



Софийски университет "Св. Климент Охридски"
Факултет по математика и информатика
Катедра „Информационни технологии“

Итеративно самообучение за управление на манипулационни работи

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд

на Калоян Мариянов Йовчев

за присъждане на образователна и научна степен „Доктор“
в професионално направление 4.6. Информатика и компютърни науки
(Информационни технологии)

Научни ръководители:
проф. д-р Евгений Кръстев
доц. д-р Камен Делчев

гр. София, 2018 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на разширено заседание на катедра „Информационни технологии“ към Факултета по математика и информатика на Софийски университет „Св. Климент Охридски“, състояло се на 25.04.2018 г.

Авторът е докторант в редовна форма на обучение във Факултета по математика и информатика на Софийски университет „Св. Климент Охридски“.

Дисертационният труд е изложен на 113 страници, в които се съдържат 57 фигури, 10 таблици. Цитирани са 67 източника. Списъкът от публикации на автора по същността на дисертацията включва 6 заглавия.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на открито заседание на г. от часа в

Материалите по защитата са на разположение в на ФМИ към СУ (София, бул. Джеймс Баучър №5).

Съдържание

Обща характеристика на дисертационния труд	4
Актуалност на проблема и мотивация	4
Обект и предмет на разработката	5
Цел и задачи на дисертацията	5
Структура и съдържание на дисертационния труд	6
Глава 1. Критичен анализ	6
Глава 2. ILC при ограничения на пространството на обобщените координати.....	10
Глава 3. Проектиране на учебен робот с три степени на свобода	17
Глава 4. Разширение на SCILC и експериментална верификация	21
Заключение.....	23
Цитирана в автореферата литература	24
Приноси в дисертационния труд.....	25
Научни приноси	25
Научно-приложни приноси.....	26
Приложни приноси	26
Публикации, доклади и участие в проекти, свързани с темата на дисертацията	26
Декларация за оригиналност.....	28
Биографични данни за автора на дисертационния труд	28
Благодарности	28

Обща характеристика на дисертационния труд

Мехатрониката и роботиката са интердисциплинарни науки, които обединяват множество различни научни области, като теория на машините и механизмите, аналитична механика, електроника, информатика и компютърни науки, теория на управлението и други [1]. Този дисертационен труд разглежда приложението на тези научни области при проектиране и управление на индустриални манипулационни роботи. Всеки индустриален робот има специфично програмирано задание, което изпълнява многократно по време на работния си цикъл. При работата им заданието трябва да се изпълни без отклонение и с висока прецизност при всяко едно повторение. В противен случай, производственият процес би се нарушил или част от произведеното не би отговаряло на установените стандарти за качество. Най-често срещаните задания са пренасянето на различни обекти и движение по предварително зададена траектория с определена продължителност, скорост и ускорение във всеки един момент от движението. При това, в процеса на движение трябва да се отчитат конструктивните ограничения за изменение на обобщените координати и скорости. В дисертационния труд са получени нови резултати, които позволяват такива задания да се изпълняват прецизно, посредством метода за управление с итеративно самообучение (ILC).

Актуалност на проблема и мотивация

В днешно време развитието на мехатрониката е първи и основен приоритет в редица програми на Европейския съюз, напр. „Наука и образование за интелигентен растеж“ [2]. Ускореното развитие на роботиката се дължи предимно на усъвършенстването на системите за управление както в хардуерно, така и в алгоритмично-софтуерно отношение. От своя страна особено перспективно се явява развитието на интелигентни системи за адаптивно управление. Управлението с итеративно самообучение е подклас на адаптивните управления. То предизвиква интерес сред учените и разработчиците на управляващи системи за индустриални роботи, които предполагат изпълнението на повтарящи се задания в детерминирана среда [3]. В този случай то се явява най-добрият подход за синтез на „програмно управление“ (feedforward control). Този подход позволява да се компенсират грешките на управлението с обратна връзка (feedback control), а също така и грешките от немоделираната динамика (unmodeled dynamics), когато законът за управление се базира на модела на динамиката на робота [4]. Стандартната система за управление се опитва във всеки един момент да компенсира вече натрупалата се или очакваната бъдеща грешка по време на изпълнение на движението. Това означава, че през цялото време на работата си роботът допуска някаква грешка, която се опитва да коригира. Адаптивният подход за ILC, обект на тази дисертация, може да прецизира подаваните команди към изпълнителните механизми до степен, в която допусканата грешка е пренебрежимо малка.

Известните в научната литература изследвания в областта на ILC не позволяват ILC [5] да се използва директно в системата за управление на манипулационен робот. Това е така поради съществуването на известния в литературата [6, 7] проблем на нарастването на преходната грешка (transient growth error). Този проблем води до появата на недопустима траекторна грешка в определен брой итерации на траекторното движение независимо от това, че като цяло процедурата е сходяща. От друга страна, индустриалните манипулационни роботи имат определени работни и конструктивни ограничения. Ако роботът трябва да изпълни траектория, която минава близо до границите на работното пространство на робота или се прояви проблемът за нарастването на преходната грешка, то изпълнената траектория по време на итеративния процес може да наруши

ограниченията. Тогава итеративният процес не би могъл да продължи и ILC става неприложимо за манипулационни работи в общия случай (Фигура 1.13).

Обект и предмет на разработката

Обект на настоящото изследване е приложението на ILC с цел намаляване на траекторната грешка по време на изпълнението на повторяемите задачи, поставени на индустриалните манипулационни работи.

Предмет на изследването е предлагане и верификация на промени в метода на самообучение, които са съобразени със спецификата на манипулационните работи, както и изследване и дефиниране на допълнителни ограничения върху възможната зададена траектория и параметрите на този метод.

Цел и задачи на дисертацията

Целта на дисертацията е изследване, подобряване и създаване на методи, алгоритми и системи за управление с итеративно самообучение на реални манипулационни работи. Провеждането на това изследване трябва да доведе до ефективно разрешаване на проблемите, които възпрепятстват директното прилагане на метода за итеративно самообучение – наличието на преходна грешка, наличието на ограничения в обобщените координати на манипулационните работи и ограниченото работно пространство.

Достигането на целта на дисертацията изисква формулирането на набор от задачи. Решението на тези задачи води до резултати, които да удовлетворяват поставената цел. Формулираните задачи са следните:

- анализ и изследване на същността на методите за траекторно управление на манипулационни работи;
- анализ и изследване на предимствата, недостатъците и проблемите на прилагането на ILC в системата за управление на манипулационни работи;
- критичен анализ на съществуващите подходи за разрешаване на проблема с нарастването на преходната грешка и на използване на ILC при наличието на ограничения;
- изследване, посредством компютърна симулация на параметрите на Bounded Error ILC (BEILC) алгоритъма за разрешаване на проблема с нарастването на преходната грешка;
- синтез на нова стратегия за изпълнение на итеративната процедура за управление на траекторното движение на манипулационен робот, която да отчита наличието на ограничения в работното пространство – Space Constrained ILC (SCILC);
- проектиране и изграждане на учебен манипулационен робот с три степени на свобода, подходящ за прилагане на ILC;
- изследване на предоставяните възможности от софтуерните продукти и операционни системи с отворен код за разработка и проектиране на система за управлението на манипулационен робот;
- верифициране и оценка на приложимостта на предложението в дисертацията SCILC подход при манипулационни работи с ограничено работно пространство, чрез компютърна симулация и експерименти върху проектирания робот.

Структура и съдържание на дисертационния труд

Дисертационният труд се състои от 4 глави. Представените в тези глави резултати са докладвани на 3 международни конференции, описани са в 1 научна статия във водещо научно списание в областта на роботиката. Публикациите са реферирани в Scopus и Web of Science. Докторантът е водещ автор във всяка от тези публикации.

Глава 1. Критичен анализ

В първа глава е направено въведение в същността на предметната област и са обяснени основните термини. Посочени са съществуващите към момента решения на поставените проблеми. Направен е критичен анализ на силните и слабите им страни. Резултатите от анализа са обобщени в сравнителна таблица. Като извод от анализа са описани ключовите характеристики, които трябва да удовлетворява разработваното от автора решение. Принос на автора, постигнат в тази глава, е задълбоченият анализ и систематизирането на съществуващи решения на поставените проблеми, както и оценката на техните предимства и недостатъци, въз основа на които са дефинирани изискванията към решението – цел на дисертационния труд.

Моделиране на манипулационен робот

Манипулационният робот е система от отделни тела (звена), които са свързани по между си. Връзките между две звена се наричат стави. За целите на тази дисертация са разгледани връзки, които позволяват завъртане на едно звено спрямо друго. Завъртането е около ставните оси. Към последното (най-отдалеченото от основата) звено е прикрепено крайно устройство, което осъществява взаимодействието с околната среда. То може да бъде хващач, заваръчен, бояджийски или друг инструмент. Целта на робота е да позиционира и ориентира това крайно устройство по предварително зададен начин с цел постигане на автоматизацията на определен процес. Такъв тип манипулационни роботи са широко използвани в съвременната индустрия.

За моделирането на манипулационен робот е необходимо да се определят параметрите на неговата кинематика и динамика. Кинематиката е науката за движението, която го разглежда само него без да се интересува от силите, които го пораждат. Тя се занимава с позицията, скоростите, ускоренията, както и с всички геометрични и времево-базирани свойства на движението. От друга страна, решаването на уравненията на динамиката има широко приложение при изчисляването на програмно траекторно управление за робота. Но това управление може да е прецизно само ако математическият модел на динамиката е точен. Това в повечето случаи не е така (проблем на немоделираната динамика) и тогава се налага системата за управление да компенсират допуснатата грешка, чрез комбиниране на това управление с управление с обратна връзка. Чрез знания за модела на динамиката може да се направи и компютърна симулация на реалния робот [7]. В последно време цената на изчислителната мощ падна значително и е много по-лесно да се симулира реалната машина. Компютърната симулацията ускорява значително процеса на проектиране и внедряване на нови алгоритми в управляващата система на роботите.

Индустриалните манипулационни роботи са обектите, за които ILC методът има най-голям смисъл да се прилага. Техният модел на динамиката е нелинейна система [1].

Манипулационните роботи са машини, които имат ограничения, наложени от механиката и конструкцията им. Когато става дума за артикулационни роботи, то почти сигурно ставите (звената) имат минимален и максимален ъгъл на завъртане. Този тип ограничения се наричат позиционни. В зависимост от вида и спецификата на

задвижващите механизми, както и от динамичните характеристики на робота, то всяка става има и максимални и минимални скорости и ускорения.

Целта е да се избегнат удари в крайните упори на звената, т.е. траекторията да се планира в област, в която да е гарантирано, че при аварийна ситуация роботът няма да се повреди.

