

APPLICATION OF RADIO ENGINEERING METHODS ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ РАДІОТЕХНІКИ

УДК 621.865.8 (045)

DOI:10.30837/rt.2023.4.215.10

О.Й. ДОВНАР, канд. техн. наук, В.І. ЧЕРКІС, О.М. ЗІНЧЕНКО, О.О. КАДАНЕР

ОДИН СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ МЕДИЧНОГО МАНІПУЛЯТОРУ ДЛЯ СТЕРИЛЬНИХ БОКСІВ

Вступ

У 1985 р. була проведена операція 52-річному чоловіку, де пацієнт був зафіксований у комп'ютерному томографі. Складність операції була у незручності втручання та необхідності точного позиціонування голки, котру мали ввести у мозок. Маніпулятором виступила модель від General Motors – PUMA 200, операція завершилась успішно, хоча наведена модель не позиціонувала себе як медичне обладнання. Це було перше хірургічне втручання маніпулятора, і такий успіх відкривав нові можливості. Тому вже через рік був розроблений ROBODOC. Таким чином, з'явилися роботи-хірурги, а з ними – нові можливості і новий рівень операцій. І на сьогодні розроблені механізми настільки підвищують та спрощують якість таких втручань, що деякі операції без них неможливі, або достатньо ризиковані.

Проблема забезпечення стерильності в медицині є досить актуальною, оскільки наявність інфекційних агентів у медичних установах може призвести до розвитку небажаних побічних ефектів у пацієнтів, ускладнень у процесі лікування та збільшення витрат на медичну допомогу. Зокрема, використання медичних маніпуляторів для роботи зі стерильними боксами може допомогти вирішити проблему забезпечення стерильності.

Актуальність дослідження полягає у розробці медичного маніпулятора, який допоможе ефективно та безпечно працювати зі стерильними боксами, забезпечуючи дотримання вимог стерильності.

Подібні системи уже наявні, наприклад [1 – 4], але їх використання чітко визначене виробником і має не весь необхідний персоналу функціонал, або у певних моментах може бути незручним у користуванні. Окрім того саме застосування керованих маніпуляторів у стерильному боксі має зараз найбільшу перспективу у клітинній інженерії та створенні штучних органів. Орієнтуватися необхідно на варіант, котрий буде відповідати максимальній кількості вимог як для хірургічного втручання, так і для автоматизованих процесів усередині стерильних боксів. Тому розробка має відповідати наступним критеріям: невеликі розміри; зручність застосування; можливість автоматизувати певні процеси; можливість віддаленого доступу; модульність, простота заміни компонентів; гнучкість, простота налаштування.

Вибір прототипу

Досягнення у галузі застосування роботів значно просувають як усю медицину, так і технології оперування. Розглянемо найвідоміші роботи-хірурги.

Роботизований комплекс Da Vinci [1] – це передова технологія в галузі хірургії. Це робот, яким керує хірург, він підвищує можливості лікаря, «поліпшує» його зір і точність рухів. При використанні такої системи хірург проводить операцію, сидячи за пультом. Він бачить об'ємне 3D зображення у десятикратному збільшенні та управляє роботом за допомогою маніпуляторів, що передають інструменту мінімальні рухи пальців хірурга.

Робочих «кінцівок» у робота цілих чотири, і всі вони мають рухливість майже на 360°. Роботична хірургія – це сім площин руху хірургічного інструмента, що дозволяє хірургу з максимальною точністю зберігати нервові волокна та кровоносні судини. У чоловіків це дозволяє зберегти ерекційну функцію та утримання сечі; у жінок – зберегти нормальні функції тазових органів, чутливість, секреторну функцію залоз піхви. При операціях на кишківнику дозволяє зберегти функції зовнішнього та внутрішнього сфінктеру прямої кишки.



Рис. 1. Комплекс Da Vinci

ROBODOC – унікальна комп'ютеризована система-робот для проведення операцій на суглобі [2].

