за апроксимиране на малки равнинни или нелинейни обекти и устойчивостта на алгоритмите срещу лъжливи измервания.* На базата на проведените експерименти, авторите установяват, че от гледна точка на производителност *LT* алгоритъмът превъзхожда останалите. Авторите установяват също, че *EM* алгоритъмът не може да се справи със сегментацията при голям обем от данни, но е подходящ при наличие на динамични обекти в сцената и дава най-добри резултати при сканиране на обекти с кръгов и нелинеен профил. При наличие на големи линейни обекти и трите алгоритъма имат близка функционалност, но основната разлика в работата на алгоритмите, авторите са установили при апроксимирането на малки структури в големи помещения (карти), с които *EM* алгоритъмът не е могъл да се справи.

*Siadat et. al* [149], експериментират с три алгоритъма за сегментиране на данни получени от 2D лазерен скенер. Анализирани са *Successive Edge Following (SEF)*, *Line Tracking (LT)* и *Iterative End Point Fit (IEPF)* алгоритмите. Най-добри резултати от гледна точка на представяне на средата е показал *IEPF* алгоритъмът, който обаче не е подходящ за воденето и определянето позицията на робота в реално време заради малкото си бързодействие. Другите два алгоритъма според авторите, са достатъчно бързи за работа в реално време, но това е за сметка на лошата сегментация, както и необходимостта от промяна на критерия за максимално отклонение при промяна на средата

В една от ранните разработки [140], *Sox* представя система служеща за локализацията на мобилен робот чрез напасване на локална решетъчна карта към глобална сегментна карта. За да може да се установи положението на робота е необходимо да са налице предварително построена карта на средата, състояща се от дискретни линейни сегменти,

сензори за измерване на изминатото разстояние и оптичен далекомер. Напасването на сензорните данни към картата става посредством алгоритъм използващ одометричните данни за приблизително определяне позицията на робота. Действието на алгоритъма е следното: на базата на получените данни се изчислява разстоянието от всяка регистрирана точка в средата до най-близкият линейен сегмент от модела на средата. За целта се намира съответствието, което минимизира квадратите на разстоянията между регистрираните точки и съответните линейни сегменти, след което се извършва преместване на тези точки съгласно намереното съответствие, като цялата процедура се повтаря докато се постигне пълно съвпадение на точките с линейните сегменти.

В [139], *Veeck* и *Burgard* предлагат алгоритъм за създаване на карти посредством полилинии (крива от последователно свързани линейни или дъгообразни сегменти), получени чрез сегментация на данни от лазерен скенер. Предложеният алгоритъм работи директно с първичните данни, като алгоритъма условно е разделен на три стъпки, включващи: генериране на контур на сканираната сцена посредством полилиния; оптимизация на контура чрез оператори за разделяне, обединяване и корекция на последователностите от прави при едновременно използване на информацията за относителните ъгли между тях с цел напасване към съществуващите данни и изчисляване на полученият модел чрез прилагане информационният критерий на Бейс (*Bayesian Information Criterion*) за определяне на грешката от апроксимиране, броят на върховете в картата, както и размера на масива от данни. Проблема който решават авторите с предложеният алгоритъм е компресирането на входните данни с няколко порядъка, без това да се отразява върху точността и коректността на създаваната карта и едновременно с това се намаляват изискванията към обема памет необходима за съхранение на картата. Основните недостатъци на предложеният алгоритъм са, че алгоритъмът не може да се използва за работа в реално време, т.е. всички изчисления се извършват с предварително записани данни и изискванията към изчислителните ресурси го правят почти невъзможен за имплементиране на бордов компютър.

В своята работа [156], *Gutmann et.al.* предлагат нов метод за намиране на съвпадение на извлечени отличителни белези от първичните данни получени чрез лазерно сканиране със вече известен модел на сцената. Предназначението на алгоритъма *LineMatch* е за локализация на работи в многоъгълни сцени, като за целта, авторите комбинират след процеса на сегментация извлечените прави линии с одометрични измервания посредством филтър на Калман. Разработеният алгоритъм връща хипотези за позицията на робота, като рекурсивно съпоставя всички сканираните линии, към тези на модела. За да се определи коя от хипотезите, отговаря на действителната позиция, данните се обработват с филтър на Калман с данните за изминатото от робота разстояние. Едно от основните предимства на използваният метод се състои в неговата бързина. Скоростта на изчисление на позицията  $O$  зависи от абсолютната стойност на произведението на квадрата на рекурсивните стъпки  $S$  и куба на съвпадателните линии  $M$   $\{O(|M|^3|S|^2)\}$ . Недостатъците на метода са, че е с ограничено приложение при големи площи.

*Baltzakis* и *Trahanias* [144], използват процедура имплементираща EM – алгоритъмът и работеща с линейни сегменти и ъглови точки за създаване на карта на работната среда, с приложение за непрекъсната локализация на робота. Предложената от авторите процедура за извличане на характеристики е разделена на три етапа, като първоначално измерените дискретни разстояния от лазерният скенер се групират в клъстери от свързани точки в съответствие с графа на влиянието на всяка точка (*SIG - Sphere of Influence Graph*) предложен през 1980год. от *Godfried T. Toussaint* [157]. След това

кълстерите допълнително се сегментират за да се определят точките принадлежащи към даден линеен сегмент чрез използване на *IEPF* алгоритъма, рекурсивно обособяващ набори от точки отговарящи на предварително зададен критерий за разстояние. След групирането на колинеарните точки, чрез рекурсивен филтър на Калман се минимизира квадратичната грешка на радиалното разстояние спрямо позицията на сканиращото устройство (робота). Предложеният алгоритъм е подходящ за роботи, които циклично обхождат работната сцена. Основният недостатък на алгоритъма е, че в процеса на първоначално картографиране на непознатата среда, акумулираната грешка може да стане много голяма и алгоритъма грижещ се за идентификация на характеристиките на средата и робота да не може да ги разпознае и да се опита отново да ги въведе в базата си данни.

