



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
Машиностроителен Факултет
Катедра Автоматизация на дискретното производство

маг. инж. Николай Димитров Димитров

**ГРЪБНАЧЕН СТЪЛБ ЗА МОБИЛЕН
РОБОТ АНАЛОГ НА ГУЩЕР**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1 Машинно инженерство

Научна специалност: 02.21.08 Автоматизация на производството

Научни ръководители:
проф. д-р инж. Иво Малаков и проф. д-р инж. Веселин Павлов

СОФИЯ, 2017 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Автоматизация на дискретното производство“ към Машиностроителен факултет на Технически университет – София на редовно заседание, проведено на 13.11.2017 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 08.03.2018 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-353 / 04.12.2017 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-р инж. Димчо Чакърски – председател
2. Проф. д-р инж. Веселин Павлов – научен секретар
3. Проф. д.т.н. инж. Христо Шехтов
4. Проф. д-р инж. Роман Захариев
5. Доц. д-р инж. Иван Чавдаров

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Димчо Чакърски
2. доц. д-р инж. Иван Чавдаров

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Машиностроителен факултет на Технически университет – София, блок 3, кабинет № 3242.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Автоматизация на дискретното производство“ на Машиностроителен факултет.

Номерата на фигурите, таблиците, формулите и литературните източници съответстват на тези в дисертационния труд.

Автор: маг. инж. Николай Димитров

Заглавие: ГРЪБНАЧЕН СТЬЛБ ЗА МОБИЛЕН РОБОТ АНАЛОГ НА ГУЩЕР

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Мобилните роботи заемат все повече място в живота на човека. Темата е приоритет за много изследователски центрове и университети. Предимства на мобилните роботи са широките възможности за приложение в различни производствени, противопожарни, военни и други системи. Основните особености на мобилните роботи е автономното им управление в неструктурирана среда с произволни препятствия. Въвеждането на гръбначен стълб за нуждите на мобилни роботи е особено актуално при крачещите мобилни роботи. Роботите тип гущер се използват за движение в трудно достъпна и динамично изменяща се среда, за събиране на информация за възможни промени, аварии, бедствия и пострадали хора.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Основната цел на дисертационния труд е:

Разработване и усъвършенстване на равнинни и пространствени модели на гръбначен стълб и скелетна структура за робот аналог на гущер, съобразени със съществуващите технологични възможности за реализация, които да подобрят възможностите за движение.

За изпълнение на поставената цел е предвидено да се решат следните основни задачи:

- Да се извърши анализ на биологичните видове и съществуващи инженерни решения и да се предложат подобрени структурни варианти, близки до биологичните и съобразени с възможностите на съвременните технологии за реализация;
- Да се синтезира множество от равнинни затворени и отворени, и моноконтурни пространствени структури, подходящи за проектиране и изработка на гръбначен стълб на робот аналог на гущер;
- Да се съставят модели за теоретични и симулационни изследвания на движението на предложените структури и да се направи оценка за качествата им;
- Като се използват разработените от докторанта маг. инж. Б. Петров крака, да се проектира и разработи модел на робот;
- Да се проведат симулационни и експериментални изследвания на краченето и да се оценят постигнатите положителни и негативни резултати.

Научна новост

- Предложени са и са изследвани кинематично вариантни на равнинни структури на гръбначен стълб, които са подходящи за крачещи роботи, движещи се по равнини и/или повърхнини с плавна промяна на релефа;
- Предложени са и са изследвани кинематично конструктивни варианти на гръбначен стълб с три и шест степени на свобода на кинематичните двойките между два съседни прешлена, които са подходящи за крачещи роботи, движещи се по повърхнини с пространствена промяна на релефа и наличие на недетерминирани препятствия, характерни за разрушени сгради и други неизследвани терени;
- Съставени са модели за теоретични и симулационни изследвания на движението на предложените структури, и е направена оценка за качествата им;
- Проектиран и изработен е модел на робот гущер, като са използвани разработените от докторанта маг. инж. Б. Петров крака с адаптивно стъпало и като продължение на

гръбначния стълб са добавени опашка, шия и глава, с разположен управляващ блок и възможности за окомплектоване със сензори за възприятие на външната среда и електрозахранващи батерии.

Практическа приложимост

- Създаден е прототип на робот аналог на гущер, притежаващ гъвкав гръбначен стълб с пасивни и активни степени на свобода, подвижни крака, като е и доказана работоспособността на робота;
- Направен е и систематизиран обзорец анализ на биологични скелетни системи, подходящи за инженерни аналози, както и на съвременни инженерни решения в областта на роботи гущери;
- Разработени са компютърни алгоритми, с чиято помощ прототипът на робота гущер се движи и могат да се провеждат експериментални изследвания, с помощта на специализиран софтуер за управление и в съавторство с докторантът маг. инж. Б. Петров.

Апробация

Създаден е реален прототип на робота аналог на гущер. С негова помощ са направени тестове на движението като голяма част от компютърно изследваните параметри отговарят на тези в прототипа. Роботът реализира извиване на гръбначен стълб, съдържащ пасивни степени на свобода, както и премества краката си. По този начин е създадена походка, която спомага за неговото придвижване. Чрез робота могат да се направят допълнителни изследвания, които да помогнат за създаването на бъдещи подобрени роботи аналози на гущери.

Част от получените резултати са поместени в 6 публикации.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са представени в следните публикации:

1. Димитров, Н. и В. Павлов, Синтез на гръбначен стълб за мобилен робот аналог на гущер и симулационен анализ на движението на избрани структури, сп. „Механика на машините“ 2010 г., XVIII, книга 7, стр. 25-31, ISSN 0861-9727 2010
2. Павлов, В., Б. Петров, Й. Ханджиев, Н. Димитров, 3D структура на мобилен робот изградена върху биомеханична аналогия със скелетна система на гущер, „Сборник доклади от XX Международна Научно-Техническа Конференция „АДП – 2011“ Созопол - юни 2011
3. Павлов, В., Б. Петров, Н. Димитров, Моделиране на контактно взаимодействие между опорната равнина и стъпалото на крачещ робот, съдържащо пасивни степени на свобода, сп. „Механика на машините“ 2012 г., година XX, книга 3, стр. 37-43, ISSN 0861-9727
4. Димитров, Н., В. Павлов, Анализ на съществуващи инженерни решения на гръбначен стълб за роботи, „Сборник доклади от XXII Международна Научно-Техническа Конференция „АДП – 2013“, Созопол - юни 2013
5. Павлов, В., Н. Димитров, Б. Петров, Равнинни модели за движение на робот с четири крака, съдържащ гръбначен стълб с еластични шарнири, „Сборник доклади от XXIV МНТК-АДП 2015“, Созопол, 2015
6. Димитров, Н., Функционално симулационно изследване на робот аналог на гущер с гъвкав гръбначен стълб чрез възможностите на SOLIDWORKS, „Българско списание за инженерно проектиране“, бр. 33, ISSN 1313-7530, 2017

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 183 страници, като включва увод, 6 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 68 литературни източници, като 35 са на латиница и 9 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 158 фигури и 31 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪКРАТЕНО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ОБЗОРЕН АНАЛИЗ НА БИОМЕХАНИКАТА НА ГРЪБНАЧЕН СТЬЛБ НА ГУЩЕРИ И ТЕХНИЧЕСКИТЕ МУ АНАЛОЗИ ЗА РОБОТИ

1.1. Мотиви за търсене на аналогия с биологичните видове

Развитието на човека и човешкото общество основно се крепи на използването и създаването на аналогии от природата. В това няма нищо неочаквано и странно. Редица са доказателствата за това, че дори идеята за изобретяването на колелото е дошла от дънерите на дърветата. Почти всичко, което човек използва ежедневно е биологично инспирирано по един или друг начин от природата. В техниката използването на идеи и вдъхновение от живата природа е допринесло изключително много за развитието на съвременния свят. Когато говорим за мобилни роботи мотивите за търсене на аналогия с биологичните видове са идентични. Търсят се особености, черти, физични явления, които могат да се използват във функционалното предназначение на робота. Когато става въпрос за използването на гръбначен стълб в структурата на робот, то е важно да се прецени нуждата от използването му. Чрез аналитично разглеждане и задълбочено изучаване на биологичните функции и структура на гръбначния стълб при животните и човека може да се достигне до по-добро копиране и пресъздаване на техните функционални характеристики и особености в един биологично мотивиран робот. Колкото по-задълбочени биват изследванията, толкова по-точни могат да бъдат моделите на биомиметичните роботи.

При човека гръбначният стълб има равновесно положение във форма на S, а при четириногите животни – форма на кобилица. Тази форма се определя от позицията на организма в пространството и посоката на основните натоварвания по отношение на скелета.

Гръбначният стълб се състои от кости с твърде сложна форма, наречени прешлени, които са подредени една до друга. Всеки прешлен е отделен чрез хрущялен пръстен, който абсорбира ударни натоварвания. Тези дискове правят възможни относителните движения с шест степени на свобода. Създаването на пълноценен аналог се определя като инженерен шедьовър.

1.1.1. Ставно-скелетна система

Гущерите са гръбначни животни от клас Влечуги, които притежават гъвкаво тяло, дълга опашка, люспеста кожа, подвижни клепачи и отвори за външни уши. Размерите им варират от няколко сантиметра до 3 метра. Почти всички видове имат четири крака, както и силна мускулатура.

Гущерите извиват телата си странично при всяка стъпка по време на придвижване и, като резултат, тяхното движение изглежда коренно различно от това на бозайниците. Въпреки споменатите странични извивания на тялото, механиката на придвижване на гущерите е подобна на механиката на придвижване при други крачеци животни.

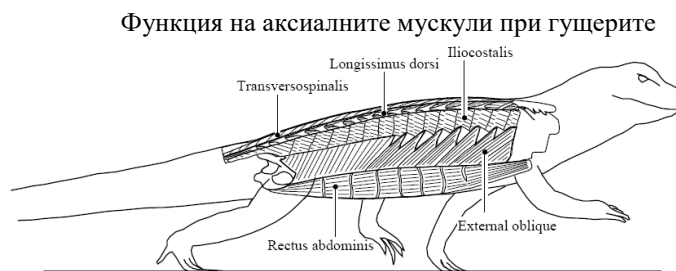
Крачещите животни използват походка „обърнато махало“ при ниски скорости и подскачат при високи скорости. Походката „обърнато махало“ съответства на ходенето и се

характеризира с размяна на кинетичната и потенциалната гравитационна енергия на масовия център подобно на махало. При тази походка краката имат поведение на твърда опора и масовия център на тялото прескача над позиционираните крайници. Вертикалното положение на масовия център достига максималната си позиция приблизително в същия момент, в който скоростта на масовия център напред достигне своя минимум. В резултат на това колебанията в кинетичната енергия и гравитационната потенциална енергия са почти извън фаза една от друга, позволявайки размяната им, като при махало. Махалоподобната размяна доказано намалява нуждите от механична енергия с до 70% по време на ходене.

При по-големи скорости крачещите животни подскочат, което включва тръс, галоп, подскачане и тичане. При подскачащите походки краката имат поведение на пружини. Съгласуването на краката кара масовия център да достигне най-ниската си точка по средата на стоящата фаза. В този случай колебанията в кинетичната енергия и гравитационната потенциална енергия на масовия център са във фаза една с друга. Тези колебания в механичната енергия наподобяват тези в система с маса и пружина или подскачаща топка. Няма съществени съхранения на енергия от махалоподобната смяна на кинетичната енергия и гравитационната потенциална енергия, защото те са във фаза една с друга. Обаче подскачащите походки се характеризират със значителни съхранения на енергия чрез съхранение на еластична енергия в мускулите, сухожилията и ставните връзки.

1.1.2. Двигателно-мускулна система

За да е ясно движението на гръбначния стълб на гуцера, трябва да се разгледат особеностите и мускулите, чрез които той се движи. Отделено внимание на аксиалните мускули при гуцери, които са разположени по протежение на надлъжната ос на тялото на гръбначните животни.



Фиг. 1.4 Схематично представяне на някои от повърхностните аксиални мускули при *Iguana iguana*. [Ritter, 1996]

Резултатите от няколко проучвания подкрепят хипотезата, че стабилизиращата роля на ерахіал мускули е обща (основна) характеристика на гуцерите и също осигурява сериозно доказателство, че елементи на һурахіал мускулатура са основните мускули за странично извиване. Това предполага усъвършенстване на еволюционния сценарий за двигателната функция на аксиалните мускули. Една особеност на този сценарий е запазването на функцията на аксиалните мускули при прехода от земноводни към влечуги. Както при саламандрите, така и при гуцерите, се смятало, че ерахіал мускули пораждат страничното извиване на тялото, докато һурахіал мускули осигурявали стабилността на тялото. Въпреки това, ерахіал мускули на гуцерите не са запазили основната функция на странично извиване наблюдавана при рибите и земноводните. Вместо това, изглежда, че има голяма функционална диверсификация на ерахіал мускули – преминаване от функция на странично извиване при земноводните към функция за стабилизиране на тялото при влечугите.