Під час операції з встановлення імплантатів потрібна дуже висока точність, а при протезуванні штучним суглобом руками хірурга через "людський фактор" значно знижується точність проведення операції, виникають помилки, які можуть викликати ускладнення на суглобі. Використання ROBODOC зводить до нуля помилки, викликані "людським фактором", операція від початку до її закінчення прораховується комп'ютером з високою точністю, що допомагає мінімізувати болючі відчуття під час і після операції.



Рис. 2. Система ROBODOC

SMR Surgical Versius. Ця система [3] призначена для загальних хірургічних операцій, торакальних, гінекологічних та колоректальних процедур, а також для втручань на верхніх відділах шлунково-кишкового тракту. Рішення успішно застосовується в лікарні Galaxy Care в Пуні (Індія) при різних хірургічних операціях, що включають трансторакальні процедури, гістеректомію та міомектомію.

Оскільки система Versius є модульною, її можна легко та швидко переміщати між операційними залами, що розширює можливості використання та рентабельність платформи. Очікується, що робот-хірург скоротить тривалість хірургічного втручання та одночасно покращить результати лікування. І на сьогодні це найменший робот-хірург.

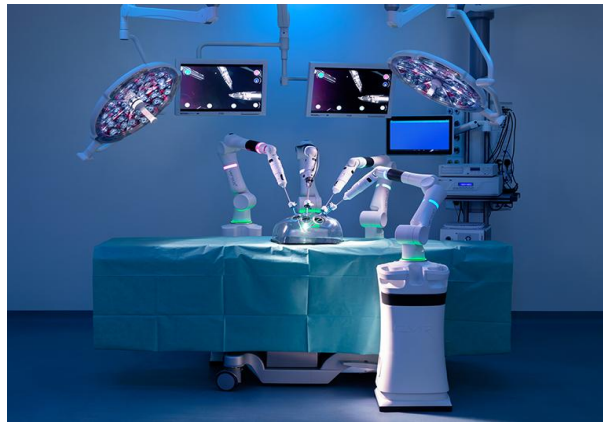


Рис. 3. Модульна система Versius

Проаналізуємо ці системи за наведеними вище критеріями.

1. Розміри. Тут виділяється Versius, оскільки має найменші розміри маніпуляторів і при цьому у функціональності не поступається Da Vinci. Роботизована система маніпулятора може займати небагато місця і не потребує дуже тонких налаштувань (вони можуть бути скориговані оператором під час операції).

2. Зручність застосування. Серед усіх можливих варіантів краще ніж Da Vinci поки що жодна система себе не показала. Зручність консолі хірурга дозволяє йому проводити найскладніші операції у набагато більшому комфорті, ніж звичайне втручання, що підвищує ефективність хірурга та швидкість відновлення пацієнта після операції

3. Можливість автоматизувати певні процеси. Оскільки ROBODOC знаходиться на ринку довше всіх, їй вдалося автоматизувати велику кількість процесів та створити інтуїтивний інтерфейс між комп'ютером та системою, що дозволяє завантажувати нові параметри та вносити їх до вже готового автоматизованого процесу.

4. Можливість віддаленого доступу. Da Vinci подолав цей бар'єр з великою перевагою, коли дозволив не просто віддалено керувати роботом-хірургом, але й віддалено асистувати хірургу, що відкриває нові можливості для навчання та дозволить передавати досвід молодим фахівцям.

5. Модульність, простота заміни компонентів. Тут найкращою виступає модульна система Versius. Це є однією з найбільших переваг як економічно, так і в плані ремонту та підтримки таких систем, відкриває новий рівень операцій для клінік середнього розміру.

6. Гнучкість, простота налаштування. Систему ROBODOC можливо відкалібрувати автоматизовано, що спрощує її подальше налаштування, але гнучкістю ця система не володіє. Натомість нова модульна система Versius пропонує цікаві рішення та може бути досить швидко налаштована під конкретну особу.