*Arras* и *Siegwart* [143] използват йерархичен групиращ алгоритъм за добавяне на линейни сегменти получени от измерванията с 1D лазерен далекомер и непренадлежащи към вече апроксимираните такива. За извличане характеристиките на околната среда, техният алгоритъм се основава на линейна регресия. Авторите са провели експерименти с три комерсиални лазерни скенера, като получените от тях резултати показват пригодността на разработеният алгоритъм за работа в реално време.

*Pfister et. al.* [158], представят алгоритъм за намиране на най-добро съвпадение на линейни сегменти към набори от данни получени чрез 2D лазерен скенер при различни позиции на сканиращият сензор. Използваният от авторите алгоритъм има следната последователност: 1<sup>во</sup> данните за измерените разстояние от лазерният скенер се сортират на подгрупи от приблизително колинеарни точки посредством Хаф трансформация; 2<sup>ро</sup> дефинира се „кандидат“ линия зададена чрез полярни координати и апроксимираща набора от точки; 3<sup>то</sup> намира се минималната грешка за дадена точка от апроксимираният сегмент, чрез минимизиране отместването на линията кандидат. Подходът използва статистическо представяне на линиите, като отчита грешките от напасване на необработените данни (точки). Двата линейни сегмента съвпадат, ако статистически удовлетворяват теста „хи-квадрат“ на Пийърсън (*Pearson's chi-squared test*) [159]. В този случай напасваните линейни сегменти се заменят с трети сегмент, чрез използване на вероятностен подход за максимално подобие.

В [160], *Pears* представя решение на проблема свързан, с едновременното извличане и проследяване на начупена линия, определяща заобикалящата среда на движещ се мобилен робот, използващ 1D лазерен скенер за възприемане на средата. За целта, автора използва разширен вариант на филтъра на Калман (*EKF - Extended Kalman Filter*) за извличане характеристиките на средата от данните получени далекомера работещ на принципа на оптична триангулация, описан в [161]. Авторът залага на използването на *EKF*, защото чрез него се постига ефективно моделиране на нелинейни системи с линейни уравнения и възможност за оценяване на динамични процеси, каквито чрез стандартният метод на най-малките квадрати не могат да се оценят. Използваният алгоритъм е разделен на пет основни стъпки (прогнозиране на състоянието; ковариация на предсказаното състояние; предсказване на наблюдението; валидация на наблюдението и обновяване на състоянието и ковариацията). Имплементирайки тези пет стъпки, действието на алгоритъма се свежда до извличане и проследяване на полярно зададени линейни сегменти от зашумени, последователни измервания на разстоянието до обектите в сцената, при допускане, че движението на робота е неопределено, а ориентацията на диапазона на измерване по отношение на корпуса на робота е детерминирана т.е. без наличието на шум.

В [162], *Jensfelt* и *Christensen* представят техника за определяне и проследяване положението на мобилен робот базирано на извличане на ортогонални линии (стени) в офис среда чрез лазерен скенер. За целта, авторите използват като база, позицията и положението на стените и чрез филтрация се отделят параметрите им от потока данни. Детерминирането на параметрите става чрез използването на модифициран вариант на Хаф трансформация наречена *Range Weighted Hough Transform (RWHT)* представена за първи път от *Forsberg, Larsson* и *Wernersson* [163], при която, сканираните точки, отдалечени на по-голямо разстояние от сензора се обозначават с по-голям индекс (тегловен коефициент) и в процеса на прогнозиране, участват само тези точки, чиито тегла са със стойност нула или близки до нула. След филтрирането на параметрите, апроксимирането на стените се извършва по метода на най-малките квадрати. Проследяването на положението на робота се извършва чрез съвместяване на одомерични данни и данните от лазерният скенер след съответната им обработка.

В [164] *Narati* и *Siegwart* представят нов подход за сегментиране на данни от 2D лазерен скенер чрез метод, наречен от авторите “*Running Angle*”. Алгоритъмът се базира на трансформацията на дискретни *wavelets* – вълнови пакети, опростяващи представянето на полигони от първоначално сканираните данни. За целта, разработеният алгоритъм, отделя едно подмножество от първоначално сканираните точки и ги определя като върхове, а останалите точки се отхвърлят. За осъществяване на сегментацията, авторите въвеждат две мерки, дефиниращи посоката на измерванията, наречени: *Bearing Angle (BA)* (носец ъгъл) и *Running Angle (RA)* (ъгъл на преместване). *BA* е ъгълът, който се получава между сканиращият лъч и линията свързваща две съседни точки, а *RA* е ъгълът, определящ ориентацията на линията преминаваща през две съседни точки спрямо координатната система на лазерният скенер, т.е. към *BA* се добавя и ъгъла на лазерният лъч за съответната дискретна ъглова стъпка от сканирането. Определянето дали дадена точка принадлежи към линейен сегмент става чрез изчисляване на  $RA_i$  за  $i$ -тата добавена точка. В случай, че  $RA_{i-1}$  и  $RA_i$  имат еднакви стойности, то тази точка  $i$  принадлежи и допълва линейният сегмент.

*Crowley* [165] предлага метод за построяване карта на работната среда на мобилен робот с определяне позицията и ориентацията на робота в средата, базирани на напасването на локална карта, съставена от линейни сегменти на базата на информация, получена посредством ултразвуков далекомер, към глобална такава. За целта е разработен модел на неопределеността, присъща на данните от сонарите, а също така и метод за проектиране на измерванията от сонара върху външна координатна система. Разработен е метод за извличане на линейни сегменти от съседни колинеарни измервания от сонара, и алгоритъм за напасване на тези линейни сегменти към “модел на геометричните граници на свободното пространство около робота”. При това напасване, се извършва също корекция в оценката на позицията и ориентацията на робота в средата.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Съществуващото голямо разнообразие на изследователски мобилни роботи е в пряка връзка със спецификата на изпълняваните задачи, работната среда и не на последно място хода на локомоционните им системи, като тенденцията при последните е да се развиват в направление осигуряващо висока мобилност чрез верижни и хибридни локомотори. Независимо, че стремежът при създаването на изследователски мобилни роботи е тяхната пълна автономност, ключови фактори за осигуряване надеждността при

изпълнението на целевите задачи е адекватната преценка на оператора водещ работа, интерфейса визуализиращ необходимата информация за средата и скоростта на обмен на данните между робот и оператор.