1.1.3. Сетивно-рефлексна система

Гуцерите имат интересни особености. По-подробната информация за тях може да доведе до създаването на по-добра адаптация на робот гуцер и до пренасяне на някои от характерните специфики на животното у робота. Гуцерите притежават дълги опашки и широки

устни, люспи, нокти, подвижни клепачи и отвори за външни уши. Гущерите не могат да дишат и тичат едновременно, поради липсата на диафрагмен мускул, който да избутва дробовете им. Това означава, че те могат да тичат само за кратко време, след което да спрат, за да поемат необходимия кислород. Имат доста добра сетивност и обоняние като на върха на устата си могат да засекат ароматни молекули. Тези сетива помагат да се локализира плячката и да разберат дали потенциалната плячка е отровна.

1.2. Роботи аналози на гущери с акцент на гръбначен стълб

Едно от направленията на развитие на мобилните крачеци роботи е включването и използването на гъвкавост в тялото. В това направление по света се правят много изследвания, за да може да се обоснове не само практическата, но и техническата полза в прилагането на такъв тип структури в тялото на мобилните роботи. В този смисъл изследователите правят сравнения и аналози с гръбначни животни, чиято гъвкавост и свобода на движенията позволяват на индивидите да извършват изключително сложни движения. Природата е доказала, че фиксираното тяло не позволява подобна свобода. Краката и стъпалата също пораждат голямо количество технически въпроси при създаването на техни аналози в роботите. Някои от тях се заместват с изключително опростени структури с цел да се олекотят анализите и изчисленията, засягащи движението на роботите и различните видове устойчивост. Важно е да се отбележи, че за създаването на робот аналог на животно, не могат да се разглеждат само една или друга част от него. За решаването на такъв тип задачи е необходимо да се разгледа цялостната скелетна структура и мускулатура. В много случаи трябва да се съобразят и специфични белези, сетивни органи и пр., които могат да спомогнат за постигането на целта. В тази глава са разгледани някои известни решения на роботи аналози на гущери, за да може да се оценят техните предимства, недостатъци, проблеми и възможности.

1.2.1. Робот саламандър – Salamandra Robotica

Salamandra Robotica е робот аналог на саламандър с гъвкав гръбначен стълб, който може да се движи, както на суша, така и във вода. Той е разработен от екип инженери, ръководени от проф. Auke Ijspeert във Федералната политехническа школа в Лозана (*Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*), Швейцария [Ijspeert, et al., 2007]. Роботът е дълъг около метър и се управлява от електрически „централен генератор на активността“ (*Central Pattern Generator – CPG*), който подава ритмични моторни сигнали без обратна връзка. Тази технология работи подобно на начина, по който функционира главният мозък при животните, който подава сигнали към опорно-двигателния апарат и извършва това дори и да няма обратна връзка с крайниците и другите части на тялото. Счита се, че тази система от координирани движения може да доведе до все по-честата ѝ употреба и създаването на роботи с движения, координирани от изкуствена нервна система. [Yong, 2007] [Fox, 2007]

1.2.2. Робот саламандър – Pleurobot

Pleurobot е последният разработен робот от института EPFL. За разлика от предишните роботи, за неговото създаване е използван изцяло нов подход, като екипът се е възползвал от последните постижения в кинерадиографията, за да реализира биомиметичния дизайн. Екипът заснема движението и плуването на саламандър с триизмерни видеоклипове с рентгенови лъчи. Чрез следене на 64 точки от скелета на животното, изследователите са успели да запишат движението на костите и ставите с голяма детайлност. След това са били използвани оптимизационни алгоритми, с които са намалили броя и местоположението на активните и пасивни стави, които са им били нужни, за да пресъздадат, в разумни граници, движението на животното в робота. [Ijspeert, et al., 2016] [*Pleurobot*]

1.2.3. Други видове роботи гущери

Правени са разработки на роботи гущери и в други направления. Те обаче не притежават гъвкав гръбначен стълб. Такъв пример е роботът на Stanford University (Станфорд, Калифорния, САЩ) – Stickybot. Stickybot е робот гущер, който изкачва плавно гладки вертикални повърхности. Дизайнът на робота включва няколко принципа адаптирани от геконите като йерархия на прилепващите тъкани, насочена адхезия и контрол на тангенциални сили при контакт, за да се постигне контрол върху сцеплението. Долната страна на пръстите на краката на Stickybot са покрити с поредица малки наклонени полимерни стълба. [Kim, et al., 2008] [Biomimetics] [Cutkosky, 2011] [Saenz, 2009]

Друг пример за робот гущер е такъв, който е аналог на базилиск или т.нар. Исусов гущер (*Basiliscus basiliscus*), който умее да ходи по вода. Проектът за робота е създаден в Carnegie Mellon University (Питсбърг, Пенсилвания, САЩ). Целта на проекта е да се създаде аналог на животното, което да може да се движи по вода без да потъва. Без значение от размера им, тези животни могат да ходят по вода, използвайки задните си крака като успяват се придвижат по водата на разстояние от около 4,5 m, преди да започнат да потъват и да заплуват с всичките си крайници. Това, което е интересно е, че без значение от телното си, всички индивиди тичат с една и съща скорост и с честота на движение на краката от около 5-10 Hz. [Floyd, et al., 2006] [SocietyofRobots] [Hsieh, 2003]

1.3. Системно представяне на известните решения на гръбначен стълб

1.3.1. Роботи с хипер степени на свобода

Интерес за мобилната роботика представляват някои видове индустриални роботи, които използват паралелни структури, наподобяващи хоботи.

Сплайн роботи, роботи с хипер степени на свобода, continuum роботи, „змийска ръка“ или роботи хоботи са все роботи, които притежават повече степени на свобода, отколкото реално са им нужни, за да обслужват обема на работната си зона. Въпреки това, обаче, те се използват, за да достигнат тесни или трудно достъпни места в рамките на този обем като вариантите могат да са безброй и това им дава основно предимство пред конвенционалните роботи. При тези роботи няма познатите въртящи стави, а обикновено се използват пневматични компоненти, нишки, жила, които контролират последователно разположени плочи, наподобяващи гръбначен стълб. Точно тази структура осигурява и работния обем на този тип роботи.

Интересен пример на структура на робот тип „слонски хобот“ е разработена от Clemson University (Клемзън, Южна Каролина, САЩ). Конструкцията се състои от четири секции, като всяка секция има две задвижвани степени на свобода, които са управлявани от кабелна серво система. Така роботът е с осем задвижвани степени на свобода. [Hannan, et al., 2003] [Brown, et al., 2007] Други интересни разработки в тази насока има компания Festo, която освен с индустриална автоматизация, има и подразделение, което се занимава с биологично инспирирани роботи. [BionicHandlingAssistant] На пръв поглед, Bionic Handling Assistant не прилича толкова на машина, а на органична структура, напояща слонски хобот или гръбначен стълб. Той се състои от три основни елемента, които осигуряват пространственото движение, заедно с хващача с адаптивни челюсти/пръсти. Основните елементи, всеки състоящ се от три кръгово разположени актуатора наклонени под ъгъл от три градуса. Всеки актуатор е снабден със сгъстен въздух в началото на структурата. Възстановяването на формата се осъществява от спецификата на дизайна на актуаторите, които действат като пружини, когато спре подаването на сгъстения въздух. Армирани жила с потенциометри от външната страна на актуаторите регистрират тяхното удължаване и контролират пространственото движение на системата.

1.3.2. Хуманоидни роботи с гръбначен стълб

Проф. Masayuki Inaba (University of Tokyo, Токио, Япония) се заема с необикновено предизвикателство да построи хуманоиден робот с много сложна физична структура и масивна паралелна информационна мрежа. Основната идея предлага една нова проектна схема, която да реализира обща гъвкавост на тялото като тази при човека. [Mizuuchi, et al., 2003] [Mizuuchi, et al., 2005] При изучаването на особеностите на структурите за този проект се създават и хуманоидни роботи в естествена големина от 2001 г. насам. Тези роботи са с много по-сложна, близка до човека структура. При тях освен в областта на гръбначния стълб се работи и в областта на краката, адаптивността на стъпалата, както и създаването на подходяща ръка. Целта е ръката да може да осъществява основни движения, които да позволяват да се хващат предмети и да участват при балансирането на цялостната структура при движение. Трудността при управлението на такъв тип роботи идва от това, че работното пространство е много голямо, степените на свобода обикновено са над 60, актуаторите над 100, а сензорите, от които се получава информация над 120. Друг основен проблем се заражда от това да се изгради точен изчислителен модел на роботите.

1.3.3. Гръбначен стълб за хуманоиден робот Robota

Проектът Robota разработва поредица от биомиметични хуманоидни роботи. От 1998 г. Robota е бил използван като част от проект за проучвания на деца с аутизъм. Тези проучвания сравняват ефекта между човекоподобните функции на робота и социалния работник, които оказват влияние върху интереса на децата с аутизъм. Копирането на тези функции е било ключово ограничение при проектирането на Robota. [Roos, et al.] Текущият прототип обхваща ръка с 6 степени на свобода с хващач с 1 степен на свобода, чифт очи с 3 степени на свобода с 2 монтирани камери, шия с 3 степени на свобода и гръбначен стълб с 3 степени на свобода. В последния етап, прототипът е обвит в пластмасово покритие, подобно на това на търговска кукла, за да се гарантира, че всички механични части са скрити.

1.3.4. Проектите на Boston Dynamics

В друго направление работят от компанията Boston Dynamics, Waltham, Massachusetts, САЩ. Те са разработчик на редица известни и авангардни мобилни роботи като BigDog, PETMAN и други. Някои от по-интересните роботи на Boston Dynamics, свързани с този дисертационен труд са хуманоидният робот Atlas и пъргавия и бърз Cheetah/WildCat. Atlas може да се движи през трудни терени подобно на човека, като ще използва ръцете си за допълнителна опора и баланс при нужда. За разлика от повечето други хуманоидни роботи, които използват статични техники за контролиране на движението, Atlas се движи динамично с помощта на високо специализиран софтуер за управление и с високо производителен хардуер. При последната модификация на робота, храненето е вкарано в тялото и той не е свързан към други допълнителни източници на енергия. Хуманоидният робот е разработен, за да използва инструменти предназначени за човека. Той притежава 28 хидравлично задвижвани степени на свобода в ръцете, краката, стъпалата и тялото. Главата на робота има няколко сензора със стереокамери и LIDAR за избягване на препятствия, оценка на терена, ориентиране и манипулиране на обекти. Роботът е с височина около 1,75 m и тежи 82 kg, като е значително по-тих от неговите предшестественици.

Cheetah е името на втория робот, който има четири крака, гъвкав гръбначен стълб, подвижни глава и шия, и евентуално опашка. Според компанията, роботът тича по-бързо от всеки съществуващ крачещ робот и по-бързо от най-бързите бегачи. Роботизираната котка е проектирана да прави остри завои, така че да може да прави зигзагообразни движения. Ще ускорява бързо при тръгване и ще спира почти мигновено. При досега известните опити са постигнати скорости от 45 km/h, с което се подобрява рекордът за най-бърз крачещ робот. Идеята на проекта е роботът да достигне скорости от 80-100 km/h като при биологичния си

аналог. По-новата версия на Cheetah – WildCat има възможност да бяга без нуждата от външно хранене. За да се осигури достатъчна скорост и пъргавина, роботът има голям и шумен мотор, което го прави и по-тежък. Така максималната скорост на робота е 25 km/h. Засега той може да се движи главно по равен терен. [Ackerman, 2013] [TechCracks] [Coxworth, 2011]

1.3.5. Предимства на гъвкавостта на гръбначния стълб при бягане

За да се провери каква е разликата при роботите с гъвкав гръбначен стълб и тези без, се стига до следния наскоро разработен проект в Университета „Билкент“, Анкара, Турция. [Culha, 2012] [Culha]. Основното животно взето под внимание в този проект отново е гепард. Една от най-забележителните черти при тях, както и при други подобни животни, бягащи с висока скорост, е наличието на много гъвкав гръбначен стълб. Помощта на този гъвкав гръбначен стълб може да се отчете от нарастването на крачката и скоростта на бягане. Той не само огъва тялото на животното за увеличаване на дължината на крачката, но също така осигурява вертикалната и хоризонталната тяга по време на придвижване, както и служи като система за предаване на енергия между предните и задните крайници.

Постигнатите резултати показват, че гъвкавият гръбначен стълб увеличава подвижността на четирикракия робот. Хоризонталната скорост на двата робота е различна и при този с недеформируемо тяло тя е средно 0,72 m/s, докато при този с гъвкав гръбначен стълб – 1,2 m/s. Това показва, че използваната структура увеличава хоризонталната скорост със 71%! Изследванията са проведени при еднакви входни параметри. Нещо повече, когато е сравнена височината на скока на роботите, е отчетено, че робота с корав гръбначен стълб скача до 0,08 m по време на движението си, докато този с гъвкав гръбначен стълб достига до 0,21 m.