Софтуер за управление на манипулационен робот

Системата за управление на работи е съвкупност от множество подсистеми, които обменят информация помежду си и в крайна сметка синтезират и изпращат управляващи сигнали към изпълнителните механизми, в резултат на които се извършва движението на звената на робота.

Подсистемите могат да се разделят на няколко основни категории: за координиране, за обработка на сензори, за планиране, за решаване на обратната задача на кинематиката и за синтез на управляващи сигнали (серво управление).

Проектирането на системата за управление (програмирането) на един манипулационен робот е комплексен процес. В днешно време набират все по-голяма популярност софтуерни и хардуерни продукти с отворен код. Такъв продукт е Robot Operating System (ROS), който се наложи като стандарт, използван от научно-изследователските институции. Едно от най-големите му предимства е възможността да работи на всяко Линукс поддържащо устройство.

Основни методи за управление за манипулационни работи

Пропорционално-интегрално-диференциално управление (PID) е едно от най-разпространените управления [1]. При него не се вземат в явен вид динамичните или които и да било други характеристики на управляваната система. При това управление се изчислява грешката (отклонението) от желаната стойност на позицията и/или скоростта на звената и спрямо нея се подава коригиращ сигнал към изпълнителните механизми;

При програмното траекторно управление (feedforward control) за предварително зададена и изпълнима траектория в работната зона на робота се изчисляват необходимите моменти/сили за изпълнението на движението по нея. Това става, чрез модела на динамиката и решаването на обратната задача на динамиката. В идеалния случай, това управление би било напълно достатъчно за идеално точното изпълнение на зададена траектория. В практиката, обаче, то е неприложимо без стабилизираща компонента с обратна връзка, защото в противен случай не могат да се компенсират възникващите грешки [8, 9];

Основната идея на декуплиращото управление (computed torque control) е да се синтезира управление (при движение по зададена траектория), компенсиращо Кориолисовите, центробежните и гравитационните сили така, че системата да се опише с n на брой линейни независими (декуплирани) обикновени диференциални уравнения от втори ред [1].

Изброените до тук методи за управление на манипулационни работи предполагат, че уравненията на движението и моделът на динамиката описват напълно прецизно реалното движение на робота, т.е. че математическият модел е напълно точен. В практиката, обаче, това е почти невъзможно. Моделирането на динамиката е съпроводено с редица неточности. При адаптивен тип управление се осъществява адаптация/уточняване/ на параметрите на управлението на реален робот с цел минимизирането на позиционната/траекторната грешка. Тази адаптация може да се извърши по време на движението на реалния робот по зададената траектория (on-line) или след края на изпълнението на движението (off-line).

Управление с итеративно самообучение

Основната идея на управлението с итеративно самообучение (Iterative Learning Control, ILC) е да се компенсира максимално грешката при следващото изпълнение на дадено задание. Това става като се правят множество последователни повторения на изпълнението и между всяко от тях се подобрява програмното управление с цел да се коригира грешката на базата на събраните до момента данни. Така, в един естествен итеративен процес на самообучение, се намират правилните входни сигнали (команди), които да доведат до желано поведение.

Подобен подход е приложим в управлението на индустриални работи, които трябва да изпълняват многократно движение по определени, предварително зададени траектории.

Това, което прави ILC е да се възползва от събраните данни за движението на робота при изпълнение на предходната итерация за минимизация на траекторната грешка при изпълнение на следващата итерация чрез подобряване (update) на програмната компонента (feedforward term) на управлението.

През 1984 ILC започва да се изследва по-подробно. Тогава Arimoto et al. [5, 10], Casalino and Bartolini [11] и Craig [12], независимо един от друг, публикуват статии за метод, който да може, чрез последователни повторения на изпълнението на едно и също задание, да коригира грешките в математическия модел, както и да елиминира влиянието на детерминирани смущения на системата.

В областта на роботиката ILC методът има следните предимства пред другите методи за управление:

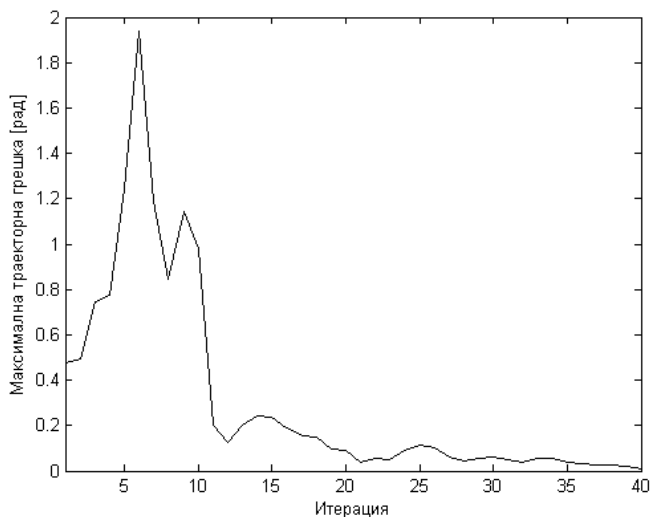
- самостоятелно (автономно) се настройват входните сигнали към системата, които са необходими за постигането на желаната траектория;
- успешно се компенсира грешката по време на цялото движение и получената траектория е максимално близка до зададената;
- компенсира се грешката, породена от неточен модел на динамиката;
- компенсират се грешки, породени от детерминирани смущения на системата;
- позволява оптимизацията на управлението да не става в реално време.

При управлението на манипулационни работи се наблюдават и следните проблеми, които възпрепятстват директното прилагане на този подход в системата за управление:

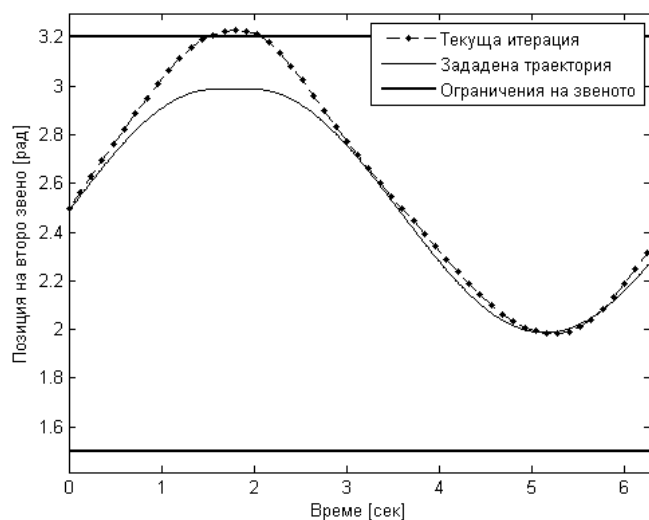
- от избора на обучаващия оператор зависи броят на необходимите итерации (сходимостта на ILC) за достигането на желаната точност;
- нарастването на преходната грешка (“transient growth error”, Фигура 1.12);
- съществуването на ограничения на обобщените координати.

Проблемът за нарастването на преходната грешка е най-значим. В следствие на него може да се стигне до невъзможност за изпълнение на дадена итерация, тъй като реалната система не би могла да изпълни подадените към нея команди, заради физическите ѝ ограничения.

Наличието на ограничения на обобщените координати е проблем при прилагането на ILC в реални условия за манипулационни работи. Той се проявява, когато зададената траектория е планирана близко до ограниченията на обобщените координати на робота (упорите на ставните ротации). В такава ситуация е възможно методът да не може да се изпълни успешно (Фигура 1.13).



Фигура 1.12. Проблем с нарастването на преходната грешка



Фигура 1.13. Траектория, минаваща в близост до ограниченията на обобщените координати

Възможни решения на проблема за преходната грешка

Твърде малко решения на проблема за преходната грешка са известни от научната литература. Възможно решение на проблема за преходната грешка е използването на slow learning rate ILC [13], на монотонно сходящо ILC [14] или чрез Bounded-Error Algorithm [7]. В крайна сметка, за да се реши този проблем може да се наложи да се пренебрегнат някои от основните постулати на класическата схема на ILC.

В изследването [15] на Douglas A. Bristow and John R. Singler се разглежда дали наистина slow learning ILC може да реши проблема с нарастването на преходната грешка. Този метод, чрез намаляване на влиянието на оператора, постига по-малка и по-плавна корекция на входните сигнали на всяка една итерация. По-малката корекция намалява възможността за голяма преходна грешка, но ще са необходими по-голям брой итерации. Освен това, сходимост е доказана само за линейни системи.

В изследване на Kwang-Hyun Park and Zeungnam Bien от 2002 [14] е показано съвсем накратко как може да се постигне монотонна сходимост на грешката, чрез разделяне на времевия интервал $[0; T]$ на множество от подинтервали, в които последователно се прилага стандартната схема на ILC, но не е точно определено как да се избере дължината на подинтервалите.

Възможно най-общо и приложимо решение на проблема за преходната грешка е използването на Bounded-Error Algorithm за ILC (BEILC). Този алгоритъм се справя с проблема като проследява големината на грешката по време на самото изпълнение на итерациите. В момента, когато грешката достигне някаква предварително зададена гранична стойност се прекратява текущото изпълнение. Коригирането на входните сигнали преди изпълнение на следващата итерация ще се извърши само до момента, в който е била прекъсната преходната итерация [7].

Възможни решения на проблема с ограниченията

ILC методът не може да се приложи директно при системи, в които има ограничения, напр. на входните (управляващите) сигнали, ограничени обобщени координати или ограничени скорости [16, 17]. В изследването [18] са предложени два метода, които се използват за решаване на ограниченията на управляващите сигнали: първият използва "reference governor", за да намали параметрите на движението по зададената траектория, така че да се получи изпълнима траектория, а вторият използва бариерна функция, която да не позволи генерирането на входен сигнал, който да наруши ограниченията на системата. Тези методи работят добре и решават проблема за ограниченията, когато

зададената траектория е неизпълнима поради ограничения в управляващите сигнали [18]. В [19, 16] са предложени оптимизационни ILC методи, които взимат под внимание модела на динамиката. В резултат те успяват да решат проблема с ограниченията в случая на люлеещо се махало. В [17] е предложен проекционен метод, който решава проблема за ограничени входни сигнали.

Повечето проучвания разглеждат предимно ограничения във входните сигнали или скоростите [18, 19, 17]. Сходимостта на тези методи не е доказана, когато се използват за решаване на проблема при ограничения на обобщените координати [20], което ги прави неприложими за манипулационни работи.

Сравнение на методите за управление

В Таблица 1.2. е показано сравнение на гореизброените методи.

От всички изброени методи, единствено computed torque control [1] е директно приложим за управление на манипулационни работи, но той изисква прецизен модел на динамиката на робота. От друга страна, ILC методите могат да компенсират неточности в модела на динамиката. Известните ILC подходи не отчитат наличието на ограничения на обобщените координати, което ги прави неприложими в реални ситуации.