Одним з напрямків є створення альтернативи для сумісних маніпуляторів, бо зазвичай вони або надто дорогі, або не мають необхідних можливостей. У [4, 5] наведено повністю реалізовану парадигму недорогого маніпулятора з квазіпрямим приводом (Quasi-Direct Drive (QDD)) і показано технічні рішення при проектуванні цієї системи. Нас цікавить кожен сегмент.

На рис. 4 відображено, як два протилежно влаштовані мотори керують кінцевою передачею, що забезпечує не лише зміщення, але й обертальні рухи.

Застосування подібної схеми дозволяє збільшити кількість ступенів свободи, що для медичного маніпулятора є вкрай важливим, проте при такій конфігурації розміри будуть наближатись до категорії промислових роботів. Так, наприклад, у Blue розмір одного сегменту 110x110x220 мм, що робить його занадто великим для високоточних міні-маніпуляцій. Тож можемо зробити висновок – основним нюансом при створенні невеликого за розмірами маніпулятора є кількість та розміри компонентів.

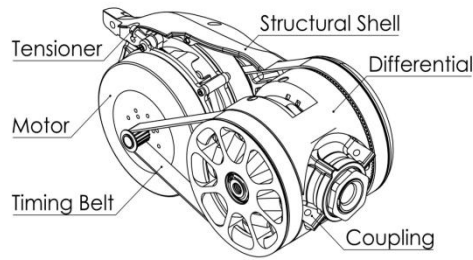


Рис. 4. Сегмент маніпулятора руки робота Blue



Рис. 5. Конічна передача

У більшості маніпуляторів застосовано крокові двигуни безпосередньо у конструкції руки, а їх розміри не можуть бути зменшені, окрім того, сам механізм може не передбачати такої можливості. Подолати обмеження розмірів маніпулятора – це непроста задача, зазвичай у таких випадках поступаються у потужності двигунів або змінюють конструкцію сегменту таким чином, щоб вдалося вмістити всі необхідні компоненти. У промислових роботів для різних складальних робіт такі складнощі зазвичай не виникають, але для невеликих маніпуляторів подібні технічні рішення досить обмежені, а для малих конструкція напряму залежить від мінімального можливого крокового двигуна, що відповідає потребам. Рішення, які застосовують у таких випадках, – винесення окремо механізму від керованого елемента (рис. 6). Таким чином, розмір конструкції маніпулятора можна значно скоротити, а також зробити складання та ремонт маніпулятора значно простішим та дешевшим.

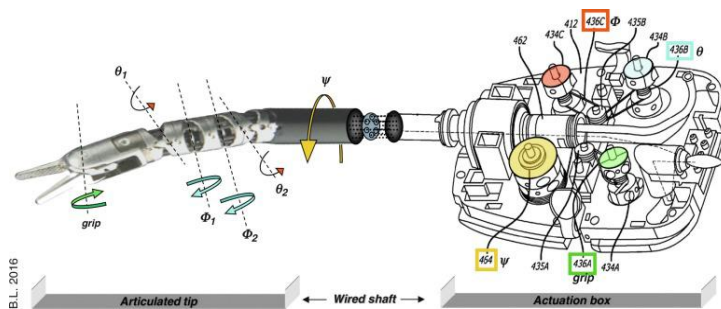


Рис. 6. Розділення маніпулятора на дві частини – маніпуляційна частина та тяговий механізм

Тяговий механізм розташований в окремому блоці. Подібна реалізація зустрічається у великій кількості маніпуляторів, наприклад шупи хірургічного робота Da Vinci. Це дозволяє максимально зменшити розміри маніпулюючих сегментів і все зайве винести окремо та проводити оперативні втручання у розрізі менше 2 см.

На рис. 7 показана схема, за якою працює велика кількість медичних маніпуляторів. Вдосконалення робота Da Vinci тривало 24 роки перед випуском на ринок і продовжується й досі, але є кілька недоліків, викликаних саме такою конструкцією, – це низька точність та невисока зносостійкість тросів. Окрім того така конструкція унеможливує процес автоматизації через постійну похибку. За даними [6, 7] приводиться похибка у сантиметр після декількох рухів, тому подібний механізм ідеальний для втручання з оператором, але неможливий у автоматизації.