1.3.6. Изследвания и симулации на мобилни роботи с активни и пасивни степени на свобода в тялото

Интересни изследвания и проучвания прави д-р инж. Димитър Ценев в своята дисертация под ръководството на проф. д-р инж. Веселин Павлов с рецензенти чл. кор. проф. д-н Венелин Живков и доц. д-р инж. Владимир Заманов през 2011 година. Темата на дисертационния труд е „Мобилни роботи с активни и пасивни степени на свобода в тялото“ и е обсъждана и защитена в катедра „Автоматизация на електрозадвижването“ към факултет Автоматика на Технически Университет – София. Целта на труда е разработване и изследване на механични системи на мобилни роботи с тяло, което променя геометрията си при движение, вследствие действието активни и пасивни степени на свобода, като за изграждане на тялото се използват конвенционални равнинни механизми и структури на отворени кинематични вериги с еластични шарнири тип „гръбначен стълб“. [Павлов, 1993] [Павлов, 1997] [Павлов, и др., 2009] [Чавдаров, и др., 2009] [Ценев, 2011] В разработката са направени компютърни симулации на избрания модел с различни начални параметри. Изведени са резултати на тяхна база. Както става ясно сложната многопараметрична обвързаност не позволява да се получи единствено аналитично решение и поради това чрез симулация се търсят съчетания на параметрите, които осигуряват устойчивост (запазване на вертикалното положение с допустими отклонения). В заключение е описано, че областта на изследване, в която попадат въпросните структури е сложна по своето естество на изследване, както и поради наличието на неопределености и неизвестни величини. Те могат да влияят върху поведението на системата и е трудоемко да се направят изследвания, които да проиграт всички възможни варианти на движение и всички вариации на променяни величини. Въпреки това вариантите, които са изследвани показват, че структурите от тип „гръбначен стълб“ могат да намерят успешно приложение в конструкциите, както на колесни, така и на крачеци роботи за двукрако и четирикрако ходене.

1.3.7. Роботи змии

Интересни са разработките на така наречените безкраки роботи. Обикновено това са роботи с хипер степени на свобода. За придвижване тези роботи използват движението на тялото, за разлика от тези, които използват крака. Тези роботи притежават характеристики, които ги правят уникални, по същия начин както техните аналози – змии, червеи и личинки. Сравнени с твърдите структури на останалите роботи, безкраките могат да огъват и адаптират тялото си към променящия се терен, по който се движат. От друга страна техните съставни части (модули) са много малки в сравнение с габаритните им размери, което им позволява да влизат в малки тръби или отвори и да достигат до места недостъпни за останалите роботи [Gomez, 2008]. Изучаването им представлява интерес в случая, тъй като съществува определена аналогия с гръбначния стълб. Към този момент съществуват десетки разработки на роботи змии, създадени от различни университети и компании. Като по-известни могат да се открият разработките на лабораторията по биороботика към Carnegie Mellon University (Питсбърг, Пенсилвания, САЩ) [ModularSnakeRobots], разработките на д-р Gavin Miller [SnakeRobots], разработките на Robotnor – Centre for Advanced Robotics (в Тронхайм, Норвегия) [RobotnorSnakeRobots] и пр.

1.4. Резюме на решените и нерешени проблеми

За по-удобно, системно анализиране и структуриране на съществуващите решения е създадена по-долната таблица. Важно е да се отбележи, че всички предимства и недостатъци, които са описани са съотнесени към темата на дисертацията. Възможно е при други случаи и теми, тези характеристики да са различни.

Табл. 1.4 Системно представяне на съществуващите инженерни решения за гръбначен стълб.

Съществуващо решение	Предимство, свързано с темата	Недостатък, свързан с темата
Робот саламандър – Salamandra Robotica	Лесно предвидимо управление	Голям разход на енергия, заради наличието на активни степени на свобода и липсата на пасивни; силно опростени крайници
Робот саламандър – Pleurobot	Лесно предвидимо управление; по-близка структура до биологичната; голям брой сензори; много добър аналог	Голям разход на енергия, заради наличието на активни степени на свобода и липсата на пасивни
Роботи с хипер степени на свобода	Комбинация на активни и пасивни степени на свобода	По-трудно постигане на прецизност, поради разликата в параметрите на пасивните елементи
Хуманоидни роботи с гръбначен стълб	Изключителна комбинация на активни и пасивни степени на свобода; интересни решения на прешленни звена	Голям разход на енергия, заради големия брой двигатели; трудно управление
Гръбначен стълб за хуманоиден робот Robota	Лесно предвидимо управление; използване на познати механизми – карданни връзки, цилиндри и пр.	Липса на пасивни степени на свобода; силно опростени крайници
Проектите на Boston Dynamics	Липсва достатъчно информация; много бърза и адекватна структура на целия робот	Липсва достатъчно информация; голям разход на енергия; използване на хидравлични помпи и електромотори

<i>Предимства на гъвкавостта на гръбначния стълб при бягане</i>	<i>Още едно доказателство, че използването на гъвкавост в тялото, води до по-лесно придвижване</i>	<i>Липсва достатъчно информация за разликите при използване на активни и пасивни степени на свобода; не е разработен реален прототип</i>
<i>Изследвания и симулации на мобилни роботи с активни и пасивни степени на свобода в тялото</i>	<i>Още едно доказателство, че използването на гъвкавост в тялото, води до по-лесно придвижване, особено ако има комбинация между активни и пасивни степени на свобода</i>	<i>Липсва по-подробна информация за различни видове прешленни звена; не е разработен реален прототип</i>
<i>Роботи змии</i>	<i>Интересна интерпретация на гръбначен стълб; използват се предимно активни степени на свобода и управлението е лесно предвидимо</i>	<i>Голям разход на енергия, поради наличието на активни степени на свобода и липсата на пасивни; липсват крайници</i>

За сравняването на съществуващи решения за гръбначен стълб, дадени в табл. 1.4, могат да се направят изводи и да се вземе информирано решение.

Задвижването на гръбначния стълб и скелетната структура на гущерите, е изключително сложна задача. На този етап не са създадени пълни аналози. Като бе отбелязано, създаването на механичен аналог на гръбначен стълб би представлявало шедьовър на съвременната инженерна мисъл. Не по-малко постижение би представлявало и пресъздаването на цялостната мускулно-скелетна структура, нуждаеща се от разполагането на актуатори с достатъчен брой степени на свобода в такъв малък обем. Постигане би било изграждането на адекватни алгоритми за управление на активните степени на свобода, провокирани от непредсказуемото поведение, предизвикано от движението на робота в неструктурирана среда. Резултатите досега касаят частична замяна на основни биологични движения. Но е налице напредъкът в роботиката през годините, а тя се развива все по-бързо.

Направеният обзор не обхваща всички разработки в областта на синтеза на структури, подходящи за функционална замяна на гръбначния стълб и на скелетни структури на човек и животни при проектиране на биологично инспирирани роботи. Целта на обзорния анализ е да се съберат повече данни относно съществуващите инженерни решения, за да се потърсят интересни варианти при усъвършенстването и развитието на текущо изследваните модели. Най-добрите постижения са предназначени за хуманоидни роботи, при които гръбначният стълб е вертикално разположен и има стационарно устойчиво положение с формата на S. Използването на подобен тип конструкции е възможно и за хоризонтално положение на гръбначния стълб или при проектиране на роботи, аналози на четирикраки животни, в това число и гущери, където устойчивото положение на гръбнака е под форма на кобилица.

Сложността на задвижване и управление на поведението на гущерите е показано чрез анализа на ролята на различните видове мускули. Интересът е предизвикан преди всичко от това дали при животните всички степени на свобода са управляемо задвижвани, как пестят енергия и по-точно как се използва потенциалната енергия при движение.

1.5. Цел и задачи на дисертационната работа

Според направения литературен обзор и в съответствие със заданието в настоящия дисертационен труд е поставена следната основна цел:

Разработване и усъвършенстване на равнинни и пространствени модели на гръбначен стълб и скелетна структура за робот аналог на гущер, съобразени със съществуващите технологични възможности за реализация, които да подобрят възможностите за движение.

За изпълнение на поставената цел трябва да се решат следните задачи:

- Да се извърши анализ на биологичните видове и съществуващи инженерни решения и да се предложат подобрени структурни варианти, близки до биологичните и съобразени с възможностите на съвременните технологии за реализация;
- Да се синтезира множество от равнинни затворени и отворени, и моноконтурни пространствени структури, подходящи за проектиране и изработка на гръбначен стълб на робот аналог на гущер;
- Да се съставят модели за теоретични и симулационни изследвания на движението на предложените структури и да се направи оценка за качествата им;
- Като се използват разработените от докторанта маг. инж. Б. Петров крака, да се проектира и разработи модел на робот [Петров, 2017];
- Да се проведат симулационни и експериментални изследвания на краченето и да се оценят постигнатите положителни и негативни резултати.

ГЛАВА 2. СТРУКТУРЕН СИНТЕЗ И АНАЛИЗ НА ГРЪБНАЧЕН СТЪЛБ

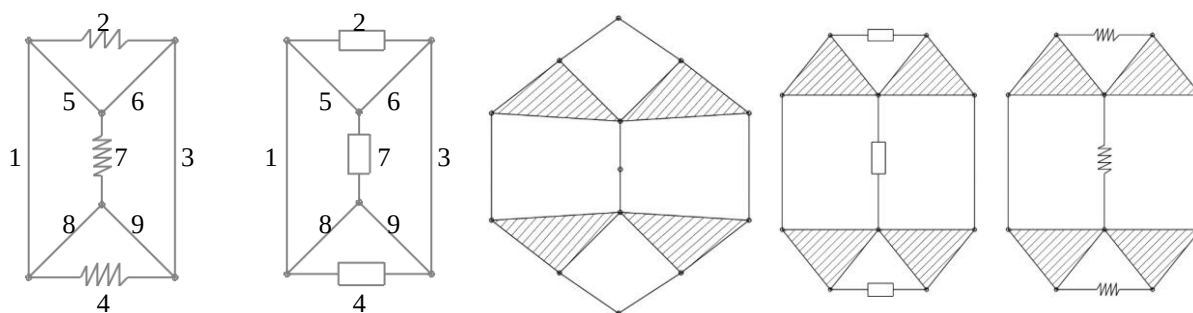
Роботът трябва да се движи в неопределена среда, събирайки информация за недостъпни и/или опасни за човека места чрез използването на определен набор от сензори. Това определя и изискванията към механичния гръбначен стълб, който трябва да е същевременно лек и достатъчно гъвкав. Приетите относителни габаритни размери на робота са 200 mm x 300 mm x 500 mm (В x Ш x Д). Стремешът при копирането на биологичния прешлен е да се избегне неговата сложна форма, но да се запази функционалността му.

2.1. Множество на възможните решения – равнинни и пространствени

Възможните решения, които са представени в тази глава са равнинни и пространствени. За тяхното създаване беше нужно да се анализира и разбере ролята на различните гръбначни мускули при гущерите. Разгледани са механизмите на изкуствено създадени структури на роботи, имитиращи гръбначен стълб. Структурите, които са показани в тази глава, са интересни и от гледна точка на приложението им в различни случаи, свързани не само с конкретната цел, а и с използването им в други серийни и паралелни структури на роботи. Една част от разгледаните схеми извършват движения в равнината, а други в пространството. Равнинните механизми са съставени от отделни звена, като някои от тях са свързани посредством еластични елементи (пасивни степени на свобода), а други имат активни степени на свобода, задвижвани от двигатели. Целта на механизмите с еластични елементи е да реализират относително преместване и/или завъртане на система от последователно свързани звена чрез прилагането външна сила и/или момент. Тяхното движение изцяло зависи от външни фактори. Характеристиките на еластичните елементи се подбират спрямо прилаганите натоварвания и функциите, които трябва да изпълняват. Когато бъдат деформирани, те акумулират енергия. Така съхранената потенциална енергия, може да бъде използвана за преместване на звената и възстановяване на равновесното положение. При механизмите с активни степени на свобода реализирането на относително преместване и/или завъртане е изцяло контролирано и определено. По този начин могат да бъдат постигнати точни премествания, за сметка на използвана двигателна енергия.

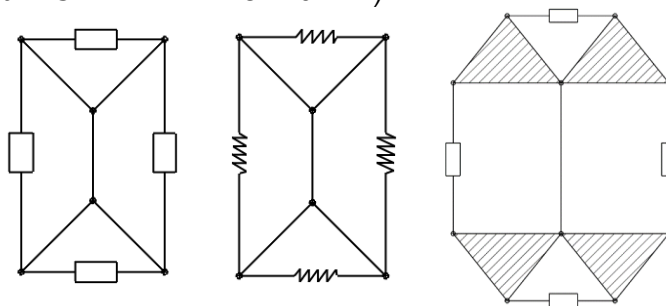
2.1.1. Възможни решения, действащи в равнина

За целта ще бъде разгледано множество на възможни решения в равнината. Механизмите, които са показани са затворени контури с бинарни звена и P_5 кинематични двоици:



Фиг. 2.1 Кинематични схеми на затворени контури с P_5 кинематични двоици.