Най-често използваните сензори за измерване на разстояния до обектите в работната сцена са ултразвукови, инфрачервени и лазерни далекомери, като последните превъзхождат първите два по скорост и обем на информационните данни, точност и ъглова разделителна способност. 2D лазерните скенери придобиват все по голяма популярност и като техническо средство за извличане на триизмерна информация за средата.

Все още нерешени в своята пълнота остават и проблемите свързани с намирането на достатъчно ефективни алгоритми за обработване на първичната сензорна информация при намалени изисквания към изчислителните ресурси. Проблемите свързани с навигацията на роботите и картографирането на работната среда са довели до разработването на множество стратегии, целящи максимално и ефективно използване на бордовите изчислителни ресурси на роботите. Тук ясно могат да се разграничат техники и алгоритми, позволяващи обработката на нужната информация в реално време, но не осигуряващи достатъчно детайлна информация и такива с голяма степен на информативност, но за сметка на бързодействието им.

Чрез съвместяване функциите на локомотор и манипулатор, се постига висока конструктивна ефективност на роботите, позволяваща да се разширят общите локомоционни и манипулационни възможности при малък брой задвижвания и съответно облекчено хранене, комуникация, дистанционно водене.

## REFERENCES

- [1] R. Bertrand, J. Brueckner, M. van Winnendael, and M. Novara, "NANOKHOD—A Micro-Rover to explore the Surface of Mercury," *6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Montreal, Canada*, pp. 2-4, 2001. [Online]. <http://robotics.estec.esa.int/i-SAIRAS/isairas2001/papers/Paper\EU015.pdf>
- [2] T. Estier et al., "An Innovative Space Rover with Extended Climbing Abilities," *Robotics 2000*, pp. 333-339, 2000. [Online]. [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40476\(299\)44](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40476(299)44)
- [3] Klaus Landzettel et al., A micro-rover navigation and control system for autonomous planetary exploration, 2004.
- [4] L Pedersen, D Kortenkamp, D Wettergreen, and I Nourbakhsh, "A Survey of Space Robotics," in *7th International Symposium on Artificial Intelligent, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS-03*, 2003, p. 8 pp. [Online]. <http://www-2.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/Web/People/illah/PAPERS/ISAIRAS03.pdf>
- [5] Aravind Seeni, Bernd Schödl, and Gerd Hirzinger, "Robot Mobility Systems for Planetary Surface Exploration – State-of-the-Art and Future Outlook : A Literature Survey," *Aerospace Technologies Advancements*, no. January, pp. 189-208, 2010.
- [6] Fabrice L E Bars and Jan Sliwka, "Autonomous submarine robotic system," *Cybernetics Letters - Informatics, Cybernetics and Robotics*, no. 2010, pp. 1-12, 2010.
- [7] Tadahiro Hyakudome, "Design of autonomous underwater vehicle," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 131-139, 2011. [Online]. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1193268>
- [8] J. Yuh, "Design and control of autonomous underwater robots: A survey," *Autonomous Robots*, vol. 8, pp. 7-24, 2000.

- [9] Rui Nian, Bo He, Jia Yu, Zhenmin Bao, and Yangfan Wang, "ROV-based underwater vision system for intelligent fish ethology research," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, pp. 1-9, 2013.
- [10] A.K.M. Azad et al., "ROBOVOLC : Remote Inspection for Volcanoes," *International NAISO Congress on Information Science Innovations (ISI'2001)*, 2001.
- [11] J. E. Bares, Dante II: Technical Description, Results, and Lessons Learned, 1999.
- [12] Daniele Caltabiano and Giovanni Muscato, "A robotic system for volcano exploration," in *Cutting Edge Robotics*, V Kordic, A Lazineca, and M Merdan, Eds.: InTech, 2005, pp. 499-519. [Online]. [http://www.intechopen.com/source/pdfs/30/InTech-A\\_robotic\\_system\\_for\\_volcano\\_exploration.pdf](http://www.intechopen.com/source/pdfs/30/InTech-A_robotic_system_for_volcano_exploration.pdf)
- [13] Trupti B Bhondve, Prof R Satyanarayan, and Prof Moresh Mukhedkar, "Mobile Rescue Robot for Human Body Detection in Rescue Operation of Disaster," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 3, no. 6, pp. 9876-9882, 2014.
- [14] P. Jayaseelan, A. Saminathan, and M. Sathish, "Multi Special Robot Systems for Detection and Rectification of Rescue Units," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 1087-1092, 2014.
- [15] Rajeev Joshi, Pratap Chandra Poudel, and Pankaj Bhandari, "An Embedded Autonomous Robotic System for Alive Human Body Detection and Rescue Operation," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 4, no. 5, pp. 1-4, 2014.
- [16] Mohammed Waleed Kadous, Raymond Ka-Man Sheh, and Claude Sammut, "Caster: A robot for urban search and rescue," *Australasian Conference on Robotics and Automation*, pp. 1-10, 2005.
- [17] Swathi Priya, "Rescue Robot-A Study," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 158-161, 2014.
- [18] Lili Ma et al., "WIRELESS VISUAL SERVOING FOR ODIS – AN UNDER CAR INSPECTION MOBILE ROBOT," in *2002 IFAC 15th Triennial World Congress*, Barcelona, Spain, 2002.
- [19] Keiji Nagatani et al., "Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots," *Journal of Field Robotics*, vol. 30, pp. 44-63, 2013.
- [20] Young S. Kwon, Eui Jung Jung, Hoon Lim, and Byung J. Yi, "Design of a reconfigurable indoor pipeline inspection robot," in *ICCAS 2007 - International Conference on Control, Automation and Systems*, 2007, pp. 712-716.
- [21] Nur Afifah Binti Haji Yahya, Negin Ashrafi, and Ali Hussein Humod, "Development and Adaptability of In - Pipe Inspection Robots," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, vol. 11, no. 4, pp. 1-8, 2014.
- [22] Francesco Mazzini, Daniel Kettler, Julio Guerrero, and Steven Dubowsky, "Tactile robotic mapping of unknown surfaces, with application to oil wells," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, pp. 420-429, 2011.
- [23] D. Hahnel et al., "A system for volumetric robotic mapping of Underground Mines," in *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, vol. 3, 2003, pp. 1-7.
- [24] Jacoby Larson, Brian Okorn, Tracy Pastore, David Hooper, and Jim Edwards, "Counter tunnel exploration, mapping, and localization with an unmanned ground vehicle," in *SPIE 9084 Unmanned Systems Technology XVI*, vol. 9084, 2014, p. 12. [Online]. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2054340>
- [25] Atanu Maity and Somajyoti Majumder, "Design of an Amphibian Exploring Robot," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2014*, vol. 65, no. 1, pp. 1-8, 2014.