Таблица 1.2. Сравнение на основните методи за управление

Метод	Прецизно изпълнение на заданието при неточен модел	Прецизно изпълнение на заданието при наличие на смущения	Решава проблема с нарастването на преходната грешка	Приложим за нелинейни системи	Приложим при ограничения на обобщените координати
PID	НЕ	НЕ	-	ДА	НЕ
feedforward	НЕ	НЕ	-	ДА	ДА
computed torque control	НЕ	ДА	-	ДА	ДА
slow learning rate ILC	ДА	ДА	ДА	НЕ	НЕ
монотонно сходящо ILC	ДА	ДА	ДА	НЕ	НЕ
BEILC	ДА	ДА	ДА	ДА	НЕ

Целта е да се намери ILC решение, което удовлетворява следните изисквания:

- постигане на прецизно изпълнение на заданието при неточен математически модел;
- постигане на прецизно изпълнение на заданието при наличието на детерминирани смущения;
- решаване на проблема за нарастване на преходната грешка;
- доказана сходимост при наличието на ограничения в обобщените координати;
- директно приложим за нелинейни системи, съответно и за индустриални манипулационни работи.

В дисертационния труд е получено решение, което удовлетворява тези изисквания и са демонстрирани типични приложения в реални манипулационни системи.

Глава 2. ILC при ограничения на пространството на обобщените координати

В тази глава е предложен нов подход за прилагането на ILC в управлението на манипулационни работи. Новият подход – Space Constrained ILC (SCILC) отчита

ограниченията на обобщените координати на този вид работи и спрямо тях налага допълнителни условия върху възможните траектории по време на изпълнение на всяка итерация. Той е изчислително ефективно общо решение на проблема. Основните научни приноси на автора, постигнати в тази глава, са задълбоченото изследване на BEILC метода, дефинирането на максимално допустимата област на планирано движение, в която може да се приложи BEILC, дефинирането на условие за избор на параметрите му. На базата на тези резултати е дефиниран и новият SCILC подход. В тази глава е постигнат следният научно-приложен принос – реализирана е компютърна симулация, чрез която са верифицирани разгледаните методи.

Дефиниране на нелинейна система обикновени диференциални уравнения в пространството на обобщените координати

Нека е дадена следната нелинейна система:

$$\begin{aligned} \dot{x}_l(t) &= f(x_l(t), t) + B(x_l(t), t)u_l(t) + \omega_l(t) \\ y_l(t) &= g(x_l(t), t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

в която $l \in \{0, \dots, \infty\}$ е номерът на итерацията, а за $t \in [0, T]$: $x_l(t) \in \mathbf{R}^n$ са вектори на обобщените координати, $y_l(t) \in \mathbf{R}^m$ са вектори на изходните сигнали, $u_l(t) \in \mathbf{R}^r$ са вектори на входните сигнали, които не е задължително да са непрекъснати. $\omega_l(t)$ съответства на детерминирани и случайни смущения. Функциите $f: \mathbf{R}^n \times [0, T] \rightarrow \mathbf{R}^n$ и $B: \mathbf{R}^n \times [0, T] \rightarrow \mathbf{R}^{n \times r}$ са частично непрекъснати, когато $t \in [0, T]$, а $g: \mathbf{R}^n \times [0, T] \rightarrow \mathbf{R}^m$ е диференцируема по x и t , с частични производни $g_x(\cdot, \cdot)$ и $g_t(\cdot, \cdot)$. Нека са в сила и следните допускания:

- I. За всяко начално състояние $x(0)$ при $\omega(\cdot) \equiv 0$, изображенията $O: C([0, T], \mathbf{R}^r) \times \mathbf{R}^n \rightarrow C([0, T], \mathbf{R}^m)$ и $S: C([0, T], \mathbf{R}^r) \times \mathbf{R}^n \rightarrow C([0, T], \mathbf{R}^n)$ са еднозначни съответствия, т.е. $y_l(\cdot) = O(u_l(\cdot), x_l(0))$ и $x_l(\cdot) = S(u_l(\cdot), x_l(0))$.
- II. Смущенията $\omega_l(\cdot)$ са ограничени в интервала $[0, T]$ и $\|\omega(t)\| \leq b_\omega$.
- III. Функциите $f(\cdot, \cdot), B(\cdot, \cdot), g_x(\cdot, \cdot)$ и $g_t(\cdot, \cdot)$ са Липшицови по x в интервала $[0, T]$.
- IV. Функциите $B(\cdot, \cdot)$ и $g_x(\cdot, \cdot)$ са ограничени върху $[0, T] \times \mathbf{R}^n$.
- V. Всички функции са измерими и интегрируеми.

Дефиниране на стандартен ILC закон за адаптация

Стандартният закон за адаптация може да се дефинира, като:

$$u_{l+1}(t) = (1 - \gamma)u_l(t) + \gamma u_0(t) + L(y_l(t), t)(\dot{y}_d(t) - \dot{y}_l(t)), \quad (2.2)$$

където $L: \mathbf{R}^m \times [0, T] \rightarrow \mathbf{R}^{r \times m}$ е обучаващият оператор, който е ограничен, а $\gamma \in [0, 1)$.

Теорема за сходимост и робастност на ILC

Нека за системата (2.1) са изпълнени условията I-V и е зададено итеративно управление (2.2). Тогава, ако $y_d(t) = g(x_d(t), t), t \in [0, T]$ е зададена начална и изпълнима траектория (изходен сигнал), където $x_d(t)$ е векторът на желаното състояние (обобщени координати) на системата, а $u_d(t)$ е векторът на съответния входен сигнал (управляваща траектория) и началната грешка $\|x_d(0) - x_l(0)\|$ е ограничена от b_{x_0} и:

$$\|(1 - \gamma)I - L(g(x, t), t)g_x(x, t)B(x, t)\| \leq \rho < 1, \forall (x, t) \in \mathbf{R}^n \times [0, T] \quad (2.3)$$

то при $l \rightarrow \infty$, грешките на състоянията и на изходите са ограничени и границите им зависят от тези на началната грешка b_{x_0} и на смущенията b_ω и от γ . Нещо повече, когато b_{x_0}, b_ω и γ клонят към нула, то и другите граници също клонят към 0, т.е. процесът е сходящ и робастен [21].

Доказано е, че сходимостта се запазва, ако условието за корекция се замени със следното:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{l+1}(t) = & (1 - \gamma)\mathbf{u}_l(t) + \gamma\mathbf{u}_0(t) + L(\mathbf{y}_l(t), t)(\dot{\mathbf{y}}_d(t) - \dot{\mathbf{y}}_l(t)) \\ & + K(\mathbf{y}_l(t), t)(\mathbf{y}_d(t) - \mathbf{y}_l(t)) \end{aligned} \quad (2.4)$$

където $K(\cdot, \cdot)$ е ограничена [21].

Преход от нелинейни системи към уравнения на динамиката на манипулационен робот

Нека разгледаме уравненията на динамиката на стандартен манипулационен робот:

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{f} = \mathbf{u} \quad (2.5)$$

където \mathbf{q} е векторът на обобщените координати (ставните ъгли) на робота, $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ е симетричната и положително-дефинитна матрица на инерцията; векторът $\mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ отговаря на Кориолисовите и центробежните сили; матрицата \mathbf{D} и векторът \mathbf{f} са коефициентите на вискозното и Кулоново триене; $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ е векторът на гравитационните сили; \mathbf{u} е векторът на действащите обобщени моменти.

Нека $\mathbf{u} = \mathbf{u}_l + \mathbf{u}_c$ е векторът на обобщените моменти (управляващи сигнали) където \mathbf{u}_l и \mathbf{u}_c са съответно feed-forward и feedback компонентите.

Нека

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_c = & \widehat{\mathbf{A}}(\mathbf{q})[\ddot{\mathbf{q}}_d + K_v(\dot{\mathbf{q}}_l - \dot{\mathbf{q}}_d) + K_p(\mathbf{q}_l - \mathbf{q}_d)] + \\ & + \widehat{\mathbf{b}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \widehat{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{q}} + \widehat{\mathbf{g}}(\mathbf{q}) + \widehat{\mathbf{f}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

където \mathbf{q}_l и $\dot{\mathbf{q}}_l$ са обобщените координати ъгли и обобщените скорости на изпълнената траектория, а $\widehat{\mathbf{A}}, \widehat{\mathbf{b}}, \widehat{\mathbf{D}}, \widehat{\mathbf{g}}$ и $\widehat{\mathbf{f}}$ са съответните стойности на $\mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{D}, \mathbf{g}$ и \mathbf{f} получени от идентификацията на параметрите на модела на динамиката на робота.

В общия случай, законът за адаптация на ILC може да бъде формулиран по следния начин

$$\mathbf{u}_{l+1} = \mathbf{L}(\mathbf{u}_l, \mathbf{e}_l, \dot{\mathbf{e}}, \ddot{\mathbf{e}}) \quad (2.7)$$

където $\mathbf{e} = \mathbf{q}_l - \mathbf{q}_d$.

Тогава уравнението (2.5) може да се запише като:

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}}_l \\ \ddot{\mathbf{q}}_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}}_l \\ -\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{b} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}}_l + \mathbf{g}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\mathbf{A}^{-1} \end{pmatrix} \mathbf{u}_c + \begin{pmatrix} 0 \\ -\mathbf{A}^{-1} \end{pmatrix} \mathbf{u}_l + \begin{pmatrix} 0 \\ -\mathbf{A}^{-1} \end{pmatrix} \mathbf{f} \quad (2.8)$$

Ако положим $\mathbf{x}_l = \begin{pmatrix} \mathbf{q}_l \\ \dot{\mathbf{q}}_l \end{pmatrix}$, $\mathbf{f} = \mathbf{f}^* + \mathbf{f}^{**}$ където $\mathbf{f}^* = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{q}}_l \\ -\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{b} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}}_l + \mathbf{g}) \end{pmatrix}$ и $\mathbf{f}^{**} = \begin{pmatrix} 0 \\ \mathbf{A}^{-1}[\widehat{\mathbf{A}}(\ddot{\mathbf{q}}_d + K_v(\dot{\mathbf{q}}_l - \dot{\mathbf{q}}_d) + K_p(\mathbf{q}_l - \mathbf{q}_d)) + \widehat{\mathbf{b}} + \widehat{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{q}}_l + \widehat{\mathbf{g}}] \end{pmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\mathbf{A}^{-1} \end{pmatrix}$, $\mathbf{y}_l = \mathbf{x}_l$, и ако приемем, че силите на Кулоновото триене следва да се разглеждат като смущения $\omega_l = \begin{pmatrix} 0 \\ -\mathbf{A}^{-1} \end{pmatrix} (\mathbf{f} - \widehat{\mathbf{f}})$, то тогава може да сведем уравнението до (2.1). В [21] е доказано, че $\dot{\mathbf{q}}_l$ е ограничено, което означава, че \mathbf{f}^* и \mathbf{B} изпълняват условията I-V, и следователно, \mathbf{f}^{**} също изпълнява условията I-V.