Степените на свобода на тези структури са три ($h = 3 * 11 - 2 * 15 - 0 = 3$). Структурите съдържат бинарни и тернарни звена. При така направената примерна симулация за установяване на поведението при движение на цялостната структура, е възможно част от движението на звената да се ограничи механично. Следващите структури са сходни, но с четири степени на свобода. ($h = 3 * 12 - 2 * 16 - 0 = 4$).



Фиг. 2.6 Равнинни механизми с бинарни и тернарни звена с четири степени на свобода.

Проведените компютърни симулации дават добри резултати. Основният недостатък обаче остава това, че подобен тип гръбначни сегменти са изградени от няколко звена. Това води до усложняване на общата конструкция на евентуален гръбначен стълб, намаляване на надеждността и по-трудна проверка при възникване на проблем.

Досега обсъдените механизми и възможни гръбначни сегменти са от затворен тип в равнината притежават точков контакт. По-долу са разгледани отворени структури. Едно от възможните решения представлява поредица от компоненти в една линия, като те са свързани чрез нишка, която в краищата е обтегната с пружини. Елементите в средата и края притежават изпъкнала геометрия, като повърхнината, по която контактуват е цилиндрична. Във всеки един момент контактът между два прешлена е права. За извиването на подобен тип структура е нужно прилагането на външна сила и/или момент. Друго възможно решение е, ако звената притежават прешлени с изпъкнала и вдлъбната геометрия. Поради тази причина в зависимост от радиусите на кривините на всеки от прешлените, контактът може да бъде, както в права, така и в повърхнина. Трето решение от подобен характер (маркирано като X_1 в табл. 2.3) може да представлява гръбначен стълб с две управляеми нишки, които свързват прешлените. Чрез нишките се осъществява по-лесно управление на цялата структура. При опъването на едната и отпускането на другата нишка може да се получи желаното извиване на системата от звена. И тук контактът между два прешлена е в права.

Друг вариант може да бъде видян (табл. 2.3, маркиран като X_2) две зъбни колела или сектори от колело с нарязани зъби са зацепени. Едното колело предава движението на другото. Получават се точни премествания, когато се приложи външна сила и/или момент. При премахване на приложената външна сила, еластичните елементи връщат механизма в равновесно положение. Недостатък на тази схема е сложността на изработка на зъбните колела. Друг недостатък е, че трябва да се осигури двигател за всяко задвижващо колело във всеки гръбначен сектор. Това означава, че подобен тип гръбначен стълб, изграден от тези механизми, би изисквал значително повече енергия, спрямо предишните варианти.

Друг интересен вариант е този показан в табл. 2.3, маркиран като X_3 , при който прешлените са съставени от полусферични участъци. Всеки елемент притежава три проходни

отвора с успоредни оси. Контактът между два прешлена е в точка. Нишки преминават през отворите, като движението на им се управлява от двигатели. Когато една от нишките бива изтеглена другите се разпъват/удължават. Така системата позволява извиване на прешлените в пространството. Недостатък на тази система е, че нишките са прекалено близо до контактната зона. Така използваната сила при издърпване на нишките трябва да е по-голяма, за да може полученият момент да завърти елементите.

Различна е идеята, която е засегната при гръбначен стълб, който използва звена във формата щипки, показана в табл. 2.3, маркиран като X_4 . При него движението вляво и вдясно или, иначе казано, в две противоположни направления, се осъществяват през едно звено от механизма. Прешлените щипки са разминати така, завъртането в една от посоките става чрез няколко звена, които не са последователни и могат да извършват завъртане само в тази посока. Модификация на горния вариант за тази структура е при използване на същите звена, осите на завъртане да са на една линия. И при двата варианта е важно да се отбележи, че около осите на завъртане на дадено прешленно звено има налична торсионна пружина. Тя държи звената в равновесно положение. За завъртане на гръбначния стълб в една или друга посока е необходимо прилагането на външна сила и/или момент. В момента, в който тази сила престане да действа еластичните елементи връщат структурата в равновесно положение.

Отчитайки ролята на гръбначните мускули и тяхното разположение, бяха създадени прешлените и структури на гръбначен стълб, показани в табл. 2.3, маркирани като X_5 и X_6 . На X_5 се вижда детайл на прешлен, който има три лъча. Във всеки от тях има пробит по един проходен отвор с цел през него да преминава задвижваща нишка. Прешлените трябва да са подредени последователно, за да образуват система гръбначен стълб. Контактът между прешлените се осъществява, когато изпъкналата полусфера на предната страна на даден прешлен се помести във вдлъбнатата полусфера на задната страна на друг прешлен. Полусферата на гърба на прешлена е с по-голям диаметър от тази отпред, като в допълнение е и по-плитка. Получава се сферична става, която позволява движение по трите оси. Движенията са ограничени, но съществува хлабина, която позволява известна „свобода“ между прешлените. За да се ограничи относителното движение на прешлените един спрямо друг, между всеки два има поставени 3 еластични елемента – пружини. Задвижващите нишки преминават през пружините. Така създадената система е с пасивни степени на свобода, поради поставените пружини. При завъртане на гръбначния стълб в една или друга посока, пружините равномерно разпределят приложената сила между прешлените и връщат системата в устойчиво право равновесно положение. Принципът на 4R прешлена е като този на 3R. Този прешлен има четири отвора, през които преминават нишки. Получената сферична става между два прешлена също има 3 степени на свобода. Еластичните елементи, които се слагат между прешлените, когато се сглобява системата са четири на брой. Гръбначният стълб, съставен от 4R модули има по-голяма стабилност, но и по-голяма маса при сравняване на общите параметри.

Използването на ребра при проектирането на общата конструкция на гръбначния стълб не е лишено от смисъл. Точно затова в един от вариантите за конструкция на прешлена могат да бъдат добавени форми с функцията на ребра. Въпреки че роботът няма органи, които ребрата да предпазват, те могат да се използват като места, през които да минават задвижващите нишки или изкуствени мускули. Допълнително, заграденото пространство може да се използва и за поставяне на други елементи като управление, сензори, батерии и др. Погледнато от чисто механична гледна точка, ребрата са най-отдалечени от гръбначния стълб и съответно с използването на малка сила може да се създаде достатъчно голям момент, който да завърти цялата конструкция. Така би се пресъздавала по-точно функцията на *hyaraxial* мускули като *external oblique* при гущерите.

Разбира се формата на ребрата може да е разнообразна. В някои от случаите формата на ребрата е отворена, а в други – затворена. Затворената форма има предимство, че загражда изцяло затворена зона и така позволява в нея да бъдат поставени различни устройства. От друга страна отворената форма има по-малка маса, което също е предимство. Различните форми на ребрата могат да променят и общата конструкция на робота. От техния избор зависи

дори и евентуалната промяна на цялостната структура на системата на гръбначния стълб, осигуряваща необходимата гъвкавост в робота аналог на гушер. В табл. 2.3, маркирани като X_7 е показан вариант на прешлени, съставляващи гръбначен стълб, включващ ребрена структура.

Недостатък на такъв тип структури е усложняването на конструкцията от гледна точка на свързването на звената. Поради факта, че ребрата се намират далече от еластичните елементи, може да се породят нежелани удари между звената при движение. В тази посока могат да се създадат подоброени варианти на тези структури, при които част от еластичните елементи да бъдат поставени и по отдалечените участъци. От чисто биологична гледна точка гръбначните животни имат, както отворени структури на ребрата, така и затворени. По този начин комбинирани ребрата не ограничават движението на животните в определени зони и същевременно предпазват жизнено важни органи.

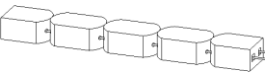
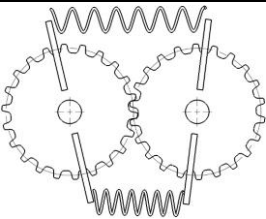
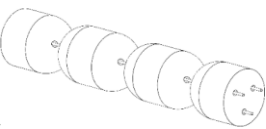
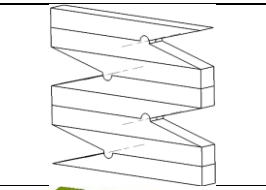
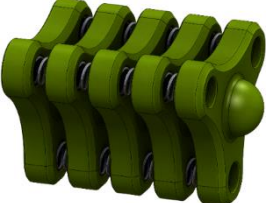
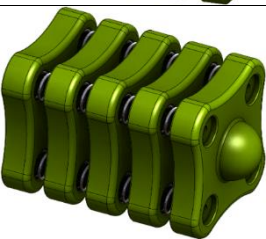
От тук беше преминато към друг тип форма, но със сравнително близка функционалност. Изображенията в табл. 2.3, маркирани като X_8 показват формата на друг тип прешлен. На тях се вижда, че отново има три проходни отвори за преминаването на нишките, с които се задвижва гръбначният стълб. Създадени са и легла за еластичните елементи, които ще връщат структурата в нормалното положение след прилагането на външна сила и/или момент. Като маса и размери прешленът е по-голям в сравнение със своя предшественик. Този модел е съставен от две части – горна и долна. Идеята е по-този начин да се намали общата маса и да има възможност в него да се поставят различни елементи, свързани с управлението, както на гръбначния стълб, така и на робота гушер. Предната и задната част на прешлена са оформени така, че да се ограничи част от ротацията във вертикалната равнина, както при биологичния аналог. Разгледани са биологични прешлени и начините им на свързване при гушери. Това, което се забелязва е, че прешлените не контактуват един с друг нито чрез сферични стави, нито чрез прости равнинни повърхнини. Междупрешленният диск се намира в долната част на прешлена като способства за омекотяването на шокони натоварвания и същевременно спомага за това прешлените да не се допират в тази част. Същинският контакт се осъществява по сложни повърхнини в горната част, където се намират израстъците. Всеки прешлен притежава два израстъка и две легла за тях. Израстъците на първия прешлен контактуват с леглата на задния прешлен. Сложната им форма способства за това тези израстъци да се движат като по направляващи. По този начин се ограничава извиването на гръбначния стълб в обратна посока (нагоре) и се поддържа добра стабилност. С оглед на тези особености бе създаден и следващият модел прешлен, който е много по-близък до биологичния аналог.

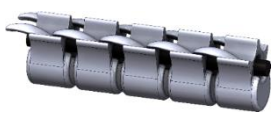
В табл. 2.3, маркиран като X_9 е показан нов тип структура, която е по-близка до биологичния аналог. В междупрешленното пространство е поставен силиконов диск, който имитира функциите на хрущял и същевременно омекотява и демпферира конструкцията. Прешленът е монолитен и не се разглобява. За разлика от D прешлена, този има само един проходен отвор по средата. От друга страна сложната форма на израстъците е постигната с идеята да се имитира възможно най-много начина на свързване между прешлените в гръбначния стълб на животното. Тези елементи на предния прешлен се разполагат в леглата на задния прешлен. От чисто функционална гледна точка тези израстъци играят ролята на ограничители и пречат за обратното извиване на гръбнака. В допълнение внасят коравина в системата в определеното направление и способстват за образуването на характерната форма на кобилица на гръбначния стълб. Поставянето на гъвкав елемент в средата (на мястото на костния мозък) не лишено от смисъл. По този начин конструкцията би станала гъвкава и същевременно този елемент ще връща гръбначния стълб в изходна позиция при внесени външни сили и/или моменти. Задвижването при този тип гръбначен стълб може да става чрез изкуствени мускули, поставени от двете страни на гръбначния стълб. Това би направило конструкцията изключително компактна и същевременно проста, лека и гъвкава.

2.2. Избор на оптимален вариант

Изборът на оптимален вариант е извършен по два начина. Първият се базира на качествено сравнение и анализ на предимствата и недостатъците на алтернативните варианти на гръбначен стълб за робота аналог на гущер. В това сравнение са изключени равнинните решения, тъй като ще бъдат анализирани само модели в тримерното пространство, които са обект на разработката.

Табл. 2.3 Качествено сравнение на възможните решения за гръбначен стълб на робот аналог на гущер.