- [26] RBR, *Robotics in Oil , Gas \& Mining : Robotics in Oil , Gas \& Mining New Machines Pioneering a New Era of Resources*, 2014.
- [27] M. A. Subhan and A. S. Bhide, "Study of Unmanned Vehicle ( Robot ) for Coal Mines," *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)*, vol. 1, no. 10, pp. 116-120, 2014.
- [28] Sebastian Thrun et al., "Autonomous exploration and mapping of abandoned mines: Software architecture of an autonomous robotic system," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 11, no. 4, pp. 79-91, 2004.
- [29] F Georgsson, T Hellstr\", T Johansson, and K Prorok, "Development of an autonomous path tracking forest machine - a status report -," Tech. rep. ISSN: 0348-0542, 2005. [Online]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.121.6803\&rep=rep1\&type=pdf>
- [30] Matti Ohman et al., "Tree measurement and simultaneous localization and mapping system for forest harvesters," in *Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol. 42, 2008, pp. 369-378.
- [31] Bradley J Nelson, "Microrobotics in Medicine," ETH Zurich Institute of Robotics and Intelligent Systems, Tech. rep. 2006.
- [32] Bradley J Nelson, Ioannis K Kaliakatsos, and Jake J Abbott, "Microrobots for minimally invasive medicine.," *Annual review of biomedical engineering*, vol. 12, no. April, pp. 55-85, 2010.
- [33] M. Sunitha Reddy, S. Arunajyothi, M. Sravanthi, and S. Phanita, "Review on microrobot," *International Journal of Research in Pharmaceutical Sciences*, vol. 2, no. 3, pp. 409-416, 2011.
- [34] Michael Baker, Robert Casey, Brenden Keyes, and Holly a. Yanco, "Improved interfaces for human-robot interaction in urban search and rescue," in *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3, 2004, pp. 2960-2965.
- [35] M. Waleed Kadous, Raymond Ka-Man Sheh, and Claude Sammut, "Effective user interface design for rescue robotics," in *Proceeding of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction - HRI '06*, 2006, pp. 250-257. [Online]. <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1121241.1121285>
- [36] Curtis W. Nielsen, Michael a. Goodrich, and Robert W. Ricks, "Ecological interfaces for improving mobile robot teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 5, pp. 927-941, 2007.
- [37] B. Ricks, C.W. Nielsen, and M.a. Goodrich, "Ecological displays for robot interaction: a new perspective," *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*, vol. 3, pp. 2855-2860, 2004.
- [38] Mihaela M. Oprea, "Rule-based adaptive navigation for an intelligent educational mobile robot," *IFIP International Federation for Information Processing*, vol. 204, pp. 35-43, 2006.
- [39] Daniel Rojas et al., "Algorithms for Maps Construction and Localization in a Mobile Robot," *Studies in Informatics and Control*, vol. 23, no. 2, pp. 189-196, 2014.
- [40] Теодора Огнянова Митева, "Алгоритми за групово управление на работи при въздействие на различни комуникационни връзки," БАН Институт по Информационни и Комуникационни технологии, Ph.D. dissertation 2012.
- [41] Michael a. Goodrich and Alan C. Schultz, "Human-Robot Interaction: A Survey," *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, vol. 1, no. 3, pp. 203-275, 2007.
- [42] Jean Scholtz, "Theory and evaluation of human robot interactions," in *36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2003. Proceedings of the*, 2003.
- [43] Holly A. Yanco et al., "Improving human-robot interaction for remote robot operation," in *AAAI'05 Proceedings of the 20th national conference on Artificial intelligence*, vol. 4, 2005, pp. 1743-1744.