В [21] е предложено достатъчно условие за робастност и сходимост на итеративното самообучение, в случай на управление на манипулационни роботи:

$$\|I - LA^{-1}\| \leq \rho < 1, \quad (2.9)$$

където I е единична матрица с размер 6; A е матрицата на инерция от уравнението на динамиката (2.5); L е обучаващият оператор, който трябва да се специфицира за постигане на сходимост.

Метод за ограничаване на грешката на ILC (BEILC)

BEILC методът ограничава възможните траектории до тези, които попадат в хипер-тръба с радиус ε около зададената траектория. Чрез него успешно се решава проблемът с нарастването на преходната грешка. Ако е зададена изпълнима траектория $\mathbf{q}_d(t)$ и ограничение за нормата на грешката ε , то ILC процедурата може да се формулира както следва:

1. Задава се начална стойност нула на брояча на итерациите l и се започва итеративната процедура;

2. Зададената траектория започва да се изпълнява от началната позиция $\mathbf{q}_l(0)$, като се прилага управление $\mathbf{u}_l(t)$ докато $\|\mathbf{q}_l(T_l^s) - \mathbf{q}_d(T_l^s)\| \geq \varepsilon$ или докато не се достигне крайната позиция $\mathbf{q}_l(T)$. В случай, че крайната позиция не е достигната и итерацията е прекъсната в момент t , то $T_l^s = t, T_l^s \in (0; T]$. В противен случай, $T_l^s = T$.

3. След като текущата итерация е завършена, се извършва корекция, съгласно следния модифициран закон за адаптация:

$$\mathbf{u}_{l+1}(t) = \mathbf{u}_l(t) + \mathbf{u}_i^* \quad (2.10)$$

$$\mathbf{u}_i^*(t) = \begin{cases} \hat{\mathbf{A}}(\mathbf{q}_l(t))[\ddot{\mathbf{q}}_d(t) - \ddot{\mathbf{q}}_l(t) + L_v(\dot{\mathbf{q}}_d(t) - \dot{\mathbf{q}}_l(t)) \\ + L_p(\mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}_l(t))] & , t \in [0; T_l^s] \\ 0 & , t \in (T_l^s; T] \end{cases}$$

4. Ако отклонението при изпълняването на зададената траектория е в допустими норми, то процесът на самообучение се прекратява. В противен случай, $l = l + 1$ и се повтаря стъпка 2.

Сходимостта му е доказана в [7] и той може да се прилага както в симулации, така и в реални условия.

Изследване на BEILC, чрез компютърна симулация

MATLAB компютърна симулация на манипулационен робот PUMA 560 е създадена за да се направи оценка на производителността на BEILC. Две двойки различни параметри, получени чрез идентификация и докладвани от Armstrong и Tarn [22, 23] са използвани с цел симулирането на неточности в модела на динамиката. Това позволява да се оцени BEILC в условия близки до реални, както и да се прояви проблемът за нарастването на преходната грешка. Направени са няколко експеримента, чрез които се прави сравнение между сходимостта на BEILC и на стандартното ILC и се изследва какво е влиянието върху сходимостта на смущенията, на използваните вградени в MATLAB процедури за решаване на диференциални уравнения и на параметрите на BEILC.

Максималната траекторна грешка по време на всяка съответна итерация l е равна на:

$$\max_{t \in [0; T]} \|\mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}_l(t)\| \quad (2.12)$$

Получени са следните резултати от симулацията:

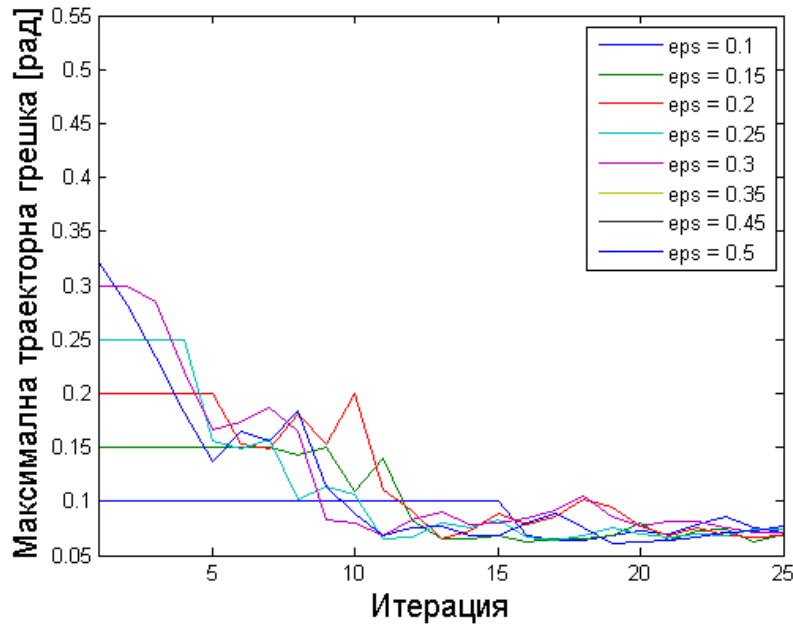
1. Потвърждава се, че BEILC методът е сходящ, робастен и успява да разреши ефективно проблема за нарастването на преходната грешка

2. Смущенията имат пряко влияние върху сходимостта.

3. Параметрите на закона за адаптация могат да се изберат посредством компютърна симулация и също имат пряко влияние. Лош или случаен техен избор води до бавна сходимост.

4. По-голяма стойност за ϵ води до по-бърза сходимост (Фигура 2.7).

Въпреки, че този метод решава проблема за нарастването на преходната грешка все още остава отворен въпросът за наличието на ограничения на обобщените координати на реален манипулационен робот.



Фигура 2.7. Влияние на ϵ върху сходимостта на BEILC при добре избрани стойности на $L_p = 3$ и $L_v = 0$

Нов подход за ИС при наличието на ограничения на обобщените координати

Манипулационните работи обикновено имат ограничения на техните обобщени координати. Изпълняваните от тези работи траектории трябва да са внимателно планирани и да отчитат ограниченията. В тази секция е предложен нов подход за прецизно управление, който е базиран на ИС, но отчита ограниченията на обобщените координати. Това позволява прилагането на такова управление, дори когато желаната траектория е разположена близко до ограниченията на робота. При досега известните подходи ИС метод би нарушил тези ограничения и не би могъл да се изпълни успешно. Предложеният подход разширява вече доказвания метод BEILC метод. Дефинира се множеството от възможни траектории при съответните ограничения, а параметърът ϵ вече е строго определен. Този параметър зависи пряко от ограниченията и от зададената траектория. Новият подход за разширение на разгледания по-горе метод BEILC удовлетворява формалните изисквания на този метод [21] за разрешаване на проблема с нарастването на преходната грешка. По тази причина реализацията на този нов подход не се съпътства с нарастване на преходната грешка.

В реална ситуация има ограничения върху обобщените моменти \mathbf{u} , обобщените координати \mathbf{q} и обобщените скорости $\dot{\mathbf{q}}$. Нека да ги означим по следния начин:

$$\begin{aligned}
 u_i &\in [-U_i^{max}, U_i^{max}] \\
 q_i &\in [Q_i^{min}, Q_i^{max}] \\
 \dot{q}_i &\in [-\dot{Q}_i^{max}, \dot{Q}_i^{max}] \\
 i &= 1, 2, \dots, n
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Нека означим точността на ИС процедурата с:

$$\mu: \lim_{l \rightarrow \infty} \sup_{t \in [0; T]} \|q_l(t) - q_d(t)\| \leq \mu \quad (2.14)$$

В реални условия тази точност може да бъде установена чрез експериментални опити [21, 7].

Ограниченията в (2.13) за u_i , $i = 1, 2, \dots, n$ могат да бъдат удовлетворени, чрез използването на проекционни методи [2,11]. В [21] е доказано, че \dot{q}_i , $i = 1, 2, \dots, n$ са ограничени, защото u_i , $i = 1, 2, \dots, n$ изпълнява (2.13). Тогава, може да приемем, че $-\dot{Q}_i^{max}$ и \dot{Q}_i^{max} отговарят на реалните граници на обобщените скорости. Тогава, за да може да се приложи ИЛС при ограничения на обобщените координати е необходимо да са изпълнени ограниченията за q_i , $i = 1, \dots, n$ дефинирани в (2.13).

В общия случай, ИЛС не отчита наличието на тези ограничения на обобщените координати по време на изпълнение на отделните итерации. Това може да доведе до задание за изпълнение на невъзможна траектория (Фигура 1.13), която да наруши ограниченията за q_i в (2.13). Това е много вероятно да се случи, когато желаната траектория е планирана да мине много близко до границите на обобщените координати или когато се прояви проблемът за нарастването на преходната грешка. В реални условия, това ще доведе до прекъсване на процеса на итеративно самообучение.

ИЛС методът не е директно приложим в реални условия и в управлението на индустриални манипулационни роботи. Нещо повече, известните оптимизационни методи, методи с бариерни функции и проекционни методи също не могат да се приложат когато траекторията минава близко до ограниченията.

Ако изпълнените траектории по време на всяка итерация се ограничат по такъв начин, че да не се нарушават ограниченията на обобщените координати, то ИЛС базиран метод би бил много удобен за прилагане в управлението на роботи, които трябва да изпълняват прецизно и многократно определена траектория. Може да се подходи по подобен начин на вече разгледания метод BEILC, който разрешава проблема за наличието на преходна грешка. BEILC налага ограничения върху възможните изпълнени траектории по време на всяка итерация.

Дефиниране на максимално допустимата област на планирано движение

Нека $\mu > 0$ е точността на ИЛС метода (2.14). За да може да завърши успешно BEILC метода, то трябва да се избере $\varepsilon > \mu$. По време на изпълнението изходните траектории ще са ограничени в хипер-тръба с радиус ε . От зададените в (2.13) ограничения, следва, че максимално допустимата област на планирано движение, при оценяване на допуснатата грешка, чрез (2.12) е:

$$D = (q_1^d, \dots, q_n^d): q_i^d \in (Q_i^{min} + \mu, Q_i^{max} - \mu), i = 1, \dots, n \quad (2.15)$$

Дефиниране на условие за избор на ограничение на грешката

Нека да разгледаме желана траектория $q_d = (q_1^d, \dots, q_n^d): q_i^d \in [Q_i^{min}, Q_i^{max}], i = 1, \dots, n$ която да удовлетворява неравенствата:

$$\min \left(\min_{t \in [0; T]} (Q_i^{max} - q_i^d(t)), \min_{t \in [0; T]} (q_i^d(t) - Q_i^{min}) \right) > \mu, i = 1, \dots, n, \quad (2.16)$$

където μ е точността на ИЛС метода (2.14).