	Възможно решение	Предимства	Недостатъци
X ₁		Изключително проста конструкция; лесна изработка	Директен контакт между прешлените в линия; липса на еластични елементи между прешлените; плътни компоненти;
X ₂		Сравнително проста конструкция; предвидимо преместване	Сложна изработка; няма аналогия с биологичния прешлен и особеностите на контакт между прешлените в гръбначния стълб; възможност за преместване само в една равнина
X ₃		Проста конструкция; лесна изработка	Директен контакт между прешлените в точка; липса на еластични елементи между прешлените; плътни компоненти; трудно управление
X ₄		Проста конструкция; лесна изработка	Възможност за преместване само в една равнина; необходимост от използване само на четен брой прешленни звена
X ₅		Сравнително проста конструкция; възможност за завъртане в различни направления; по-малка маса спрямо 4R и прешлени с ребра	Директен контакт между прешлените по сложна за изработка сферична повърхнина; липса на сферични стави в гръбначния стълб на биологичния аналог
X ₆		Сравнително проста конструкция; възможност за завъртане в различни направления	Директен контакт между прешлените по сложна за изработка сферична повърхнина; липса на сферични стави в гръбначния стълб на биологичния аналог; по-голяма маса спрямо 3R прешлените
X ₇		Възможност за завъртане в различни направления; възможност за поставяне на допълнителни компоненти в зоната, заградена от ребрата	По-сложна конструкция спрямо 3R и 4R прешлените; директен контакт между прешлените по сложна за изработка сферична повърхнина; липса на сферични стави в гръбначния стълб на биологичния аналог; по-голяма маса спрямо 3R и 4R прешлените

X₈		Най-малка маса от всички останали показани решения поради това, че прешлените са кухи; възможност за поставяне на допълнителни елементи в прешлените; по-близък като форма до биологичния аналог	Сложна за изработка конструкция по традиционните методи; липса на контакт между прешлените и възможност за удари
X₉		Монолитна структура; наличие на еластичен елемент, по който контактуват прешлените; най-близък до биологичния аналог от всички представени решения	Сложна за изработка конструкция и форма; липса на решение, свързано с управлението на гръбначния стълб; възможни усложнения произтичащи от това

На база на първия начин може да се избере като оптимален вариантът X₈, тъй като при него имаме най-малка маса спрямо желаните размери за работа аналог на гушер. Също така този вариант притежава възможност за относително преместване във всички равнини и наличие на пасивни елементи. От друга страна неговата модулност позволява да се поставят допълнителни елементи в конструкцията, свързани с управлението на работа.

Вторият начин за избор на оптимален вариант се базира на приложението на известен метод на бинарните сравнения [Malakov, et al., 2016]. За целта първо се избират критериите за оценка на възможните варианти и се определя тяхната значимост (приоритет, относителна важност). За избор на оптимален вариант се предлагат следните критерии: F₁ – маса; F₂ – пригодност за изработване; F₃ – относително преместване във всички равнини; F₄ – аналогия с биологичния вариант; F₅ – брой прешлени за достигане на желаните параметри; F₆ – наличие на пасивни степени на свобода. Избраните критерии са независими и позволяват комплексна оценка на алтернативните варианти. Според извършената оценка приоритетът на критериите е както следва: F₁ > F₅ > F₃ > F₄ > F₆ > F₂. Следва сравнение по двойки на всички варианти (X₁–X₉) последователно по всеки един от избраните критерии. В резултат на това се определят коефициентите на тежест и подреждането на критериите по важност по съответния критерий. Според направените анализи подреждането по важност на вариантите по критерий F₁ – маса е както следва: X₈ > X₉ > X₁ > X₅ > X₆ > X₃ > X₂ ≈ X₄ > X₇. Подреждането по важност на вариантите по критерий F₂ – пригодност за изработване е както следва: X₁ > X₃ > X₄ > X₅ > X₆ > X₈ > X₉ > X₇ > X₂. Подреждането по важност на вариантите по критерий F₃ – относително преместване във всички равнини е както следва: X₅ ≈ X₆ > X₃ ≈ X₈ > X₇ > X₉ > X₁ > X₄ > X₂. Подреждането по важност на вариантите по критерий F₄ – аналогия с биологичния вариант е както следва: X₉ > X₈ > X₇ > X₅ > X₃ ≈ X₆ > X₁ > X₄ > X₂. Подреждането по важност на вариантите по критерий F₅ – брой прешлени за достигане на желаните параметри е както следва: X₈ > X₉ > X₁ > X₃ > X₅ ≈ X₆ ≈ X₇ > X₄ > X₂. Подреждането по важност на вариантите по критерий F₆ – наличие на пасивни степени на свобода е както следва: X₅ ≈ X₆ ≈ X₇ ≈ X₈ > X₉ > X₄ > X₂ > X₁ ≈ X₃. В дисертацията са показани резултатите от многокритериалната (комплексната) оценка на възможните варианти по избраните критерии. Подреждането (ранжирането) на възможните варианти по съвкупността от избраните критерии е както следва: X₈ > X₉ > X₅ > X₃ ≈ X₆ > X₁ > X₇ > X₄ > X₂.

На база на определените приоритети на критериите и след оценка на възможните варианти по тях, за създаването на прототип на работа гушер се избира вариант X₈ – D прешлен, който участва в структурата на гръбначния стълб.

2.3. Работни пространства

За коректното разглеждане на работното пространство на гръбначния стълб на работа аналог на гушер е създаден и добавен раменен и тазов пояс. Според изискванията гръбначният стълб на прототипа е изграден от три D прешлена и са добавени раменен и тазов пояс със сходна форма. Тяхната функционалност, форма и особености ще бъдат пояснени в следваща глава. За

по-лесното представяне на работната зона на гръбначния стълб някои маловажни елементи са премахнати.

От схемите в дисертационния труд се вижда, че всеки един прешлен може да се завърти в една посока максимално с 20° спрямо съседен прешлен. Ограничението в ъгъла на завъртане е чисто механично. Максималното завъртане на гръбначния стълб вляво или вдясно е 80° . Във вертикално направление се вижда, че всеки един прешлен може да се завърти в посока надолу максимално с 10° спрямо съседен прешлен. В обратната посока нагоре ограничението е 3° , като в крайните участъци това ограничение е по-голямо – 5° в задния край. По-малкият ъгъл на завъртане в посока нагоре е обусловен от формата на прешлена. При биологичния аналог има сходно ограничение. Израстъците на биологичния прешлен от горната страна пречат на прекаленото огъване на гръбначния стълб и неговото прекъсване. По-този начин се осигурява формата на кобилица на гръбначния стълб. Максималното завъртане на показания гръбначен стълб в това направление е 54° .

ГЛАВА 3. КИНЕМАТИЧЕН И КИНЕТОСТАТИЧЕН АНАЛИЗ

3.1. Позиционни задачи на движението на структурата на робота

За изследването на структурата на гръбначния стълб и робота, както и принципната му схема и начините на задвижване, са нужни симулационни изследвания. Идеята е чрез тях да се разгледат различни възможности за организация и движение на събраните структури. В настоящата глава се разглеждат най-вече кинематичните и силови възможности на избраните структури.

Синтезът на равнинни модели на гъвкаво тяло, имитиращо поведението на гръбначен стълб при движение, се извършва по общите принципи на структурно-метричния синтез. Изкуството за постигане на желания ефект по отношение на гъвкавостта на движението с възможно най-опростената структура минава през добро описание на функционалната задача. Естествено това няма как да се постигне без системно изследване на влиянието на базови метрични и структурни параметри върху гъвкавостта на движението.

Компонентите, които съставляват гръбначния стълб и конструкцията на робота са силно опростени за целта на симулацията. Изследваните схеми са в хоризонталната равнина за по-голямо опростяване. В този тип изследвания са взети разположението на краката – опорни и задвижвани, както раменния и тазов пояс и прешлените. В симулациите не участват опашката и главата, тъй като тяхното влияние може да се пренебрегне поради това, че изследванията са правени в хоризонталната равнина, където се изключва наличието на гравитация.

При синтеза на конкретните структури е прието звената, формиращи аналога на гръбначния стълб да имат еднаква дължина, както са прешлените в определени сектори на гръбначния стълб на животните, в това число и човека. В хоризонталната равнина, при покой (няма движение и някаква специфична устойчива стационарна позиция), кинематичната верига образува права линия (във вертикалната равнина обикновено е изпъкнала спрямо хоризонта крива). Използвани са еластични шарнири, чието равновесно положение изпълнява това условие.

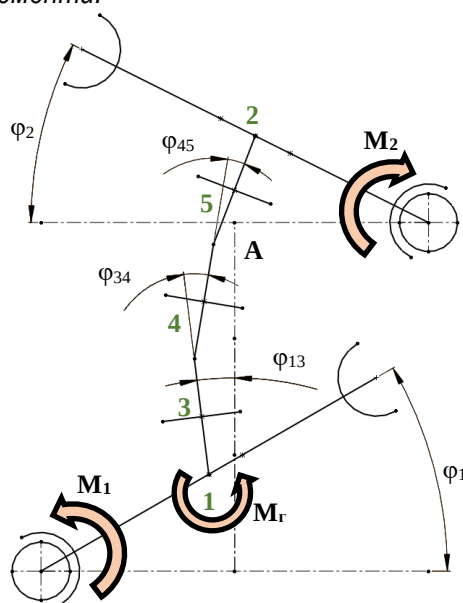
Четири крака на робота са разположени върху преден и заден пояси, като връзката е с активно управлявани шарнири, с ос перпендикулярна на хоризонталната равнина (както всички останали). Връзката на гръбначния стълб с поясите е също с активни шарнири (в определени случаи може само единият да е активен, а другият – свободен).

Нормално краката имат повече от една степен на свобода (най-често три пълноценни, а понякога и повече), но в случая е прието една, тъй като се изследва гъвкавостта на гръбначния стълб и по-точно търсене на минимален брой степени на свобода, които осигуряват достатъчна гъвкавост. При това ограничение се прави оценка за възможностите за преместване на робота при избрани схеми на движение на краката.

Повдигането на крак в моделите се илюстрира с освобождаване от стойка, а преместването може да се получи чрез прилагане на моменти, съответстващи на степените на

свобода на получения механизъм. Геометрично това може да се получи и чрез определен ъгъл на завъртане – абсолютен респективно относителен. Освен активните (управлявани) моменти в кинематичната верига и по-точно в еластичните шарнири, възникват еластични моменти. Опростена схема представлява гръбначен стълб погледнат отгоре. Фиксираните крайници са означени с окръжност. Еластичните елементи са разположени от двете страни на гръбначния стълб, така че да уравниравяват структурата и да я връщат в начално положение след приложена външна сила и/или момент. Краченето, както е известно може да се реализира с повдигане на един крак и изреждане в планирана последователност на два противоположни или четири крака (при галоп – повдигане и приземяване по различни схеми). Някои от схемите не позволяват движение при повдигане на един крак („твърдо” тяло), а следващите разрешават, но геометрията при малък брой степени на свобода (1-2) не е достатъчно гъвкава. При достатъчен брой може да се реализира квази дъга и/или контур с инфлексия.

Моделът, показан на фиг. 3.1, който има три степени на свобода ($h = 3$), дава възможност да се направят необходимите разсъждения за възможните инженерни решения при кинематични вериги, съдържащи пасивни степени на свобода. В дисертацията са разгледани различни варианти на еластичните елементи.



Фиг. 3.1 Схема на движение на гръбначния стълб, съставен от три прешлена ($h = 3$) и при два стъпилни крака.

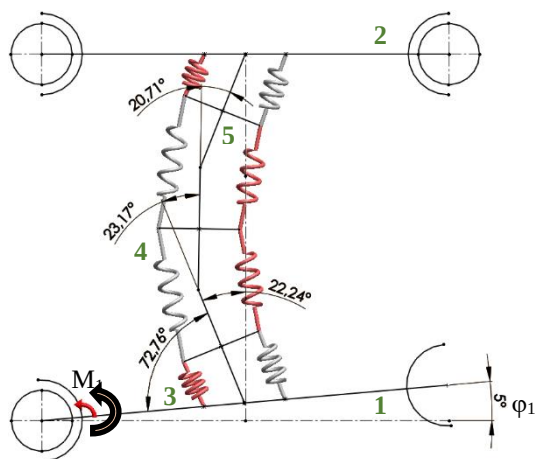
Възможно е положение при действие само на момент в гръбначния стълб M_G , т.е. необходимо е дефинирането на три начални условия.

- $h = 3$ случай; M_1 , M_2 и M_G респективно ϕ_1 , ϕ_2 и ϕ_{23} определят еднозначно конфигурацията на структурата;
- На база на ъглите ϕ_{34} и ϕ_{45} се определят еластичните моменти в съответните стави съобразно коравините C_{34} и C_{45} (възможен вариант $C_{34} = C_{45}$)

Разгледани са различни схеми с три стъпилни крака и такива с два стъпилни срещуположни крака. Също така е разгледана обща схема на равнинния модел на робота гуцер с n на брой звена. Минималният брой прешлени, който е избран за изследване на схемите е с три звена.

3.2. Двигател в кинематична двойка 0-1 (задвижващо звено).

За симулирането на различни варианти на задвижване и поведение на механизмите са проведени серия от различни изследвания. Тяхната цел е да се разгледат възможните премествания, които се осъществяват при задвижване на едно или друго характерно звено от механизма. Проведените симулации са с времетраене от 10 секунди. Приложеният момент/сили действат в рамките на първите пет секунди като след това биват премахнати. В петата секунда са записани характерни параметри, свързани с движението на механизма.



Фиг. 3.9 Положение на звената и характерни ъгли от механизма в пета секунда от симулацията. Има приложен въртящ момент около левия неподвижен крак. Зададено е завъртане на ъгъл ϕ_1 от 5° . След петата секунда престава действието на приложения момент.