- [44] Computing, Georgia Tech College; Institute, Georgia Tech Research, "Real-time Cooperative Behavior for Tactical Mobile Robot Teams Skills Impact Study for Tactical Mobile Robot Operational Units," Georgia Institute of Technology, Tech. rep. 2000.
- [45] Georgios a Demetriou, "Mobile Robotics in Education and Research," in *Mobile Robots- Current Trends.*, 2011, pp. 27-48. [Online]. <http://www.intechopen.com/books/mobile-robots-current-trends/mobile-robotics-in-education-and-research>
- [46] Martin Mellado, Carlos Correcher, Rosa M De Molina, Jose Camacho, and Benet Gines, Simulation of mobile robot applications with VirtualRobot, 2005.
- [47] Klaus Schilling, Hubert Roth, and Otto J R", "Mobile Mini-Robots for Engineering Education \*," *Global journal of Engineering Education*, vol. 6, no. 1, pp. 79-84, 2002.
- [48] Adriano Cavalcanti, Bijan Shirinzadeh, Declan Murphy, and Julian a. Smith, "Nanorobots for laparoscopic cancer surgery," in *Proceedings - 6th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science, ICIS 2007; 1st IEEE/ACIS International Workshop on e-Activity, IWEA 2007*, 2007, pp. 738-743.
- [49] Adriano Cavalcanti, Bijan Shirinzadeh, Mingjun Zhang, and Luiz C. Kretly, "Nanorobot hardware architecture for medical defense," *Sensors*, vol. 8, pp. 2932-2958, 2008.
- [50] Benjamin Chui and Lea Kissner, "Nanorobots for Mars EVA Repair," in *International Conference On Environmental Systems*, 2000, p. 14 pp.
- [51] Владимир Заманов, *Мобилни роботи. Локомоционни системи*, 1st ed. София: Технически университет - София, 2012.
- [52] Markus Hehn and Raffaello D Andrea, "Quadcopter Trajectory Generation and Control," in *IFAC World Congress*, vol. 18, 2011, pp. 1485-1491. [Online]. <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/ifac11-proceedings/data/html/papers/3178.pdf>
- [53] Festo, "SmartBird," Tech. rep. 2011. [Online]. [http://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/46270/Brosch\\_SmartBird\\_en\\_8s\\_RZ\\_300311\\_lo.pdf](http://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/46270/Brosch_SmartBird_en_8s_RZ_300311_lo.pdf)
- [54] G Bekey et al., "International Assessment of Research and Development in Robotics," Tech. rep. 2007. [Online]. <http://ntis.library.gatech.edu/handle/123456789/6594>
- [55] Camp Peavy and Tim Craig, "The Day Robots Took Over the Park," Tech. rep. 2007. [Online]. <http://www.camppeavy.com/articles/park.pdf>
- [56] Masaaki Kumagai, "Development of a Robot Balanced on a Ball – First Report, Implementation of the Robot and Basic Control –," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 22, no. 3, pp. 348-349, 2010. [Online]. <http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=ROBOT002200030013.xml>
- [57] Hoa G. Nguyen et al., "Segway robotic mobility platform," *Proceedings of SPIE*, vol. 5609, no. February 2002, pp. 207-220, 2004. [Online]. <https://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.571750>
- [58] Владимир Заманов, А. Николов, and М. Гаврилов, "ОМНИМОБИЛНА ПЛАТФОРМА С БЕЗЖИЧНО УПРАВЛЕНИЕ," in *International Conference RAM 2012*, 2012, pp. r16--r19.
- [59] Boston Dynamics, LittleDog User Manual, 2006.
- [60] Marc Raibert, Kevin Blankespoor, Gabriel Nelson, and Rob Playter, "BigDog , the Rough-Terrain Quaduped Robot," *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, vol. 17, no. 1, pp. 1-5, 2008.
- [61] S. Hirose and E.F. Fukushima, "Snakes and strings: new robotic components for rescue operations," *Proceedings of the 41st SICE Annual Conference. SICE 2002.*, vol. 1, pp. 2-12, 2002.

- [62] Aksel Andreas Transeth and Kristin Ytterstad Pettersen, "Developments in snake robot modeling and locomotion," in *9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2006, ICARCV '06*, 2006, p. 8.
- [63] Paul J. Lewis et al., "Chaos an Intelligent Ultra-Mobile SUGV: Combining the Mobility of Wheels, Tracks, and Legs," in *SPIE 5804, Unmanned Ground Vehicle Technology VII*, 427, 2005. [Online]. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=864283>
- [64] F. Michaud et al., "AZIMUT, a leg-track-wheel robot," *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453)*, vol. 3, 2003.
- [65] I. Vincent and M. Trentini, "Shape-shifting Tracked Robotic Vehicle for complex terrain navigation. Characteristics and architecture," Defence R\&D Canada, Tech. rep. 2007.
- [66] Francois Michaud et al., "AZIMUT, a Multi-Modal Locomotion Robotic Platform," in *SPIE 5083, Unmanned Ground Vehicle Technology V*, 101, 2003, p. 12.
- [67] Tetsuya Kinugasa et al., "Flexible Mono-tread Mobile Track (FMT) - A new Mobile Mechanism Using One Track and Vertebral Structure," in *Robotics 2010 Current and Future Challenges*, Houssem Abdellatif, Ed.: InTech, 2010, p. 21.
- [68] Hagen Schempf, "Less is More: AURORA - an example of minimalist design for tracked locomotion," in *International Symposium on Robotics Research (ISRR)*, 2001, p. 8.
- [69] PE Sandin, *Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated*. New York, 2003, vol. Walkers. [http://cache.ourdev.cn/bbs\upload489681/files\25\ourdev\531276.pdf\backslash\\$backslash\\$](http://cache.ourdev.cn/bbs\upload489681/files\25\ourdev\531276.pdf\backslash$backslash$)  
<http://www.btcjzx.com:82/tushu/book/book73/2009976099763.pdf>
- [70] Yoshito Okada, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, Tomoaki Yoshida, and Eiji Koyanagi, "Shared Autonomy System for Tracked Vehicles to Traverse Rough Terrain Based on Continuous Thre-Dimensional Terrain Scanning," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, 2010, pp. 357-362.
- [71] Brian M. Yamauchi, "PackBot: a versatile platform for military robotics," in *Defense and Security*, 2004, pp. 228-237. [Online]. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=844149>
- [72] Andreas Birk, Kausthub Pathak, and Soeren Schwertfeger, "The IUB Rugbot: an intelligent, rugged mobile robot for search and rescue operations," in *IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 2006, p. 6. [Online]. [http://robotics.iu-bremen.de/publications/SSRR2006\\_Rugbot.pdf](http://robotics.iu-bremen.de/publications/SSRR2006_Rugbot.pdf)
- [73] Andrew A. Goldenberg and Pinhas Ben-Tzvi, "Mobile Robots for Hazardous Environments-- New Technology for Mobility," in *2nd Joint Emergency Preparedness and Response \& Robotics and Remote Systems Topical Meeting (12th Robotics and Remote Systems for Hazardous Environments/10th Emergency Preparedness and Response)*, 2008, pp. 1-8.
- [74] Andrew A. Goldenberg and Jun Lin, Variable Configuration Articulated Tracked Vehicle, 2009.
- [75] E. Mihankhah, A. Kalantari, E. Aboosaeedan, H. D. Taghirad, and S. Ali a Moosavian, "Autonomous staircase detection and stair climbing for a tracked mobile robot using fuzzy controller," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2008*, 2008, pp. 1980-1985.
- [76] Pinhas Ben-Tzvi, "Hybrid Mobile Robot System: Interchanging Locomotion and Manipulation," University of Toronto, Ph.D 2008.
- [77] Pinhas Ben-Tzvi, Andrew a. Goldenberg, and Jean W. Zu, "Design, simulations and optimization of a tracked mobile robot manipulator with hybrid locomotion and manipulation capabilities," *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2307-2312, 2008.