От друга страна от вече дефинираната максимално допустимата област на планирано движение \mathbf{D} , следва че ε е ограничено отгоре. От (2.16) следва, че може да се избере δ : $\delta = \min_{i=1,\dots,n} \left(\min_{t \in [0,T]} (Q_i^{max} - q_i^d), \min_{t \in [0,T]} (q_i^d - Q_i^{min}) \right) - \mu > 0$ и съответно:

$$\varepsilon = \mu + \delta = \min_{i=1,\dots,n} \left(\min_{t \in [0,T]} (Q_i^{max} - q_i^d), \min_{t \in [0,T]} (q_i^d - Q_i^{min}) \right) \quad (2.17)$$

Очевидно, $\mathbf{q}_d: q_i^d \in [Q_i^{min} + \varepsilon, Q_i^{max} - \varepsilon] \subset \mathbf{D}$.

Следователно, \mathbf{q}_d принадлежи на максимално допустимата област на планирано движение, в която BEILC може да се приложи успешно.

От направените изследвания следва, че ε трябва да се избере максимално голямо, за да се постигне по-добра скорост на сходимост. Дефинираната стойност в (2.17) е максималната стойност за ε за зададената траектория, която удовлетворява ограниченията на обобщените координати.

Дефиниране на нов SCILC подход

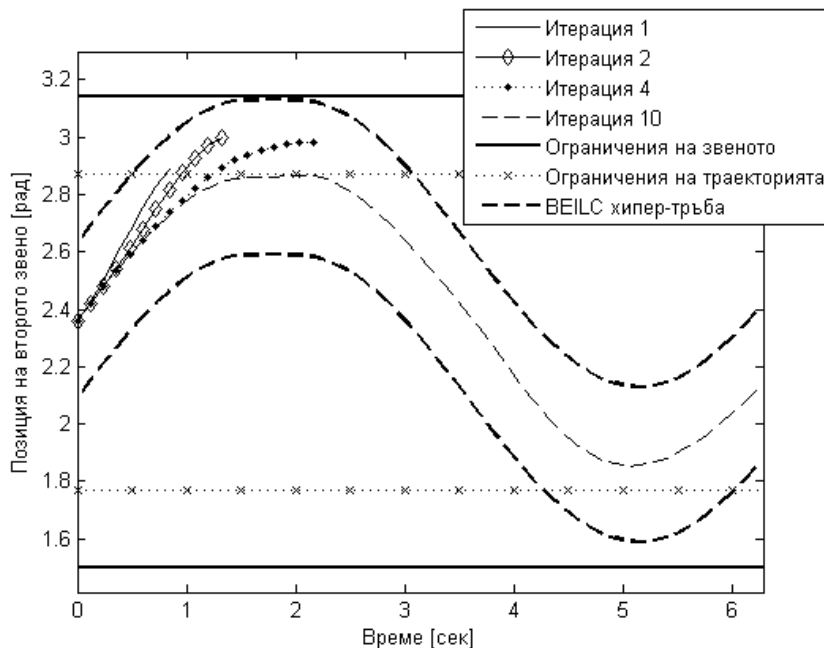
Ако зададената траектория е от дефиниционната област (2.15) и BEILC се приложи със стойността за ε , дефинирана в (2.17), то всяка изпълнена траектория $\mathbf{q}_l(t), t \in [0, T]$ ще се намира в хипер-тръба с радиус ε около зададената траектория: $\mathbf{q}_d(t): q_i^d(t) \in [Q_i^{min} + \varepsilon, Q_i^{max} - \varepsilon], t \in [0, T]$. Следователно, тази хипер-тръба ще се намира в зададените ограничения на обобщените координати в (2.13). Предложеният метод едновременно решава и проблема за нарастването на преходната грешка, съгласно [4]. Този подход в дисертацията е наричен: Space Constrained ILC (SCILC).

SCILC подходът е общо решение на проблема за прилагането на ILC за управлението на манипулационни роботи, защото той отчита и предотвратява нарушаването на техните ограничения. Този подход може да бъде директно използван. Освен това, е изчислително ефективен. Необходимо е във всеки момент да се пресмята единствено неравенството $\|\mathbf{q}_l(t) - \mathbf{q}_d(t)\| < \varepsilon, l = 0, 1, \dots, N$. Стойността на ε е предварително известна и тя зависи пряко от зададената траектория. Не е необходимо да се правят допълнителни оценки за ε .

Изследване на SCILC, чрез компютърна симулация

За това изследване е разширена вече създадената и описана компютърна симулация на робот PUMA 560. Броят на итерациите е ограничен до 50. Точността μ на ILC процедурата е зададена на 0.065 радиана. Константата δ е изчислена на 0.205 rad и съответно $\varepsilon = \mu + \delta = 0.27$ rad. За обучаващ оператор е избран \hat{A} от (2.6), т.е. условието за робастност и сходимост (2.9) е изпълнено, и процесът е сходящ.

Зададената траектория на второто звено е показана на Фигура 2.10, съответно с ограниченията на обобщените ъгли (означени като "Ограничения на звеното") и ограниченията върху множеството на зададени траектории (означено като "BEILC хипер-тръба"). Илюстрирано е, че началните итерации са прекратени преди да се достигне крайното време, но и без да се нарушават ограниченията на обобщените координати. Това е пряк резултат от прилагането на BEILC алгоритъма. Изпълнението им е до момента, в който текущата траекторна грешка е на път да наруши ограниченията на обобщените координати. Стандартният закон за адаптация щеше да продължи изпълнението, което щеше да доведе до аварийно спиране или повреда на манипулационния робот. Компютърната симулация експериментално доказва, че SCILC подхода решава проблема за прилагането на ILC метод при манипулационни роботи с ограничения на обобщените координати.



Фигура 2.10. Изпълнени траектории от второто звено по време на различните итерации

Глава 3. Проектиране на учебен робот с три степени на свобода

В тази глава е реализиран модел на реален индустриален манипулатор, чрез който да се даде представа за приложимостта на предложения в предходната глава метод за ILC управление. Създадената машина е ценово ориентирана и ще е подходяща за използване и като учебен манипулационен робот. Основният научно-приложен принос тук е изборът и оптимизацията на модел на учебен манипулационен робот с цел съвместимост с ILC управление. Постигнати са следните приложни приноси – проектирани и разработени са манипулационен робот, както и софтуерна система за управлението му, чрез обратна връзка.

Използвани са достъпни на пазара компоненти, както и съвременни технологии за бързо прототипиране. Базовите елементи в конструкцията на робота са лагери, болтове, алуминиеви тръбички. За всички останали елементи е използвана технологията на 3D принтирането. През последното десетилетие, тази технология претърпява голямо развитие и намира широко приложение. 3D принтирането позволява проектът да е ценово ориентиран, защото цената не зависи от сложността на детайла, а от неговата маса и времето за печат; не е необходима пълна техническа документация (2D чертежи – печата се директно от 3D модела); не са нужни инструменти и формообразуващи калъпи за реализацията на детайлите [24]. За програмирането на базовите входно-изходни операции, необходими за задвижването на робота е използвана Arduino технологията [25]. В разработката на софтуера на системата за управление е използвана мета-операционната система за работи – ROS [26].

Разработеният робот използва като основа проекта с отворен код: uStepper Robot Arm [27]. Този робот има три степени на свобода и солидна конструкция, която позволява изпълнението на задачи като движение по предварително планирана траектория, движение от точка до точка, пренасяне на обекти. Първото звено на робота може да се завърта на 360 градуса. Работната зона е от 320 до 540 mm. Височината на работната зона достига до 300 mm. Движението на второто и третото звено се осъществява посредством зъбна предавка с предавателно отношение 4,09:1.

В стандартната си конфигурация роботът използва стъпкови мотори, които позволяват прецизно позициониране. Тези мотори имат 16 микростъпки и автоматична корекция при

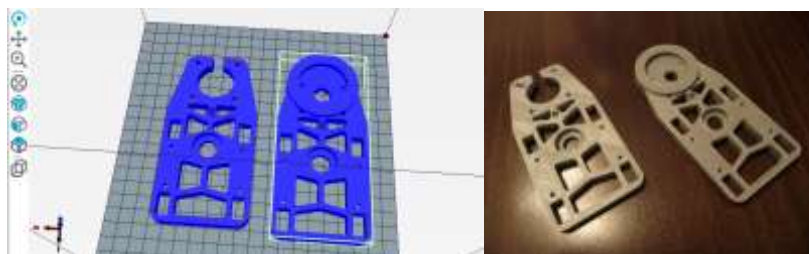
пропускане. Такъв тип мотори не позволяват верификация на ILC методите. Причината е, че тяхната точност е лимитирана в рамките на минималната стъпка и не може да се подобрява. Освен това, този тип задвижване е коренно различно от симулираното в предходните експерименти. Една от основните характеристики на модифицирания робот е използването на постоянно токови мотори с енокодери. При този тип мотори управлението може да бъде зададено прецизно, както и да се отчете допуснатата грешка по време на траекторното изпълнение.

Сензорна и задвижваща система на робота

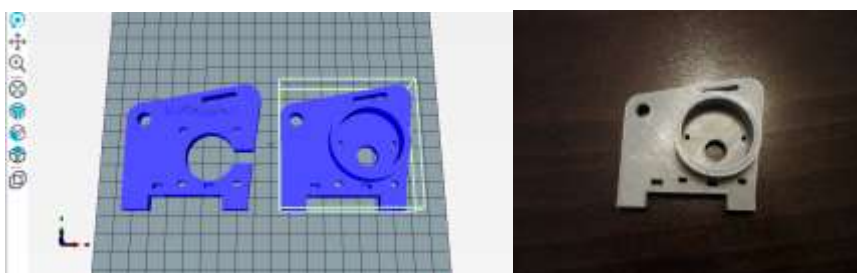
Избраните задвижващи мотори са Cytron 12V, 38 RPM 120:1 Gear Motor w / Encoder. Необходими са 3 броя. Те са постоянно токови мотори с редуктор. Тези мотори са стандартно оборудвани с магнитен енокодер с датчик на Хол. Енокодерът е прави по 3 отчитания на всяко завъртане на вътрешната ос на мотора. Този енокодер е от квадратурен тип, което позволява отчитане както на посоката на въртене, така и на четирикратно повишаване на резолюцията на отчитането. Това води до 12 отчитания за 360 градусово завъртане на вътрешната ос. Моторът има редуктор с отношение 1:120. Това означава, че постигнатата резолюция е 1440 отчитания за 360 градусово завъртане на външната ос.