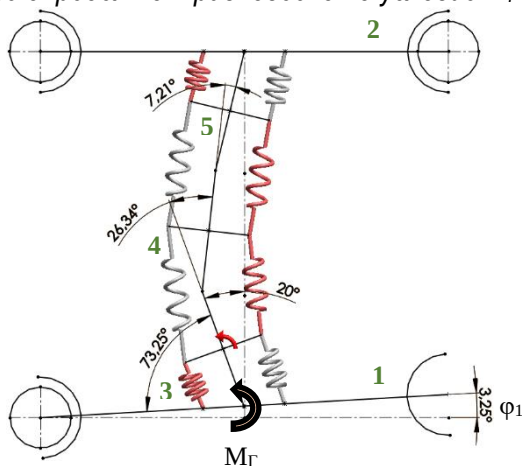
Приложеният момент е в звено 1, като завъртането се осъществява около левия неподвижен крак. След спирането на действието на приложения момент, еластичните елементи връщат механизма в равновесно положение. Целта на симулацията е да се провери движението и преместването на всяко едно от звената, когато те са свързани с еластични елементи. Има приложен въртящ момент около левия неподвижен крак. Зададено е завъртане на ъгъл ϕ_1 от 5° . След петата секунда престава действието на приложия момент.

Всяко едно от показаните звена на симулацията, макар и в 2D, има зададена маса, съответстваща си с тази на детайла от 3D модела. Това е направено с идеята симулацията да е максимално близка като параметри до тези, които ще бъдат разгледани при изследването на по-сложния модел на гръбначен стълб. Звеното на прешлена е с маса от 29,87 g, докато звеното на раменния и тазов пояс е с маса от 43,92 g.

Максималният въртящ момент в началото на симулацията достига стойност от 7,22 N.m, а консумираната енергия е с максимална стойност от 0,021 W.

3.3. Двигател в кинематична двойка 1-3 (момент в гръбначния стълб).

В този вариант има приложен въртящ момент в звено 3 от гръбначния стълб. Зададено е завъртане на звено 3 от 20° . Изходът от сингулярната конфигурация се определя от посоката на момента, приложен в гръбначния стълб M_G . Неопределеност съществува в останалата част на структурата (кинематични двойки 3-4 и 4-5). При еластични шарнири 3-4 и 4-5 конфигурацията е определена, а ъгълът ϕ_1 се определя от равновесното условие $M_G = M_{E1} + M_{E2}$.

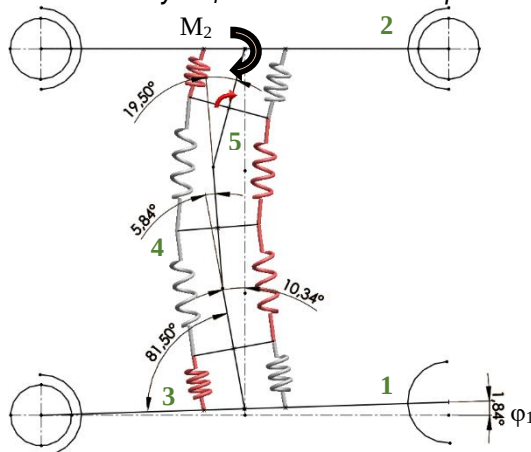


Фиг. 3.15 Положение на звената и характерни ъгли от механизма в пета секунда от симулацията. Има приложен въртящ момент в звено 3 от гръбначния стълб. Зададено е завъртане на звено 3 от 20° . След петата секунда престава действието на приложия момент.

Максималният въртящ момент в началото на симулацията достига стойност от 0,22 N.m, а консумираната енергия е с максимална стойност от 0,020 W.

3.4. Двигател в кинематична двойка 2-5 (момент в гръбначния стълб и фиксираното звено).

При този вариант има приложен е момент M_2 между фиксирания раменен пояс и последния прешлен (връзка 2-5). При този тип симулации звено 5 се завърта на 15° .



Фиг. 3.21 Положение на звената и характерни ъгли от механизма в пета секунда от симулацията. Има приложен въртящ момент в звено 5 от гръбначния стълб. Зададено е завъртане на звено 5 от 15° . След петата секунда престава действието на приложения момент.

Максималният въртящ момент в началото на симулацията достига стойност от 0,18 N.m, а консумираната енергия е с максимална стойност от 0,012 W.

Един от възможните методи за задвижване на гръбначния стълб е той да бъде изцяло пасивен, т.е. задвижван от движението на раменния и тазов пояс. Друг възможен вариант е използването на изкуствени мускули. Използването на пневматични мускули в мобилни роботи е едно елегантно решение, но е трудно осъществимо за конкретната задача. Това е така, защото е нужно захранващо звено, което да поддържа постоянно налягане за работата на мускулите. В допълнение това би затруднило изключително много мобилността на робота към този момент.

Основната идея, която остава като решение за настоящия проект е използването на задвижващи нишки. Двигателите, които ги движат трябва да се намират в раменния или тазов пояс. Минималният брой двигатели, които могат да се поставят в тях са два – един управляващ горните нишки и един за долната. Това решение е продиктувано от търсенето на простота на изпълнение.

ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРАНЕ НА ГРЪБНАЧЕН СТЪЛБ

4.1. 3D проектиране на звена и кинематични съединения – програми и готови програмни продукти

В днешно време проектирането и конструирането на дадено изделие е немислимо без използването на програмни продукти, които да подпомагат работата на инженера конструктор. На база създадените виртуални триизмерни математически модели е възможно да се направят компютърни симулации, които значително да намалят времето за разработка на изделието и същевременно да отговорят на ключови въпроси, свързани с поведението на продукта в реална среда. Това намалява нуждата от физически прототипи, ускорява процеса и намалява средствата отделени за създаване на установки за изпитание. С тяхна помощ е възможно да се проведат значително по-сложни изследвания и изчисления, които иначе биха били изключително времеемки, скъпи и дори невъзможни.

4.1.1. Програми и програмни продукти

Проектирането на компонентите в дисертационния труд, както направените изследвания, кинематични и силови изчисления, фотореалистични визуализации, конструктивна документация и пр. на избраните схеми са направени чрез CAD системата SOLIDWORKS. За кинематичните и силови симулации е използвано приложението за физическо симулиране SOLIDWORKS Motion и SOLIDWORKS Simulation.

4.1.2. 3D проектиране на звена и кинематични съединения

Тук се разглеждат компонентите, които заместват елементите, изграждащи по-голямата част от скелетната структура на гущерите. Разглежда се начинът, по който се осъществява свързването на краката, главата, опашката и поясите с гръбначния стълб. Също така се засяга и проблемът със задвижването – какви двигатели да се изберат, как да се разположат и къде да се поставят батерии за захранването им. Накрая се разглеждат конструктивните особености на раменния и тазов пояс на робота.

Опашката при гущерите служи най-често за балансиране, както при повечето животни. При някои гущери, обаче опашката може да бъде отделена от тялото с цел да разсее нападателя, докато животното избяга. В дисертационния труд структурата на опашката е добавена с цел баланс на конструкцията. Опашката се състои от три компонента, всеки от които има горна и долна част. Всеки един елемент е кух отвътре като идеята е по този начин конструкцията да се олекоти. В свободните пространства има възможност да се добавят допълнителни компоненти, свързани с управлението или сензориката на робота. Профилът на всеки един опашен елемент е заимстван от профила на прешлена. Целта е да се постигне един ясен и сравнително изчистен дизайн на преливане на формата. Управлението на опашката е подобно на това на гръбначния стълб.

Главата на робота наподобява тази на биологичните аналози. Този компонент служи както за цялостния вид на конструкцията, така и за баланс. Компонентът е кух отвътре като в него могат да се поставят както части от управлението, така и миникамера или различни сензори. Главата, подобно на опашката, се задвижва с три нишки и контактува с раменния пояс чрез пружини. В изследванията главата не се движи, за да се улеснят симулационните изчисления.

Раменният пояс копира основната форма на прешлените, както останалите компоненти в структурата на робота. Особено при този пояс е, че тук са добавени странични конзолни елементи, към които да се захванат краката. От горната им страна са направени легла за двигателите. Раменният пояс също се задвижва с три нишки. В раменния пояс има специално обособени легла за пружините. Компонентът е съставен от две части с цел да бъде лек и в него да могат да се поставят различни компоненти свързани с управлението и захранването. Разликата между тазовия и раменен пояс се изразява единствено в специално създаденото легло за двигателя в тазовия компонент. Този двигател има за цел да завърта нишките и същевременно да разменя местоположението им. Лява нишка от гръбначния стълб преминава в дясна към опашката, а дясна нишка от гръбначния стълб – в лява към опашката. По този начин нишките биват кръстосани, като с това се използва само един двигател, който да ги движи, намалява броя активни степени на свобода и общата консумирана мощност от робота гущер. Долните нишки са статични и предварително опънати, осигурявайки извит гръбначен стълб с форма на кобилица, като при биологичния аналог.

Д прешленът има три проходни отвора за преминаването на нишките, с които се задвижва гръбначният стълб. Прешленът притежава шест легла за еластичните елементи, които връщат структурата в нормалното положение след прилагането на външна сила и/или момент. Всички компоненти в гръбначния стълб са съставени от две части – горна и долна. Идеята е по-този начин да се намали общата маса и да има възможност в него да се поставят различни елементи, свързани с управлението на гръбначния стълб и на робота гущер. Предната

и задната част на прешлена са оформени така, че да се ограничи част от ротацията във вертикалната равнина, както при биологичния аналог.

Захващането между горната и долната част на прешлените, раменния и тазов пояс, елементите на опашката и главата е аналогично. Елементите се сглобяват по борд/жлеб и горната част влиза в долната част на компонента. Също така, за да се осигури постоянно захващане между елементите са добавени и кукички за сглобяване и захващане. Този метод осигурява лесна и бърза модификация на конструкцията без необходимост от специализирани средства и скрепителни елементи, като частите могат да се сглобяват с ръка.

Еластичните елементи в робота гущер L2 са подбрани според направените компютърни симулации. В прототипния модел на робота аналог на гущер, цилиндричните винтови пружини се използват основно за акумулиране на еластичната енергия, затваряне на кинематичната верига, създаване на постоянно действащи сили и намаляване (демпфериране) на нежеланите вибрации.

4.2. Избор на двигатели, сензори и управляващ блок

Двигателите в прототипната конструкция на робота аналог на гущер са подбрани след серия от експерименти, както и след сравнение с предишно разработени варианти на този проект. Основните параметри, свързани с избора на двигатели са засегнати в дисертацията на маг. инж. Борис Петров [Петров, 2017], в която са изчислени моментите и силите, необходими за движението на краката. Така е взето решение всички двигатели в прототипа да са еднакви, за да има взаимозаменяемост. Настоящите микро серво двигатели са на китайската фирма PowerHD и са по-добри от предишните основно от икономическа гледна точка, като предлагат и по-голям въртящ момент. Моделът HD-1581HB е с въртящ момент от 0,26 Nm, обхват 220° и максимална скорост 6,54 rad/s. По време на тестовете бяха закупени допълнителни двигатели HD-1810MG, които са наследниците на HD-1581HB, но с по-големи размери и същите характеристики. Масата е от порядъка на 15,8 g.

В прототипа на робота аналог на гущер не са поставени сензори, но техният вид и местоположение ще бъдат определени след като бъдат направени достатъчно много функционални тестове, свързани с движението на робота.

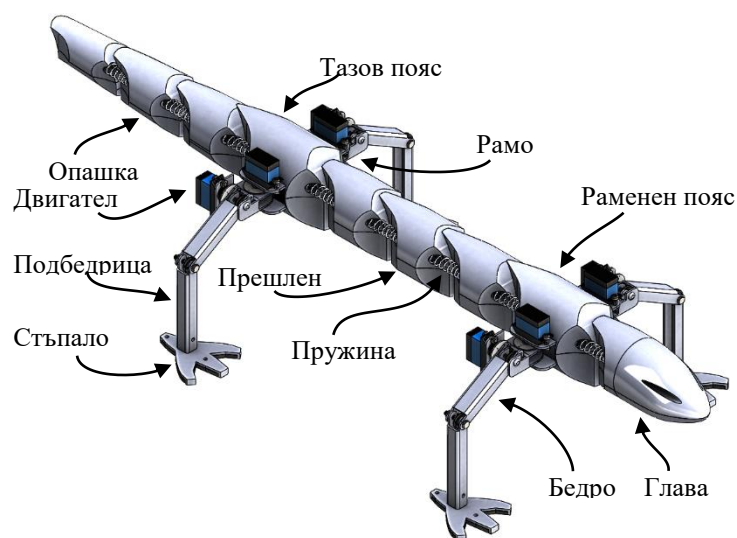
Управлението на робота се осъществява с помощта на 12 канален серво контролер на фирма Pololu – Mini Maestro 12-Channel USB Servo Controller. В него има вграден софтуер за управление на каналите [Pololu Corporation, 2001–2017], възможност за въвеждане на скрипт и също така може да се захранва от USB кабел или от 5V-16V батерия.