- [78] Michele Guarnieri, Inoh Takao, Edwardo F Fukushima, and Shigeo Hirose, "HELIOS VIII : Toward Practical Robots for Search and Rescue Operation," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 20, no. 5, pp. 675-694, 2008.
- [79] Ryuichi Hodoshima et al., "Telerobotic Control System to Enhance Rescue Operations for Arm-Equipped Tracked Vehicle HELIOS IX," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 26, no. 1, pp. 17-33, 2014.
- [80] Koji Ueda et al., "Development of HELIOS IX: An arm-equipped tracked vehicle," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 23, no. 6, pp. 1031-1040, 2011.
- [81] Владимир Заманов and Пенчо Венков, *Мобилни роботи. Сензори.*: Технически университет - София, 2014.
- [82] Mohsen Rahnavard et al., "RoboCupRescue 2006 - Robot League Team Ariana (Iran)," Tech. rep. 2006.
- [83] Luke Abbott et al., "RoboCupRescue 2006 - Robot League Team Good Samaritan Urban Search and Rescue Robot ( USA )," *Mechanical Engineering*, 2006.
- [84] Andreas Birk et al., "RoboCupRescue - Robot League Team IUB Rescue, Germani," Tech. rep. 2006.
- [85] Dr Robot Inc, All-Terrain Autonomous Navigation Robot with GPS-IMU Jaguar-4x4-Wheel User Guide, 2010.
- [86] Alexander Kleiner et al., "RoboCupRescue - Robot League Team Rescue Robots Freiburg," Tech. rep. 2006.
- [87] Stefan Kohlbrecher et al., "RoboCupRescue 2014 - Robot League Team Hector Darmstadt (Germany)," Tech. rep. 2014.
- [88] Adept MobileRobots, PeopleBot, 2011.
- [89] Adept MobileRobots, Seekur Jr, 2011.
- [90] Daniel Styrstrom and Mattias Holmqvist, "RoboCupRescue 2006 - Robot League Team RFC Uppsala (Sweden)," Tech. rep. 2006.
- [91] Seung Keun Cho, Hong Zhe Jin, Jang Myung Lee, and Bin Yao, "Teleoperation of a mobile robot using a force-reflection joystick with sensing mechanism of rotating magnetic field," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 15, pp. 17-26, 2010.
- [92] N. Diolaiti and C. Melchiorri, "Tele-operation of a mobile robot through haptic feedback," *IEEE International Workshop HAVE Haptic Virtual Environments and Their*, no. November, pp. 17-18, 2002.
- [93] Ildar Farkhatdinov, Jee Hwan Ryu, and Jury Poduraev, "A user study of command strategies for mobile robot teleoperation," *Intelligent Service Robotics*, vol. 2, pp. 95-104, 2009.
- [94] Terrence Fong, Charles Thorpe, and Charles Baur, "Advanced interfaces for vehicle teleoperation: Collaborative control, sensor fusion displays, and remote driving tools," *Autonomous Robots*, vol. 11, pp. 77-85, 2001.
- [95] Daniel Pamungkas and Koren Ward, "Electro-Tactile Feedback for Tele-operation of a Mobile Robot," in *Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation*, Sydney, 2013, p. 7.
- [96] Dzmity Tsetserukou, Junichi Sugiyama, and Jun Miura, "Belt tactile interface for communication with mobile robot allowing intelligent obstacle detection," in *2011 IEEE World Haptics Conference, WHC 2011*, 2011, pp. 113-118.
- [97] Светослав Атанасов Нойков, "Апаратни и програмни средства за обработка на сензорна информация при изследване на среда чрез клас мобилни роботи," БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ, Ph.D. dissertation 2003.

- [98] Laurent Kneip, Fabien T<sup>^</sup>, Gilles Caprari, and Roland Siegwart, "Characterization of the compact Hokuyo URG-04LX 2D laser range Scanner," *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1447-1454, 2009.
- [99] Yoichi Okubo, Cang Ye, and Johann Borenstein, "Characterization of the Hokuyo URG-04LX laser rangefinder for mobile robot obstacle negotiation," *Proceedings of SPIE*, vol. 7332, pp. 733212:1--733212:10, 2009. [Online]. [://WOS:000292646300026](http://www.wos.org/WOS:000292646300026)
- [100] Marco A. Gutierrez, E. Martinena, A. Sanchez, Rosario G. Rodriguez, and P. Nunez, "A Cost-Efficient 3D Sensing System for Autonomous Mobile Robots," *Journal of Physical Agents*, vol. XXX, no. XXX, pp. 1-8, 2011.
- [101] Raymond Sheh, Nawid Jamali, M. Waleed Kadous, and Claude Sammut, "A low-cost, compact, lightweight 3d range sensor," *Proceedings of the 2006 Australasian Conference on Robotics and Automation, ACRA 2006*, 2006. [Online]. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84855591133&partnerID=tZOtx3y1>
- [102] Oliver Wulf and Bernardo Wagner, "Fast 3D Scanning Methods for Laser Measurement Systems," *Proceedings of the International Conference on Control Systems and Computer Science*, vol. 1, no. section 2, pp. 312-317, 2003.
- [103] Toyomi Fujita, "3D Sensing and Mapping for a Tracked Mobile Robot with a Movable Laser Ranger Finder," *Sensors (Peterborough, NH)*, pp. 2-7, 2011.
- [104] Jianhong Cui, Sabri Tosunoglu, Rodney Roberts, Carl Moore, and Daniel W. Repperger, "A review of teleoperation system control," in *Florida Conference on Recent Advances in Robotics, FCRAR*, Boca Raton, 2003, pp. 1-12. [Online]. [http://dubel.org/misc/docs/fcrar2003\\_ppr\\_fiu\\_famu\\_afrl\\_final\\_ver\\_1may2003.pdf](http://dubel.org/misc/docs/fcrar2003_ppr_fiu_famu_afrl_final_ver_1may2003.pdf)
- [105] Peter F. Hokayem and Mark W. Spong, "Bilateral teleoperation: An historical survey," *Automatica*, vol. 42, pp. 2035-2057, 2006.
- [106] S Lichiardopol, "A Survey on Teleoperation," Dept. Mech. Eng., Dynamics Control Group, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Tech. rep. 2007.
- [107] Пенчо Венков, "Сензорни системи на роботи за спасителни операции. Роботи за спасителни операции," in *International Conference RAM 2011*, October 3-7, 2011, Sofia, 2011, pp. m1-m4.
- [108] T.B. Sheridan, *Telerobotics*, 1989.
- [109] Paolo Arcara and Claudio Melchiorri, "Control schemes for teleoperation with time delay: A comparative study," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 38, pp. 49-64, 2002.
- [110] F. Monteiro, P. Rocha, P. Menezes, A. Silva, and J. Dias, "Teleoperating a mobile robot. A solution based on JAVA language," *ISIE '97 Proceeding of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 1, 1997.
- [111] Emanuel Slawinski, Vicente Mut', "Teleoperation of mobile robots," *Latin American Applied Research*, vol. 36, pp. 79-86, 2006.
- [112] Ildar Farkhatdinov and Jee Hwan Ryu, "Hybrid position-position and position-speed command strategy for the bilateral teleoperation of a mobile robot," in *ICCAS 2007 - International Conference on Control, Automation and Systems*, 2007, pp. 2442-2447.
- [113] Ildar Farkhatdinov and Jee Hwan Ryu, "Improving mobile robot bilateral teleoperation by introducing variable force feedback gain," in *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings*, 2010, pp. 5812-5817.
- [114] Sangyoon Lee, Sangyoon Lee, G.S. Sukhatme, G.J. Kim, and Chan-Mo Park, "Haptic control of a mobile robot: a user study," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 2867-2874, 2002.
- [115] Paul Nadrag, Lounis Temzi, Hichem Arioui, and Philippe Hoppenot, "Remote control of an assistive robot using force feedback," *2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pp. 211-216, 2011.