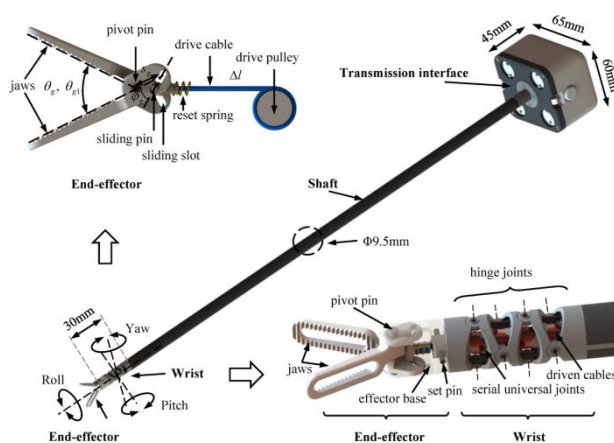


Рис. 7. Видовжений хірургічний щуп з тяговим механізмом

Невисока зносостійкість тросів змушує проводити заміну кожного щупа після десяти хірургічних втручань, що робить підтримку робочого стану маніпулятора досить коштовним. При недотриманні таких умов Da Vinci просто заблокує консольні команди і не буде слухати оператора.

Технічні рішення

Дослідження можливих варіантів передачі руху на сегменти маніпулюючої частини дозволило знайти наступну технологію. Її принципова відмінність – у невикористанні тяги на тросах, а передача руху через конічні шестерні. Тобто конструкція передбачає конічний центр з двигунами у самій основі маніпулятора, котрі передають рух сегментам (рис. 8).



Рис. 8. Конічний центр з двигунами

Над конічним центром розташовується конічний суглоб маніпулятора, де кожна шестерня матиме обертальний рух від окремого двигуна. Це дозволить максимально спростити обслуговування електронної та моторної частин. Загальний принцип роботи конічного суглобу показано на рис. 9.

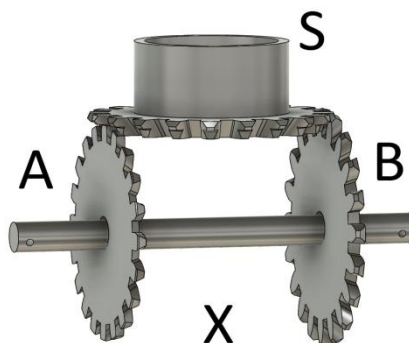


Рис. 9. Конічний суглоб

Розглядаючи даний приклад, можна побачити таку залежність.

Якщо шестерні А та В рухаються за годинниковою стрілкою відносно осі (тобто А до нас, а В від нас), то ми отримаємо обертальний рух шестерні S у праву сторону.

Якщо шестерні А та В рухаються проти годинникової стрілки відносно осі, то ми отримаємо обертальний рух у ліву сторону.

Якщо шестерні А та В будуть обертатися до нас, то ми отримаємо зміщення шестерні S відносно осі у нашу сторону прямо пропорційно оберту шестерень А та В.

Якщо шестерні А та В будуть обертатися від нас, то ми отримаємо зміщення шестерні S відносно осі від нас прямо пропорційно до оберту шестерень А та В.

Якщо шестерні А та В матимуть різну швидкість оберту, ми отримаємо зміщення та обертання прямо пропорційне коефіцієнту різностей швидкостей, чим більша різниця тим більше коефіцієнт обертання і менше коефіцієнт зміщення, і навпаки.