ГЛАВА 5. 3D ТЕХНОЛОГИЯ ЗА ИЗРАБОТКА НА ИЗБРАНИТЕ ПРОЕКТНИ РЕШЕНИЯ

5.1. 3D технология за изработка

Настоящите елементи на прототипа на робота са изработени по технологията FDM с 3D прототипиращи машини на Stratasys от сериите uPrint и F123.

Прототипният вариант и изработка на робота аналог на гущер с показаното решение за гръбначен стълб и разработените крака с адаптивни стъпала е сглобен и представен на фиг. 5.3. Всички елементи са сглобени, като са добавени краката, разработени в дисертационния труд „Крак с адаптивно стъпало на робот аналог на гущер“ на маг. инж. Борис Петров [Петров, 2017]. Добавени са и всички двигатели, нужни за правилното функциониране на робота гущер.



Фиг. 5.3 Модел на прототипа на робота гущер "L2".

Структурата на краката е опростена. По този начин може да се подложи по-лесно на симулация.

5.2. Оформяне и монтаж на характерни възли

Характерните възли, които са разгледани в тази глава са възлите на тазовия и раменен пояс. Именно тук се осъществява връзката между проектираните крака и останалата част от тялото на робота. В дисертационния труд предният пояс е този, който се разглежда пръв, както и начина на свързване на елементите рамо и раменен пояс. Горният двигател, управляващ движението напред и назад на крака, е прикрепен към раменния пояс, а роторът и фланецът му са закрепени към рамото. По този начин се осъществява движението в тази посока.

Показан е и частичен изглед отстрани на раменния пояс. На него е отбелязано как е закрепен и страничният двигател – двигателят, който премества бедрото. Той е захванат чрез винтове за рамото, а от своя страна фланецът му е закрепен към бедрото. Тъй като движението на подбедрицата е зависимо, може да се види и ролката, която участва при предаването на движението от бедрото към подбедрицата. Зависимото движение е осъществено с помощта на нишки. Вътре в тазовия пояс става смяната на управляващите нишки. Така лявата нишка на гръбначния стълб отива отдясно в опашката и обратно.

ГЛАВА 6. ФУНКЦИОНАЛНИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

В тази глава е представен изработеният вариант на прототипа на робота аналог на гущер. Проведени са серия от сложни пространствени компютърни симулации, свързани с поведението на системата в среда близка до реалната.

6.1. Симулация и заснети функционални движения

Тук се изследва и симулира пространственото движение на създадения примерен модел. Симулациите са създадени и изчислени чрез приложението SOLIDWORKS Motion. Целта на тези изследвания е да се копира възможно най-много походката и начинът на движение на живите гущери. Основната походка, която се реализира е 2x2 – два повдигнати и два стъпили крака.

Използвани са осем двигателя, които да задвижват четирите крака. Още един двигател е поставен в гръбначния стълб. Симулационните им модели са съобразени и зададени, така че да съответстват на конструктивно поставените. Зададено е зависимо движение между бедрото и

подбедрицата. По този начин стъпалото остава винаги успоредно на повърхността, по която се движи.

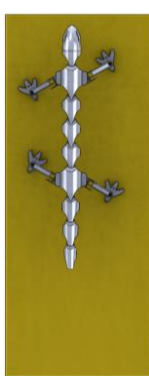
Важно е да се отбележи, че походката 2x2 е най-често срещаната в живата природа и следователно е и една от най-ефективните. По рядко се среща походка 3x1. Разликата между двете се изразява в това, че при 2x2 динамичното равновесие и баланс се осъществява по-трудно, но за сметка на това могат да се постигнат по-високи скорости на движение. При 3x1 краката се местят един по един в определена последователност (накръст), динамичният баланс е много по-лесно осъществим, което води до по-стабилно и сигурно движение. Недостатък на тази походка е ниската скорост на придвижване. Походката 3x1 се използва също в случаи при смяна на направлението на движение, завой и различни частни случаи като проучване на непозната среда и територия.

При симулациите е много важно да се има предвид масовия център на робота да попада в опорния многоъгълник. При ходене формата на този опорен многоъгълник се променя значително. Когато се вдигат двата срещуположни крака на гущерите, тялото се извива на една страна образувайки дъга, а опашката се извива на друга. Така цялата структура придобива форма на S, за да може масовият център да попадне в рамките на опорния многоъгълник.

Първата основна симулация протича със създаването на последователност на движението на краката. Целта е да се види как ще се движи роботът при вкоравен гръбначен стълб. По този начин могат да се извадят изводи затова, къде, колко и какви да са начините на извиване на гръбначния стълб в последствие. За да се осъществят симулациите, много от компонентите са опростени с цел по-лесни и бързи изчисления.

За осъществяване на краченето на робота е използвана специална последователност на движението на всеки един компонент, за да се постигне желаното преместване.

Табл. 6.1 Етапи на придвижване на робота при недеформируем гръбначен стълб.

						
Начало	1 секунда	2 секунда	3 секунда	4 секунда	5 секунда	5 секунда с гъвкав гръбначен стълб

В табл. табл. 6.1 са показани положенията на робота през ключови етапи от неговото движение. В първа секунда има преместени преден десен и заден ляв крак напред с 30°. Във втора секунда има едновременно преместване както на преден ляв и заден десен крак, така и създаване на обратен момент в рамената на първата двойка крака. На трета секунда се забелязва цялостно преместване отново на преден десен и заден ляв крак (пълен ход от 60°) със създаване на обратен момент. Четвърта секунда повтаря движението от втора при пълно преместване на краката от 60°. В пета секунда движението завършва, следейки вече създадения алгоритъм за движение на кръст (2x2).

Проведени са още две симулации, като при третата има допълнително усложняване на структурата. Добавена е гъвкавост в опашката. Добавените пружини съответстват като характеристики и начин на подредба на тези от гръбначния стълб. Също така са добавени и торсионни пружини. Основната разлика между първата и третата симулация, показана като последна колона в табл. 6.1, която се вижда с просто око е това, че при движение на робота и зададени едни и същи параметри, при втората симулация успява да измине по-голямо разстояние! Гръбначният стълб като едно уникално постижение на природата придобива смисъл дори и в един такъв опростен симулационен компютърен модел. Много лесно може да се отчете това, че

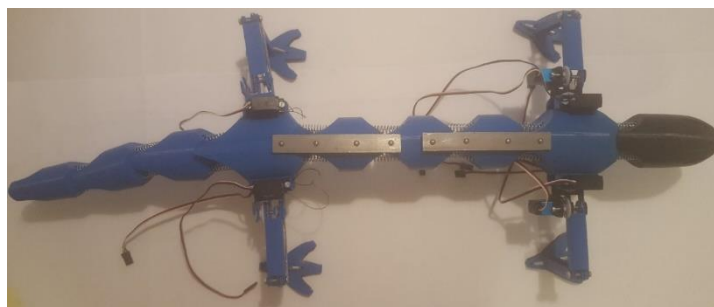
когато има наличие на гъвкава структура в тялото могат да се реализират много по-големи ходове и премествания. Тяхната стойност зависи от параметрите и геометрията на робота. Тези изводи могат да се използват не само при конструирането на мобилни роботи, но и различни системи свързани с производството и индустрията.

При тази симулация извиването на опашката също е ключово, тъй като по този начин се осъществява предаването на импулс по дължината на тялото. С предаването на енергията от предната към задната част на тялото, масовият център се премества. Преместването на масовия център и постигането на форма на S на гръбначния стълб води до по-добра стабилност при ходене.

6.2. Предложения за подобряване в прототипа на робота

Един от основните проблеми, беше свързан с трудното сглобяване. На места не бяха съобразени достатъчно големи разстояния между елементите, така че те да могат да бъдат сглобени лесно и удобно без затруднения. Този недостатък беше трудно да бъде избегнат само с виртуален модел, при положение, че това е първият изработен прототип в рамките на целия проект, макар използваният софтуер да предлага възможности за анализ на ограничени пространства. Бяха открити и други възможности за бъдещо подобрене по дизайна на прешлените, а също така и на краката на робота. Част от формата на елементите на използваните крака са проектирани да бъдат изработени от листов материал. Тъй като избраният метод на изработка беше изцяло нов, с помощта на машина за бързо прототипиране, то дизайнът може да бъде оптимизиран така, че да удовлетвори повече изисквания, защото чрез него ограниченията откъм форма/технологичност са значително по-малки. В определени участъци вътрешната част на прешлените може да бъде изтънена като по този начин се намали допълнително цялостната им маса. След реален анализ на произведения прототип стана ясно, че вътрешните водачи на нишките не играят значителна роля и биха могли да бъдат отстранени с цел олекотяване на конструкцията. Тези подобрения могат да бъдат отразени в бъдещ етап.

По време на сглобяването трябваше да бъдат добавени и пружините в гръбначния стълб. В много случаи коравината на едни и същи пружини варира в определени граници. От тази гледна точка не може да се очаква винаги едно и също движение, деформиране и преместване, което да е систематично и с едни и същи параметри постоянно. След сглобяването на целия робот се пристъпи към неговото раздвижване чрез осъществяването на прости движения. По време на това раздвижване се забеляза, че гръбначният стълб се усуква около оста си при опит за завиване/свиване вляво и дясно. Това водеше до нежелани и значително по-неточни премествания. За да могат да се ограничат, беше взето решение за поставяне на две шини от горната страна на гръбначния стълб (фиг. 6.7). Всяка от тях има четири отвора по дължината си. Двата отвора в средата на всяка шина са захванати с щифтове неподвижно към първия прешлен и съответно към последния прешлен за втората шина. Останалите отвори на тези шини са с въртящи втулки, които позволяват ротация спрямо вертикална ос и същевременно ограничават усукването на гръбнака. Структурата става значително по-корава и устойчива. Причината поради, която този недостатък не можеше да бъде предвиден по-рано беше свързан със значителното опростяване на компютърните симулации и недостатъчните изчислителни ресурси. Проведените впоследствие усложнени компютърни симулации показаха нежеланото усукване, което се появи. Към този момент не са поставени подобни компоненти и на опашката, тъй като основната им цел беше да ограничат усукването в гръбнака. Поради спецификата на геометрията на прешлените и тазовия и раменен пояс, за поставянето на шините бяха нужни и дистанционни втулки. Тяхната цел беше да се избегне разликата в нивото между прешлените като същевременно способстват за по-лесното въртене на осите в двата края на шината.



Фиг. 6.7 Снимка на реализирания прототип на робота гуцер; поглед отгоре.

По време на тестовете за раздвижване на робота се наблюдаваше затруднение на робота да извършва определени крачки. Така при повдигнати два крака, роботът се наклонява назад значително. Основната причина беше свързана с голямата маса на опашката, съизмерима с тази на тялото, а не с тази на главата. Макар роботът да има статична стабилност, динамичната му стабилност е под въпрос без внедряването на по-лека опашка. Масата на опашката е нужно да бъде намалена поне два пъти. Това може да стане като бъдат допълнително изтънени зоните във вътрешността на компонентите съставляващи опашката. Към момента тяхната плътност във вътрешността е висока, което води и до по-голямата маса.

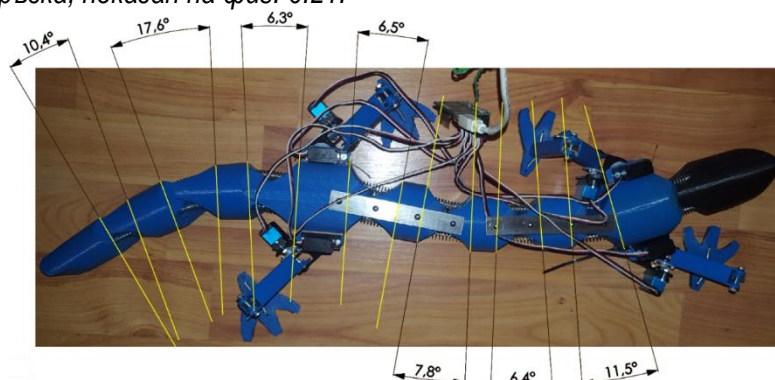
6.3. Програми и програмиране на движения

Софтуерът, използван за координирането на движенията на робота гуцер идва директно със закупения контролер. Pololu Maestro Control Center v1.03 дава възможност за лесно и удобно графично управление на свързания контролер и двигатели [Pololu Corporation, 2001–2017].

По време на тестовете бяха изпробвани различни походки и движения. Първите задвижвания бяха свързани с вдигане на робота от долно положение в горно. Движението наподобява лицеви опори, като при това движение бяха постоянно включени четирите повдигащи двигателя на краката. Движението на робота беше плавно.

Към този момент захранването, което се използваше не беше достатъчно (5V, 1,2A, 6W), за да захрани всички двигатели, така че да бъдат постоянно натоварени. При определени комбинации на работата на моторите и тяхното натоварване захранването изключваше и робота блокираше в последното положение. Това наложи подмяната на захранването и използването на по-мощно (5V, 8A, 40W).