- [116] B.P. DeJong, J.E. Colgate, and M.a. Peshkin, "Improving teleoperation: reducing mental rotations and translations," *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, vol. 4, 2004.
- [117] J. Borenstein and Y. Koren, "Tele-autonomous guidance for mobile robots," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 20, no. 6, pp. 1437-1443, 1990.
- [118] Dj Bruemmer, Dd Dudenhoeffer, and JI Marble, "Dynamic-Autonomy for Urban Search and Rescue," in *AAAI Mobile Robot Competition*, Edmonton, Canada, 2002, pp. 33-37. [Online]. <http://www.aaai.org/Papers/Workshops/2002/WS-02-18/WS02-18-006.pdf>
- [119] Maarten Sierhuis, Jeffrey M Bradshaw, Alessandro Acquisti, Ron Van Hoof, and Renia Jeffers, "Human-Agent Teamwork and Adjustable Autonomy in Practice," in *7th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space: iSAIRAS 2003*, Nara, Japan, 2003, p. 8 pp. [Online]. <http://www.dagstuhl.de/Materials/Files/07/07122/07122.SierhuisMaarten.Paper.pdf>
- [120] Terrence Fong, Charles Thorpe, and Charles Baur, "A safeguarded teleoperation controller," in *IEEE International Conference on Advanced Robotics 2001 Budapest Hungary*, Budapest, 2001. [Online]. <http://infoscience.epfl.ch/record/29975/files/ICAR01-TF.pdf>
- [121] Eric Krotkov, Reid Simmons, Fabio Cozman, and Sven Koenig, "Safeguarded teleoperation for lunar rovers: From human factors to field trials," *IEEE Planetary Rover Technology and Systems Workshop*, p. 21, 1996. [Online]. <http://www.ri.cmu.edu/pub/files/pub1/krotkov/eric/1996/1/krotkov/eric/1996/1.pdf>
- [122] Terrence Fong and Charles Thorpe, "Vehicle teleoperation interfaces," *Autonomous Robots*, vol. 11, pp. 9-18, 2001.
- [123] Huosheng Hu, Lixiang Yu, Pui Wo Tsui, and Quan Zhou, *Internet-based robotic systems for teleoperation*, 2001.
- [124] H.K. Keskinpala, J.a. Adams, and K. Kawamura, "PDA-based human-robotic interface," *SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme - System Security and Assurance (Cat. No.03CH37483)*, vol. 4, 2003.
- [125] Валентин Николов, "Управление на мобилни роботи," Технически университет - София, Дисертация 2010.
- [126] Валентин Николов and Владимир Заманов, "BLUETOOTH/WI-FI УПРАВЛЕНИЕ НА РОБОТ С ПОВИШЕНА МОБИЛНОСТ," *Годишник на Технически университет-София*, vol. 62, no. 2, pp. 297-302, 2012.
- [127] G. Chronis and M. Skubic, "Robot navigation using qualitative landmark states from sketched route maps," *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, vol. 2, no. 1, 2004.
- [128] Fumio Okura, Yuko Ueda, Tomokazu Sato, and Naokazu Yokoya, "Teleoperation of mobile robots by generating augmented free-viewpoint images," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013, pp. 665-671.
- [129] Guilherme N. DeSouza and Avinash C. Kak, "Vision for Mobile Robot Navigation: A Survey," *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*, vol. 24, no. 2, pp. 237-267, 2002.
- [130] Francisco Bonin-Font, Alberto Ortiz, and Gabriel Oliver, "Visual Navigation for Mobile Robots: A Survey," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 53, no. 3, pp. 263-296, 2008.
- [131] John J. Leonard and Hugh F. Durrant-Whyte, "Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 376-382, June 1991.