Модифициране с цел съвместимост с постоянно токови мотори

За да могат да се използват постоянно токови мотори е необходимо да се модифицират основните структурни елементи на избрания робот по начин, който да позволява лесното и прецизно закрепване на моторите. Това модифициране е извършено, чрез промяна на файловете от които се 3D принтира детайла. Промените са показани на Фигура 3.7 и Фигура 3.8.



Фигура 3.7. Корекции в долната част на първо звено с цел монтиране на постоянно токови мотори



Фигура 3.8. Корекции в страниците на първо звено с цел монтиране на постоянно токови мотори



Фигура 3.12. Модифицирана версия на uStepper Robot Arm, позволяваща използването на постоянно токови мотори

Избраните постоянно токови мотори са с различен диаметър на външната ос в сравнение със стандартните стъпкови мотори. Освен това, местоположението на техните оси се променя, поради характеристиките им и изместените крепежните точки. Това налага и промяна на задвижващите зъбни предавки. Крайният резултат от модификацията на избрания модел е показана на Фигура 3.12.

Управляваща електроника

За управлението на работа на ниско ниво избрана входно-изходната платка с отворен код - Arduino Mega 2560. Нейният микроконтролер е ATmega2560. Тя има 54 цифрови входно/изходни пина (15, от които има ШИМ), 16 аналогови пина, 4 хардуерни серийни порта (UART), и др. Избрана е, защото има цели 256 KB памет за програмен код и най-важното 6 от нейните пинове могат да се използват като външни прекъсвания. Трите задвижващи мотора разполагат с квадратурни енкодери. Прецизното отчитане на всеки от тях изисква по 2 броя външни прекъсвания, т.е. общо 6 броя. С толкова разполага и платката.

Друга важна част от електрониката е платка, която подава напрежение към моторите. За целта е избрана драйверна платка за постоянно токовите мотори Pololu Dual DC Motor Driver 1A, 4.5V-13.5V- TB6612FNG. Тя позволява управление на два мотора. Поради тази причина се налага да се използват 2 броя. Те се свързват към микроконтролера, като всеки от драйверите изисква по два цифрови пина за определяне на посоката на въртене, един цифров пин за активиране на режим на готовност (или аварийен стоп) и на двата управлявани мотора, както и един пин с ШИМ, който задава подаденото напрежение към мотора. Arduino Mega 2560 разполага с необходимия брой входно/изходни пина за поддържането дори на повече от два такива драйвера.

Проектиране и имплементиране на система за управление

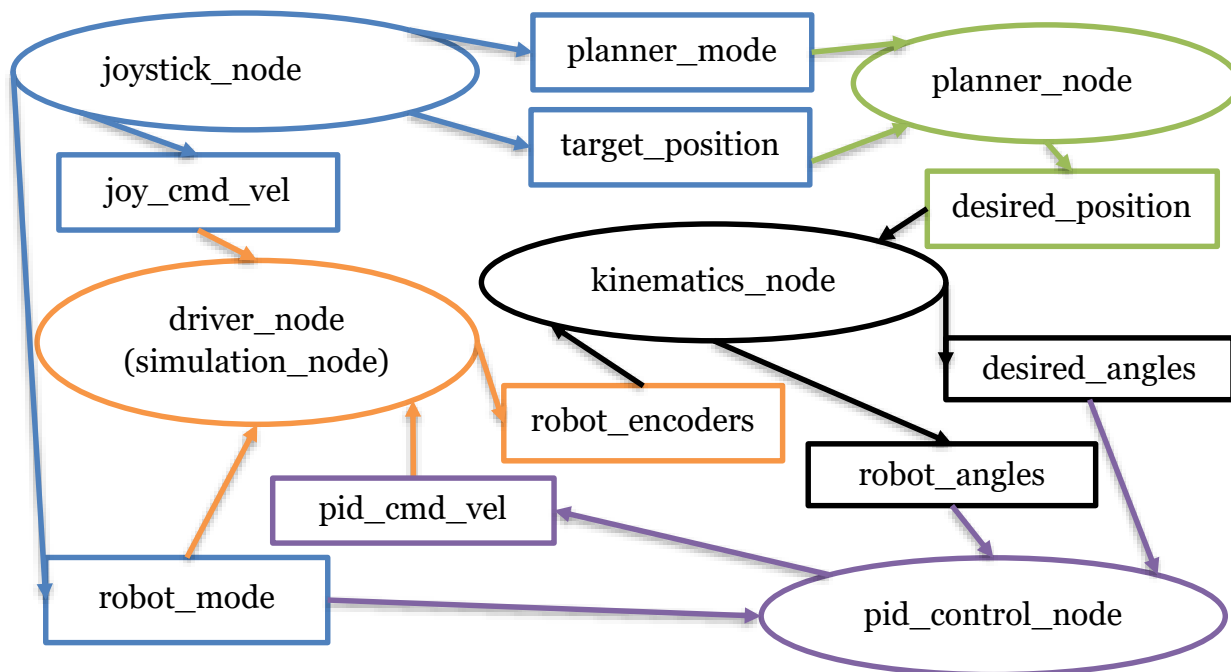
За реализиране на системата за управление на вече проектирания робот ще е необходимо да се създаде модул за входно-изходни операции за физическия робот, който да отговаря за подаването на команди към изпълнителните механизми (постоянно токовите мотори) и отчитането на данните от сензорната система (енкодерите на моторите) на работа в реално време. Този софтуерен модул се изпълнява върху микроконтролера, намиращ се в развойната платка Arduino Mega 2560. Освен него, в управлението ще участва и стандартен компютър работещ под операционна система с отворен код Ubuntu 16.04. Тази операционна система е съвместима с мета-операционната система за работи - Robot Operating System (ROS). Използването на ROS позволява разделянето на проектираната система на отделни модули (nodes), които да комуникират асинхронно по между си, чрез информационни канали (topics). ROS ускорява разработката на крайния продукт, понеже могат лесно да се използват повторно вече написани модули, които осигуряват надеждна серийна комуникация на ниско ниво с входно-изходната платка, получаване на данни от физически джойстик, както и лесно визуализиране на текущото състояние на работа.

За целите на управлението на проектирания робот са имплементирани следните софтуерни модули:

- модул за решаване на права и обратна задача на кинематиката;
- модул за планиране на зададена траектория;
- модул за ръчно управление и избор на работен режим;
- модул за графичен потребителски интерфейс;
- модул за входно-изходни операции за физическия робот;

- модул за симулиране на входно-изходни операции;
- модул (серво-контролер) за PID управление с обратна връзка.

Общата схема на ROS системата е показана на Фигура 3.15. В елипси са изобразени отделните модули, в правоъгълници – комуникационните канали. Стрелките в посока от модул към канал показват, че дадения модул записва данни в канала. Стрелките насочени от канал към модул показват, че модулът чете данни от посочения информационен канал.



Фигура 3.15. Комуникационна схема на изградената ROS система за управление

Модул за симулиране на входно-изходни операции

Симулацията на поведението на физическия робот позволява по-ефективна разработка на останалите модули, защото не се налага да се реконфигурира физическия робот. Симулацията предотвратява настъпването на повреди в машината, произтичащи от грешки в програмния код. Когато програмният код е пуснат през симулацията и е верифициран, то той може да се използва и върху физическия робот. ROS е замислена с идеята програмният код да се раздели на достатъчен брой отделни компоненти, които да взаимодействат помежду си посредством унифициран комуникационен интерфейс. Това позволява направата на модул за симулация на входно-изходните операции, който да има същите комуникационни характеристики, както и модулът за входно-изходни операции за физическия робот. За останалите модули симулираните входно-изходни операции са неразличими от реалните такива.

Интегриране на модула за входно-изходни операции в ROS системата

Има два основни подхода за интегриране на модула за входно-изходни операции в ROS система. Тези модули най-често разчитат на някакъв вид серийна комуникация. Чрез нея те получават команди и връщат текущите показания на сензорите. Единият начин е да се имплементира допълнителен модул, който осъществява тази комуникация и я преобразува в съобщения, които са разбираеми за другите ROS модули. Другият вариант е самият модул за входно-изходни операции да е така проектиран, че да се свързва директно в ROS системата. За гореописания робот е избран микроконтролер, който е съвместим с Arduino платформата. За Arduino има готови библиотеки, които правят микроконтролера директно

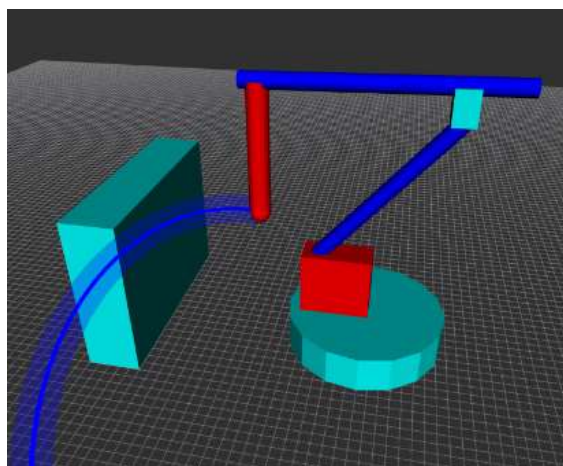
съвместим с ROS. Този подход позволява, модулите за реални и симуирани входно-изходни операции да са взаимнозаменяеми. Самото интегриране ще се осъществи по време на програмирането на микроконтролера.

Глава 4. Разширение на SCILC и експериментална верификация

Проектираният робот разполага с PID управление с обратна връзка. Това управление може да постигне прецизно изпълнение на зададена траектория, когато се комбинира от ILC метод. Такъв подход ще компенсира траекторната грешка след изпълнение на краен брой повторения. В тази глава е допълнена разработената в Глава 3 система за управление по начин, по който да може да се използва ILC управление. Това е приложният принос в тази глава. Постигнат е научно-приложен принос – верифицирана е приложимостта на ILC метод в управлението на реален манипулационен робот ([И1], [И2], [И3]).

Адаптиране на условията за спиране на итерацията на SCILC при наличие на препятствия

На Фигура 4.3 с плътна линия е показана примерна планирана траектория, която минава близо до друг обект в работното пространство. Вече представеният SCILC метод ограничава множеството на изпълнените траектории по време на всяка итерация до тези, които са разположени в хипер-тръба с радиус ε около зададената траектория. Стойността на ε е избрана, така че да не е възможно по време на някоя итерация да се наруши някое от ограниченията на обобщените координати. Аналогично, когато имаме допълнителни обекти и ограничения в работното пространство, то стойността на ε може да се избере така, че хипер-тръбата да ограничава множеството на траекториите по начин, който не позволява нарушаване на ограниченията. На Фигура 4.3. със полупрозрачен син цвят е показана максималната ε -тръба за зададената траектория.