По-долу се вижда роботът L2 в действие. На снимката ясно се забелязват отделните компоненти, извивката на гръбначния стълб и положението на краката. Тук също така се вижда и положението на поставените шини. На база тази снимка може да се направи следният груб анализ-обратна връзка, показан на фиг. 6.21.



Фиг. 6.21 Отчитане на ъгъла на завъртане на прешлените на гръбначния стълб на робота L2 по време на ходене.

Както се вижда от горната фигура, ъглите на завъртане на прешлените не са еднакви. Това се дължи на няколко фактора – липса на абсолютен синхрон между два стъпващи крака, породен от разликите в механичните им особености, недостатъчно триене в зоната на стъпалата, което позволява на робота да приплъзва в определени моменти в зависимост от

подложката, с която стъпалата контактуват, нееднакво разпределение на силите в пружините, възможно е въртящият момент породен от мотора, който извива гръбначния стълб да не е достатъчен, също така е възможно това да се дължи на местоположението на двигателя, поставен в тазовия пояс, липса на механична точност в поставените допълнително шини на гръбначния стълб.

При движение, излизането от първоначалното положение (*home position*) е най-трудно. Причината за това е преходът от *home position* в позиция, при която гръбначният стълб е извит в една посока, опашката в друга, а краката по диагоналите се движат в комбинация – преден десен – заден ляв и преден ляв – заден десен. Първоначалната позиция на робота L2 е с изправен гръбначен стълб и опашка, а раменните и бедрените компоненти са перпендикулярни на тялото, всички крака са успоредни и перпендикулярни на земята.

6.4. Бъдещи разработки и идеи

Въз основа на натрупания опит се оформиха идеи за някои предложения. Едно от основните предложения е да се постигне допълнително олекотяване на прешлените и областта на опашката, за да може роботът да се движи по-добре и да се избегне нежеланото наклоняване. Това ще допринесе за по-лесната работа на използваните серво двигатели. Възможно е да се търси също така изнасяне на нишките по-навън спрямо центъра и досегашното им положение в конструкцията. Целта е приложената сила за извиване на гръбначния стълб на робота да е по-малка, заради по-голямото рамо. Същевременно трябва да се избегне възможната намалена устойчивост и да се направи разумен компромис. При сегашното положение контакт между прешлените в гръбначния стълб няма. Това води до недефинирани премествания, но предлага липса на триене между два отделни компонента. Възможно е да се разработи вариант, при който се използва същата идея с използване на пасивни и активни степени на свобода в структурата на робота, но като в гръбначния стълб има наличие на дефинирани контактни връзки. В природата контактът става по сложна повърхнина с гъвкаво звено между прешлените.

Оптимизиране на D прешлен може да го направи с около 45% по-лек. Използваните кукички за сглобяване са заменени от крепежен елемент с поставяне на болтово съединение. Това дава възможност прешлена да се разглобява множество пъти без това да се отразява на неговата форма. Премахнати са направляващите елементи на нишките от вътрешността. Точната позиция на болтовото съединение предстои да се прецизира.

В бъдеще всеки един от съществуващите компоненти може да мине през параметричен оптимизационен анализ, в който да се направи анализ на използваните параметри в дадения детайл/сглобена единица чрез възможностите на използвания софтуер. Също така, когато говорим за допълнителни изследвания е възможно да се използва и така нареченият непараметричен топологичен оптимизационен анализ. При него в началото се поставят крайни цели и се определят геометрични ограничения на дадения компонент както и приложени външни сили, ако има такива. Така не се задават конкретни стойности, а софтуерът оптимизира формата на обекта като се съобразява с поставените ограничения и търси максимално да се доближи до поставената цел. Пример за такова изследване може да е да се оптимизира формата на прешлена, като се търси минимална маса, но като има най-добро съотношение здравина-маса.

Към този момент се подготвя и значително по-усложнена кинематична симулация на робота гущер, която да е по-точна и да даде повече отговори преди оптимизираните прешлени да бъдат произведени. Освен оптимизация на формата и параметрите на гущера, бъдещите идеи за развитие засягат и други въпроси. Могат да се поставят сензори за наличие на газ, камера, жirosкоп и други подобни, с които да се направи движението на робота по-информирано.

Друга идея за прешлен по-близък до биологичния също се разработва. При него ще може да се регулира приложената сила между два отделни прешлена. Също така контакт може да има по сложна повърхнина. След оптимизация и усъвършенстване на конструкцията тя може да послужи за основа при изграждане на размерен ред от роботи аналози на гущери в [Малаков, 2015] [Malakov, et al., 2016] [Malakov, et al., 2016].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ, ПОСТИГНАТИ РЕЗУЛТАТИ И ИЗВОДИ

Решени са следните задачи:

- Извършен е старателен биологичен анализ и са разгледани интересни класически и съвременни инженерни решения в областта, като е направена обща оценка на предимствата и недостатъците им;
- Предложени са подобрени структурни варианти, съобразени с възможностите на съвременните технологии за реализация;
- Съставени модели за теоретични и симулационни изследвания на движението на предложените структури и е направена оценка за качествата им;
- Използвани са разработените от докторанта маг. инж. Б. Петров крака на робота гущер, за да се разработи цялостен конструктивно оформен прототипен модел и решение на робота [Петров, 2017];
- Разработени са компютърни алгоритми с помощта на специализиран софтуер за управление, с чиято помощ прототипът на робота гущер може да се движи и са проведени експериментални изследвания на краченето.

Използването на комбинация от активно и пасивно задвижване в конструкцията на робота представлява особен интерес в настоящата разработка. В световен план все повече структури на роботи се ориентират към използването на подобен подход. Активното задвижване осигурява по-голяма точност и определеност. От друга страна пасивното задвижване спестява енергия, която е особено необходима в структурата на мобилните роботи. Интересен факт е, че в природата прешлените на животните контактуват по сложна повърхнина близка до плоската. На този етап свойствата на контактния материал не са подробно изследвани. Основните насоки, в които ще се развива занапред структурата на робота гущер са оптимизация на цялостната конструкция и подобряване на механиката, подобряване на управлението и движението на робота, допълнително ще се вложат сили в още по-старателно разглеждане и изследване на биологичните прешлени и техните контактуващи повърхнини, анализирането на походката на краката и адаптивността на стъпалата. С напредването на технологиите и създаването на нови материали биха се усъвършенствали досега направените аналози на гръбначен стълб, крака и скелетна структура. Те биха подпомогнали за довеждането на механизма към по-естествени и по-точни движения.

Независимо от наличието на нововъзникнали въпроси относно структурата и движението на робота, усъвършенстването на гръбначния стълб и скелетната структура, този проект допринесе за постигането на високи резултати при изследването на структури както в равнината, така и в пространството. От друга страна бяха проведени и много изследвания, свързани с адаптивността на стъпалата. Роботът, чиито прототип беше изработен чрез технология за бързо прототипиране, предстои да бъде оптимизиран. На някои от възникналите въпроси ще бъде даден отговор. Настоящите идеи, изследвания и резултати не са окончателни и търпят промени и развитие в бъдеще.

Връзката между биология и мехатроника ще продължи да се задълбочава все повече, като в даден момент основният въпрос между тяхната връзка няма да е толкова технически, а по-скоро морален. При всички положения, обаче, продуктите на такава синергия ще бъдат използвани не само в най-различни сфери от ежедневието на човека, но и в откриването на нови предизвикателства извън границите на нашата планета.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Във връзка с поставената цел и задачи на настоящия дисертационен труд, са решени инженерни задачи, които имат научно-приложен и приложен характер. Резултатите могат да се използват от конструктори, докторанти и студенти. Авторските претенции за приноси обобщено могат да се представят:

Научно-приложни:

1. Синтезирано е множество на варианти на равнинни затворени и отворени структури на гръбначен стълб, които са подходящи за крачещи роботи, движещи се по равнини и/или повърхнини с плавна промяна на релефа и са изследвани кинематичните и силови параметри;
2. Разработени са конструктивни варианти на гръбначен стълб чрез моноконтурни пространствени кинематични вериги с три и шест степени на свобода на кинематичните двойките между два съседни прешлена, които са подходящи за крачещи роботи, движещи се по повърхнини с пространствена промяна на релефа и наличие на недетерминирани препятствия, характерни за разрушени сгради и други неизследвани терени;
3. Съставени са модели за теоретични и симулационни изследвания на движението на предложените структури, като са запазени масовите характеристики на звената и е направена оценка на качествата им;
4. Проектиран и изработен е модел на робот гушер, като са използвани разработените от докторанта маг. инж. Б. Петров крака с адаптивно стъпало [Петров, 2017] и като продължение на гръбначния стълб са добавени опашка, шия и глава, с разположен управляващ блок и възможности за окомплектоване със сензори за възприятие на външната среда и електрозахранващи батерии.

Приложни:

1. Направен е систематизиран анализ на скелетни системи на гушери и по-специално гръбначен стълб, шия и опашка, подходящи за разработване на инженерни аналози, съобразени с развитието на 3D технологиите;
2. Разработени са компютърни алгоритми за движение на робота гушер, с помощта на специализиран софтуер за управление, в съавторство с докторанта маг. инж. Б. Петров, чрез които могат да се провеждат учебни занятия и експериментални изследвания.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са представени в 6 публикации:

1. Димитров, Н. и В. Павлов, Синтез на гръбначен стълб за мобилен робот аналог на гушер и симулационен анализ на движението на избрани структури, сп. „Механика на машините“ 2010 г., XVIII, книга 7, стр. 25-31, ISSN 0861-9727 2010
2. Павлов, В., Б. Петров, Й. Ханджиев, Н. Димитров, 3D структура на мобилен робот изградена върху биомеханична аналогия със скелетна система на гушер, „Сборник доклади от XX Международна Научно-Техническа Конференция „АДП – 2011“ Созопол - юни 2011
3. Павлов, В., Б. Петров, Н. Димитров, Моделиране на контактно взаимодействие между опорната равнина и стъпалото на крачещ робот, съдържащо пасивни степени на свобода, сп. „Механика на машините“ 2012 г., година XX, книга 3, стр. 37-43, ISSN 0861-9727
4. Димитров, Н., В. Павлов, Анализ на съществуващи инженерни решения на гръбначен стълб за роботи, „Сборник доклади от XXII Международна Научно-Техническа Конференция „АДП – 2013“, Созопол - юни 2013
5. Павлов, В., Н. Димитров, Б. Петров, Равнинни модели за движение на робот с четири крака, съдържащ гръбначен стълб с еластични шарнири, „Сборник доклади от XXIV МНТК-АДП 2015“, Созопол, 2015
6. Димитров, Н., Функционално симулационно изследване на робот аналог на гушер с гъвкав гръбначен стълб чрез възможностите на SOLIDWORKS, „Българско списание за инженерно проектиране“, бр. 33, ISSN 1313-7530, 2017

SPINAL COLUMN FOR ROBOTIC LIZARD

Abstract

This PhD thesis elaborates on the research and development of vertebral column with passive degrees of freedom for robot that mimics skeletal and muscular functions of lizard.

The first chapter examines the full capabilities of the spine muscles of lizards. Muscular functions and activities are represented by various graphs and schemes as they show different behaviours of Varanus salvator and Iguana iguana lizards. The development of this project was possible only through the in-depth study of the muscular and skeletal functions of those animals. This analysis affects the peculiarities and functions of the spinal column in humans and animals. Chapter 1 also analyses many new designs of skeletal and spine structures for robots.

Based on the first chapter, two-dimensional structures for spinal column are examined and developed in Chapter 2, taking into consideration their advantages and disadvantages. Various complex structures suitable for spinal columns and robots in three-dimensional space are also created. The design of the D vertebra is chosen as optimal. By reviewing and evaluating the obtained results, it is concluded that, despite of the use of significantly simplified vertebral models (compared to their biological analogues), it is possible to achieve satisfactory flexibility related to the assigned task.

Chapter 3 examines a series of simulations of planar structures of the robot as well as different options for their motion, conducted through the SOLIDWORKS software. The variation of multiple parameters, gives results enough to clear the idea of the behaviour of the mechanisms regarding to the placement of motor torques. This chapter also examines the kinematic and force capabilities of the selected structures.

Chapter 4 reviews the main components of the Lizard robot. Their function is evaluated, and their basic parameters and design are defined. Here are chosen the motors necessary to move the construction of the robot. In this chapter is chosen the control module for the lizard robot.

The technologies for making and assembling the prototype of the L2 robot are presented in Chapter 5. The ways in which legs, head, tail, and girdles are connected to the spinal column are explored, as well as the structural features of the shoulder and pelvic girdle.

In Chapter 6, a few basic studies of the robot's overall structure are made. Their purpose is to take into consideration various parameters related to the behaviour of the system in an environment close to the real one. In such simulations, vertebrae of the spinal column can be rotated within up to $\pm 10^\circ$. In this chapter are detected and shown some shortcomings, as well as some of the steps that enabled the motion of the lizard robot. Some key features of the robot control are described. In the end of the chapter are described some of the possible improvements and future solutions to be made.