- [132] J Borenstein and Y. Koren, "High-speed obstacle avoidance for mobile robots," in *Intelligent Control, 1988. Proceedings., IEEE International Symposium on*, Arlington, 24-26 Aug, 1988, pp. 382 - 384.
- [133] J Borenstein and Y. Koren, "Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots in Cluttered Environments," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, Ohio, May 13-18, pp.572-577, 1990.
- [134] J. Borenstein and Y. Koren, "The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 278-288, 1991.
- [135] Iwan Ulrich and Johann Borenstein, "VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots," in *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, May 16-21, 1998.
- [136] Iwan Ulrich and Johann Borenstein, "VFH\*: Local Obstacle Avoidance with Look-Ahead Verification," , San Francisco, CA, April 2000, pp. 2505-2511, 2000.
- [137] Sebastian Thrun, "Robotic Mapping: A Survey," in *Exploring artificial intelligence in the new millennium*, Gerhard Lakemeyer and Bernhard Nebel, Eds. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2003, ch. 1, pp. 1-35.
- [138] Tomáš Krajník, "LARGE-SCALE MOBILE ROBOT NAVIGATION AND MAP BUILDING," Czech Technical University - Faculty of Electrical Engineering, Prague, Doctoral Thesis 2011.
- [139] M. Veeck and W. Veeck, "Learning polyline maps from range scan data acquired with mobile robots," *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*, vol. 2, 2004.
- [140] Ingemar J. Cox, "Blanche--An experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 2, pp. 193-204, 1991.
- [141] Alberto Elfes, "Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation," *Computer*, pp. 46-57, June 1989.
- [142] Kurt Konolige, "Improved Occupancy Grids for Map Building," *Autonomous Robots*, vol. 4, pp. 351-367, 1997.
- [143] Kai Oliver Arras and Roland Y Siegwart, "Feature Extraction and Scene Interpretation for Map-Based Navigation and Map Building," *Proceedings of SPIE, Mobile Robotics XII*, vol. 3210, pp. 42-53, 1997.
- [144] H. Baltzakis and P. Trahanias, "An iterative approach for building feature maps in cyclic environments," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, 2002.
- [145] Daniel Sack and Wolfram Burgard, "A Comparison of Methods for Line Extraction from Range Data," *In Proc. of the 5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV)*, no. 1973, 2004.
- [146] Sebastian Thrun and Arno Bucken, "Integrating Grid-Based and Topological Maps for Mobile Robot Navigation," in *Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence*, Portland, Oregon, 1996, pp. In: Proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence AAAI.
- [147] Sebastian Thrun, Jens-Steffen Gutmann, Dieter Fox, Wolfram Burgard, and Benjamin J. Kuipers, "Integrating Topological and Metric Maps for Mobile Robot Navigation: A Statistical Approach," in *In Proceedings of the AAAI Fifteenth National Conference on Artificial Intelligence*, 1998.
- [148] Sebastian Thrun, "Learning metric-topological maps for indoor mobile robot navigation," *Artificial Intelligence*, vol. 99, pp. 21-71, 1998.
- [149] a Siadat, a Kaske, and S Klausmann, "An optimized segmentation method for a 2D laser-scanner applied to mobile robot navigation," *3rd IFAC Symposium on \ldots*, no. 1, pp. 2-7,

1997. [Online].  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.46.2456\&rep=rep1\&type=pdf>
- [150] J.-S. Gutmann and C. Schlegel, "AMOS: comparison of scan matching approaches for self-localization in indoor environments," *Proceedings of the First Euromicro Workshop on Advanced Mobile Robots (EUROBOT '96)*, 1996.
- [151] Viet Nguyen, Agostino Martinelli, Nicola Tomatis, and Roland Siegwart, "A comparison of line extraction algorithms using 2D laser rangefinder for indoor mobile robotics," *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, pp. 1768-1773, 2005.
- [152] G Weiss, G Weiss, E v. Puttkamer, and E v. Puttkamer, "A Map Based on Laserscans Without Geometric Interpretation," *Proceedings of Intelligent Autonomous Systems 4 (IAS-4)*, pp. 403-407, 1995.
- [153] Feng Lu, "Shape Registration Using Optimization For Mobile Robot Navigation," University of Toronto, Ph.D. dissertation 1995.
- [154] Konstantinos G Derpanis, "Overview of the RANSAC Algorithm," *Image Rochester NY*, vol. 4, pp. 2-3, 2010. [Online]. <http://www.cse.yorku.ca/~kosta/CompVis/Notes/ransac.pdf>
- [155] Гергана Лазарова and Иван Койчев, "ПАРАЛЕЛЕН ЕМ - АЛГОРИТЪМ ЗА СМЕСЕНО МАШИННО САМООБУЧЕНИЕ (MT-SSEM)," in *VI Национална конференция "Образованието в информационното общество"*, 2013, pp. 149-157.
- [156] Jens-Steffen Gutmann, Thilo Weigel, and Bernhard Nebel, "A fast, accurate and robust method for self-localization in polygonal environments using laser range finders," *Advanced Robotics*, vol. 14, pp. 651-667, 2001.
- [157] Godfried T Toussaint, "The Sphere of Influence Graph : Theory and Applications," *International Journal of Information Technology \& Computer Science*, vol. 14, no. 2, pp. 37-42, 2014.
- [158] S.T. Pfister, S.I. Roumeliotis, and J.W. Burdick, "Weighted line fitting algorithms for mobile robot map building and efficient data representation," *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, vol. 1, 2003.
- [159] F. Amigoni and S. Gasparini, "Analysis of methods for reducing line segments in maps: Towards a general approach," *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008.
- [160] N. E. Pears, "Feature extraction and tracking for scanning range sensors," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 33, no. May 1999, pp. 43-58, 2000.
- [161] N.E. Pears, "An intelligent active range sensor for vehicle guidance: system overview," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS '96*, vol. 1, p. 8, 1996.
- [162] P Jensfelt and H Christensen, "Laser based position acquisition and tracking in an indoor environment," *Proc. of the Intl. Symposium on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 331-338, 1998.
- [163] Johan Forsberg, Ulf Larsson, and Ake Wernersson, "Mobile Robot Navigation using the Range-Weighted Hough Transform," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, no. March, pp. 18-26, 1995. [Online]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21478953>
- [164] Ahad Harati and Roland Siegwart, "A new approach to segmentation of 2D range scans into linear regions," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2083-2088, 2007.
- [165] JI Crowley, "World modeling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging," *Robotics and Automation, 1989. Proceedings.*, vol. 3, no. February, pp. 1574-1579, 1989.