Фигура 4.3. Желана траектория (тъмно синя линия) и наложени от SCILC ограничения (полу-прозрачно синя тръба)

При SCILC има следната закономерност: радиусът на тръбата $\varepsilon = \mu + \delta$, където μ е експериментално установената точност на ILC метода за конкретния робот, а δ зависи от зададената траектория и може да се интерпретира като най-малкото разстояние от зададената траектория до външните граници на работното пространство. По аналогичен начин, когато работното пространство е ограничено и от други обекти, а не само от възможностите на движение на звената, то има и вътрешни граници. В този случай, δ може да се избере така, че да отговаря на най-малкото разстояние между зададената траектория и някоя от всички (външни и вътрешни) граници на работното пространство. След това SCILC подходът може да бъде директно приложено.

Дефиниране на ново условие за прекъсване на итерациите при SCILC

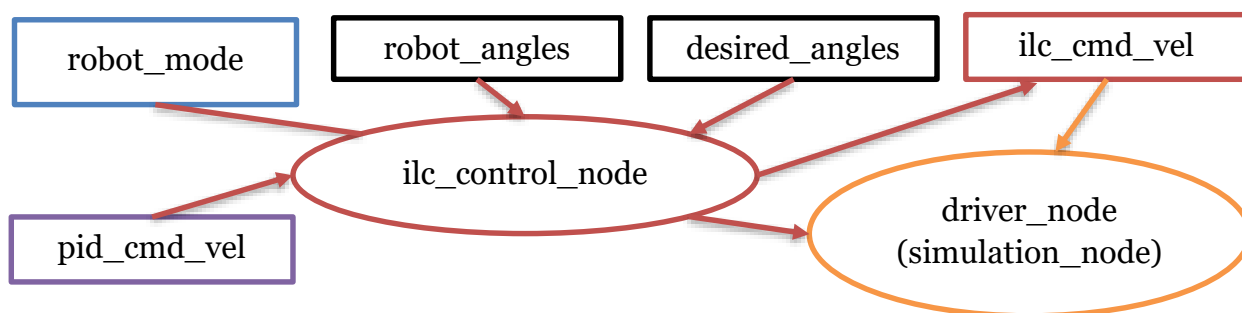
Нека първо да се разгледа частният случай на ограничено работно пространство, когато има само ограничения на обобщените координати. За този частен случай е формулирано ново условия за прекъсване: Прекъсване на изпълнението на итерация l в момент t : $0 < t < T$, ако съществува i , такава че:

$$q_{i,l}(t) \leq Q_i^{min} \text{ или } q_{i,l}(t) \geq Q_i^{max}, \text{ за някое } i = 1, \dots, n \quad (4.1)$$

Това условие (4.1) не налага допълнителни ограничения върху възможните траектории. Следователно, те са в максимално възможен обем и всяка итерация, ако се прекъсне преждевременно, то това е в последния възможен момент, точно преди момента, в който се нарушава някое конкретно ограничение на обобщените координати. Новото условие не зависи от зададената траектория и намалява необходимостта от допълнителни изчисления. Когато освен ограничения в обобщените координати има и допълнителни ограничения на работната зона, то може да се приложи аналогично условие, което следи дали текущата конфигурация на робота по време на конкретна итерация няма да наруши някое от ограниченията или да се предизвика сблъсък с друг обект.

Нов модул за SCILC управление

Реализираната в Глава 3 система за управление е допълнена от още един модул. Този модул реализира SCILC метод. Комуникационната схема на този модул е показана на Фигура 4.4.

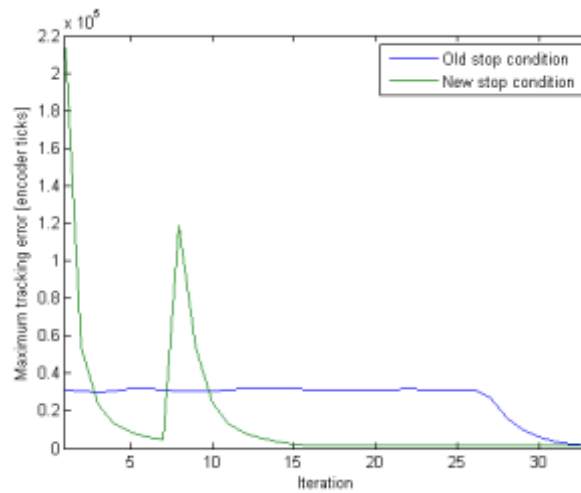


Фигура 4.4. Комуникационна схема на модул за SCILC управление

Експериментална постановка и получени резултати

Направени са два вида експерименти. Първата група са експерименти, чрез компютърна симулация. Те се правят, за да се потвърди приложимостта на новото условие (4.1) преди да се използва върху реалния манипулационен робот. Това предотвратява негови евентуални повреди. Симулацията е направена отново върху робот PUMA 560. Вторият експеримент е върху вече проектирания тризвенеен манипулатор. При него се верифицира както SCILC, така и приложимостта на новото условие. Това позволява да се направи директно сравнение между тях.

Резултатите показват, че в дадената ситуация SCILC метода при използване на хипертръба има нужда от 33 итерации и 83.6 секунди, за да постигне същата прецизност, каквото се постига с новото условие (4.1) в рамките на 15 итерации и 48.1 секунди (Фигура 4.7). Това е подобрение на необходимото време за изпълнение от 1.74 пъти. Чрез този експеримент е верифицирана и приложимостта на SCILC подхода в управлението на манипулационни работи ([И1], [И2], [И3]).



Фигура 4.7. Изследване на сходимостта на SCILC

Заклучение

В дисертационния труд са разгледани основните проблеми за прилагането на ILC в управлението на манипулационни роботи. Решени са широк кръг от задачи, включващи избягване на нарастване на преходната грешка, както и ненарушаването на ограниченията в обобщените координати по време на изпълнение на траекторно движение.

В процеса на работа е проведено изследване на същността на методите за траекторно управление на манипулационни роботи. Анализирани са предимствата и недостатъците на ILC за управление на манипулационни роботи. Направен е критичен анализ на съществуващите подходи за разрешаване на проблема с нарастването на преходната грешка. Представен е Bounded Error ILC (BEILC) методът като най-добро решение на проблема с нарастването на преходната грешка. Изградена е компютърна симулация на робот PUMA 560, чрез която BEILC и неговите параметри са подробно изследвани. На базата на това изследване е синтезирана нова стратегия за изпълнение на итеративната процедура за траекторно управление на манипулационен робот, която отчита наличието на ограничения в работното пространство – SCILC подход.

Разработен и реализиран е учебен манипулационен робот с три степени на свобода. Изследвани са софтуерните продукти и операционни системи с отворен код за управление на манипулационни роботи върху платформа Arduino Mega 2560. На базата на тези продукти е изградена система за управлението на този робот. Чрез работа е експериментално верифицирана приложимостта на синтезираното управление с итеративно самообучение.

Целта на дисертацията за изследване, подобряване и създаване на методи, алгоритми и системи за управление с итеративно самообучение на реални манипулационни роботи е изпълнена. Предложеният SCILC подход отговаря на всички поставени изисквания и е по-добър от наличните към момента алтернативни решения.

Перспективи за развитие

За в бъдеще ще продължат изследванията върху прилагането на системата за управление, в която е интегриран SCILC подходът. Настоящата дисертация показва, че този подход е приложим за подобряване на управлението на индустриални манипулационни роботи. Бъдещите изследвания са насочени към доказване на сходимост на предложеното ново условие за SCILC, което дава по-добри резултати относно намаляването на продължителността на итеративната процедура.

Ще бъде усъвършенстван учебният манипулационен робот с цел да може да изпълнява пълния набор от задачи на един индустриален робот със 6 степени на свобода.

Цитирана в автореферата литература

- [1] C. J.J., Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Reading: Addison-Wesley, 1985.
- [2] "Оперативна програма "Наука и образование за интелигентен растеж" 2014-2020 г. /одобрена от ЕК на 19.02.2015 г./".
- [3] J. F. Engelberger, Robotics in Practice: Management and applications of industrial robots, Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] K. Delchev, "Iterative Learning Control for Nonlinear Systems: A Bounded-Error Algorithm," *Asian Journal of Control*, vol. 15, no. 3, pp. 1-8, May 2013.
- [5] S. Arimoto, S. Kawamura and F. Miyazaki, "Iterative learning control for robot systems," in *Proceedings of IECON*, Tokyo, Japan, 1984.
- [6] R. Longman and Y. Huang, "The Phenomenon of Apparent Convergence Followed by Divergence in Learning and Repetitive Control," *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 8, no. 2, pp. 107-128, 2002.
- [7] K. Delchev, "Iterative learning control for robotic manipulators: A bounded-error algorithm," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 8 December 2014.
- [8] M. W. Spong, F. L. Lewis and C. T. Abdallah, Robot Control: Dynamics, Motion Planning, and Analysis, IEEE Press, 1992.
- [9] M. W. Spong, S. Huthchinson and M. Vidyasagar, Robot Modelling and Control, Wiley, 2005.
- [10] S. Arimoto, S. Kawamura and F. Miyazaki, "Bettering operation of robots by learning," *Journal of Robotic Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 123-140, 1984.
- [11] G. Casalino and G. Bartolini, "A learning procedure for the control of movements of robotic manipulators," in *IASTED Symposium on Robotics and Automation*, pages 108-111, Amsterdam, The Netherlands, 1984.
- [12] J. Craig, "Adaptive control of manipulators through repeated trials," in *Proc. of ACC*, San Diego, CA, June 1984.
- [13] D. A. Bristow and J. R. Singler, "Robustness Analysis of Slow Learning in Iterative Learning Control Systems," in *2011 American Control Conference on O'Farrell Street*, San Francisco, CA, USA, June 29 - July 01, 2011.
- [14] K.-H. Park and Z. Bien, "A Study On Iterative Learning Control With Adjustment Of Learning Interval For Monotone Convergence In The Sense Of Sup-Norm," *Asian Journal of Control*, vol. 4, no. 1, pp. 111-118, 2002.
- [15] D. Bristow and J. Singler, "Analysis of Transient Growth in Iterative Learning Control Using Pseudospectra," in *Symposium on Learning Control*, Shanghai, China, 2009.
- [16] S. Mishra, U. Topcu and M. Tomizuka, "Optimization-based constrained iterative learning control," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 1613-1621, 2011.
- [17] B. Chu and D. Owens, "Iterative learning control for constrained linear systems using projection method," in *International Workshop on Human Adaptive Mechatronics*, Loughborough, GB, 13 - 14 May 2010.

- [18] Y. Tan and J. X. Xu, "On iterative learning control for nonlinear time-varying systems with input saturation," in *Symposium on Learning Control at IEEE CDC 2009*, Shanghai, 2009.
- [19] A. Schöllig and R. D'Andrea, "Optimization-Based Iterative Learning Control for Trajectory Tracking," in *European Control Conference, pages 1505-1510*, Budapest, Hungary, 2009.
- [20] G. Oriolo, "An Iterative Learning Controller for Nonholonomic Mobile Robots," *The International Journal of Robotics Research September*, vol. 17, no. 9, pp. 954-970, 1998.
- [21] D. Heinzinger, B. Fenwick, B. Paden and F. Miyazaki, "Robust Learning Control," in *Proc. of 28th Conference on Decision and Control*, pp. 436-440, Tampa, FL, 1989.
- [22] B. Armstrong, O. Hhatib and J. Burdick, "The explicit dynamic model and inertial parameters of the puma 560 arm," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, vol. 1, pp. 510-8*, San Francisco, USA, 1986.
- [23] T. J. Tarn, A. K. Bejczy, S. Han and X. Yun, "Inertia parameters of puma 560 robot arm," in *Tech. Rep. SSMRL-85-01, Washington University, St. Louis, MO., Sept. 1988*.
- [24] И. Чавдаров, П. Дачкинов, А. Кръстев, В. Тренев and Г. Еленчев, "Проектиране и изследване на сглобени чрез 3D принтиране ротационни възли. Приложения за моделиране на механизми в роботиката," in *XXVI МНТК "АДП-2017"*, Созопол, 2017.
- [25] M. Banzl and M. Shiloh, *Getting started with Arduino: the open source electronics prototyping platform*, Maker Media, Inc., 2014.
- [26] A. Koubâa, *Robot Operating System (ROS): The Complete Reference*, vol. 2, Springer, 2017.
- [27] "uStepper Robot Arm Revision 3," [Online]. Available: <https://github.com/uStepper/uStepper-RobotArm-Rev3>. [Accessed 23 1 2018].

Приноси в дисертационния труд

С оглед на работата извършена в дисертацията и резултатите, получени в хода на изследванията и изложени по-горе, могат да бъдат формулирани следните приноси:

Научни приноси

- Систематизирани са съществуващи решения на поставените проблеми. Извършена е оценка на техните предимства и недостатъци (Глава 1, [П1]).
- Направен е критичен анализ на мета-операционната система за работи – ROS (Глава 1, [П6]).
- Изследвано е влиянието на параметрите на BEILC метода върху сходимостта му, когато се прилага в управлението на манипулационни работи (Глава 2, [П2], [П3], [Д3]).
- Дефинирана е максимално допустимата област на планирано движение, при която може да се приложи BEILC метод в управлението на манипулационен робот (Глава 2, [П1]).
- Дефинирано е условие за избор на основния параметър ε на BEILC метода (Глава 2, [П1]).
- Дефиниран е нов подход, който решава проблема за прилагане на ILC при наличието на ограничения на обобщените координати (Глава 2, [П1]).

Научно-приложни приноси

- Направена е компютърна симулация на робот със 6 степени на свобода PUMA 560. Предложените методи са верифицирани и изследвани, чрез симулацията (Глава 2, [П2], [П4], [Д1], [Д4], [Д5]).
- Избран и оптимизиран е модел на учебен манипуляционен робот с цел възможност за прилагане на ILC метод в управлението му (Глава 3, [И1], [И2], [И3]).
- Верифицирано е прилагането на ILC методи в управлението на реален манипуляционен робот (Глава 4, [П5], [Д2], [И1], [И2]).

Приложни приноси

- Разработен е учебен манипуляционен робот, чрез съвременни технологии за бързо прототипиране – 3D принтиране, платформата Arduino (Глава 3, [П5], [И1], [И2], [И3]).
- Реализирано е програмно осигуряване на реален манипуляционен робот (Глава 3 и Глава 4, [П5], [П6], [И1], [И2], [И3]).

Публикации, доклади и участие в проекти, свързани с темата на дисертацията

Публикации:

- П1. *Kaloyan Youchev, Kamen Delchev, Evgeniy Krastev, State Space Constrained Iterative Learning Control for Robotic Manipulators*, Asian Journal of Control, Vol. 20, No. 1, 2018, стр.1-6, doi:DOI: 10.1002/asjc.1680, Ref IR (0.846 - 2016)
- П2. *Kaloyan Youchev, Kamen Delchev, Evgeniy Krastev, Computer Simulation of Bounded Error Algorithm for Iterative Learning Control*, Advances in Robot Design and Intelligent Control, Edition: Advances in Intelligent Systems and Computing, издателство: Springer International Publishing, 2016, стр.136-143, doi:10.1007/978-3-319-49058-8_15, Ref IF (0.32 - 2016)
- П3. *Kaloyan Youchev, Finding the Optimal Parameters for Robotic Manipulator Applications of the Bounded Error Algorithm for Iterative Learning Control*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, том:47, брой:4, 2017, стр.3-11, doi:10.1515/jtam-2017-0016
- П4. *Kaloyan Youchev, Bounded Error Iterative Learning Control*, IUTAM Symposium on Intelligent Multibody Systems - Dynamics, Control, Simulation, България/курортен комплекс Дюни 2017, стр. 41-42
- П5. *Kaloyan Youchev, Iterative Learning Control for Precise Trajectory Tracking Within a Constrained Workspace*, RAAD 2018, Patras, Greece
- П6. *D. Chikurtev, I. Rangelov, N. Chivarov, E. Markov, Kaloyan Youchev, Control of Robotic Arm Manipulator Using ROS*, PROBLEMS OF ENGINEERING CYBERNETICS AND ROBOTICS, 2018, стр.52-61, Print ISSN: 0204-9848, Online ISSN: 1314-409X

Публикации в интернет пространството

- И1. **Видеозапис от 3D визуализацията на SCILC с условие за прекратяване на итерация (4.1) експерименти**, 18 януари 2018 г., Автор: Калоян Йовчев, URL: <https://youtu.be/SM3MtZ882wQ>, [Отваряно на 2 Април 2018]

- И2. **Видеозапис от първи тестове на ILC метод върху проектирания в глава 3 и 4 манипуляционен робот**, 8 октомври 2017, Автор: Калоян Йовчев, URL: <https://youtu.be/T7oVl3xt6Pc>, [Отваряно на 2 Април 2018]
- И3. **Видеозапис от настройка и тестване на управление в ръчен режим на проектирания робот**, 20 септември 2017, Автор: Калоян Йовчев, URL: <https://youtu.be/JABVgCEhq5Y>, [Отваряно на 2 Април 2018]

Доклади:

- Д1. **Bounded Error Iterative Learning Control**, IUTAM Symposium on Intelligent Multibody Systems - Dynamics, Control, Simulation, България/курортен комплекс Дюни 2017
- Д2. **Прилагане на итеративно управление със самообучение при манипулатори с ограничения на пространството на обобщените координати**, Пролетна научна сесия на ФМИ, България 2017
- Д3. **Finding the Optimal Parameters for Robotic Manipulator Applications of the Bounded Error Algorithm for Iterative Learning Control**, 13-TH NATIONAL CONGRESS ON THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS, България/София 2017
- Д4. **Итеративно управление със самообучение: Компютърна симулация на Bounded-Error Algorithm**, Пролетна научна сесия на ФМИ, България 2016
- Д5. **Computer Simulation of Bounded Error Algorithm for Iterative Learning Control**, Robotics in Alpe-Adria-Danube Region – RAAD 2016, Сърбия/Белград 2016

Участие в проекти:

1. **Разработка на методи и алгоритми за управление на манипуляционни роботи**, ФНИ-СУ, 2018, Договор № 80-10-5/16.04.2018
2. **Автоматично пробиване на кости при фрактури на тазобедрена става**, ФНИ-СУ, 2017, Договор №. 80-10-233/2017
3. **Разработка на методи и алгоритми за управление на манипуляционни роботи**, ФНИ-СУ, 2017, Договор №. 80-10-153/21.04.2017
4. **Автоматично регистриране на далечния кортекс**, ФНИ-СУ, 2016, Договор №. 187/2016
5. **Разработка на методи и алгоритми за Итеративно управление със самообучение на манипуляционни роботи**, ФНИ-СУ, 2016, Договор №.129/12.04.2016
6. **Телеуправляеми Сервизни Роботи Повишаващи Качеството на Живот на Възрастни Хора и Инвалиди**, ФНИ-МОН, ДН 07/23 – 15.12.2016

Декларация за оригиналност

Декларирам, че представената във връзка с провеждането на процедура за придобиване на образователна и научна степен „доктор“ в Софийски университет „Св. Климент Охридски“ дисертация на тема: „Итеративно самообучение за управление на манипулационни роботи“ е мой труд.

Цитиранията на всички източници на информация, текст, илюстрации, таблици, изображения и други са обозначени според стандартите.

Резултатите и приносите на проведеното дисертационно изследване са оригинални и не са заимствани от изследвания и публикации, в които нямам участие.

Подпис:

/Калоян Йовчев/

Биографични данни за автора на дисертационния труд

Калоян Йовчев е роден през 1990 г. в гр. София. През 2009 г. завършва Софийска математическа гимназия „Паисий Хилендарски“. През същата година продължава обучението си във Факултета по математика и информатика (ФМИ) на Софийски университет (СУ) „Св. Климент Охридски“. Дипломира се като бакалавър по Компютърни науки през 2013 г. През 2015 получава магистърска степен в направление по информатика и компютърни науки, специалност „Мехатроника и роботика“, отново във ФМИ. Дипломната му работа е в областта на безпилотните летателни апарати. През 2015 г. е зачислен като редовен докторант към катедра „Информационни технологии“ на ФМИ, СУ. Темата на дисертацията му е „Итеративно самообучение за управление на манипулационни роботи“.

От 2015 г. е хоноруван преподавател във ФМИ и води упражнения към курсове „Функционално програмиране“ и „Обработка на изображения“. От септември 2015 година е член на Постоянната комисия по природни науки, математика и информатика към Националната агенция за оценяване и акредитация.

Научните интереси на Калоян Йовчев са разнообразни, но най-вече са в областта на мехатрониката и роботика – управление на манипулационни роботи и проектиране и създаване на сервизни роботи.

Благодарности

Бих искал да изкажа специални благодарности на моите научни ръководители проф. д-р Евгений Кръстев и доц. д-р Камен Делчев за ценните съвети, забележки и коментари.

Бих искал също да изкажа благодарност на членовете на катедри „Информационни технологии“ и „Мехатроника, роботика и механика“ за съветите и напътствията.

Издавам благодарности и към Институт по механика – БАН, ИИКТ-БАН, както и към ЕПУ-Перник за подкрепата и предоставената възможност за участие в научни проекти.