Для досягнення такого ефекту зі сторони X потрібно встановити відповідно дві шестерні окремо для А та В і тоді можливо буде керування у зазначених вище параметрах. Якщо брати до уваги, що це один з декількох сегментів і нам потрібно крізь нього передати оберт на наступні сполучення сегментів, то постає питання, як саме це можливо зробити. Для цього нам знадобляться внутрішня конусна передача, тобто для проведення маніпуляцій ми будемо застосовувати вісь Z та передавати обертання так само і для усіх наступних сполучень. Тобто кількість шестерень у сполученні з передачею оберту для кінцевої частини буде відповідати закономірності:

$$X = 2C + 1.$$

А без передачі оберту кінцевій частині відповідно

$$X = 2C.$$

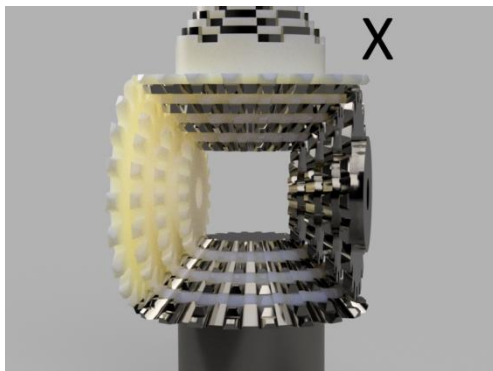


Рис. 10. Цільний конічний суглоб

Наприклад, якщо розглядати даний механізм передачі, можна порахувати, що кількість передаючих шестерень X (а саме – вісім) матиме відповідно чотири сполучення, отже над цією частиною знаходяться чотири сегменти керування, до яких і передається у даному сполученні, або три сполучення, і на кінцевіку встановлений керований щуп. Застосовуючи подібний механізм, можна без втрат точності та потужності значно зменшити маніпулятори, а також винести електроніку та механізм керування поза маніпулятор. Це підвищить точність і, оскільки вага двигунів буде винесена, додасть потужності. При цьому налагодження, ремонт та будь-яке інше втручання буде значно простішим ніж у більшості інших маніпуляторів. Зносостійкість модульних сегментів та сполучень залежить лише від матеріалів та кількості сполучень. Через те, що сегменти та деталі сполучень можна цілком друкувати на 3D-принтері, питання зносостійкості розглядається не як для маніпулятора у цілому, а як для модульної частини маніпулятора.

Що стосується електронної складової, то для абсолютно різних моделей з різною кількістю сегментів можна застосовувати плати NodeMcu v3. Цей вибір обумовлений невеликими розмірами, чудовими характеристиками мікроконтролера та достатнім об'ємом пам'яті і

вбудованою Esp8266. Від кожної плати можна розвести керування на п'ять крокових двигунів. Загальний порядок такий: головна плата отримує сигнал або напрям з комп'ютеру, або через wifi-мережу і передає його усім дочірнім. Кожна плата має свої номери двигунів, і тому розповсюдження усіх сигналів жодним чином не впливає на інші: якщо у плати є відповідний номер двигуна – рух відбудеться, а в іншому випадку просто буде проігнорований. Це дозволяє забезпечити необхідну модульність, тобто у будь-який момент можна буде додати кілька сегментів та ще одну плату керування до існуючого маніпулятора. Окрім того можливо підключити необмежену кількість маніпуляторів послідовно і керувати ними з одного комп'ютера.

Перевірка технічних рішень

Прототип, розроблений за даною технологією, показав повну відповідність виставленим вимогам. У перспективі робот матиме вигляд кварто-маніпулятора (чотири руки), що дозволить проводити хірургічні втручання (кількість обумовлена потребами операційного втручання). Зазвичай хірург використовує декілька інструментів одразу, одні необхідні для маніпуляцій, інші – для фіксації. Це дозволяє асистувати хірургу, тобто першими двома маніпуляторами керує сам хірург, а асистент – двома іншими.

Що стосується розмірів такого робота, то розміри прототипу складають 324x324x620 мм, але можуть бути зменшені чи збільшені в залежності від потреб. До того ж ця характеристика цілком залежить від кількості сегментів. Так, наприклад, 620 мм висоти – це три сегменти (що забезпечує сім ступенів свободи), кожен з сегментів має довжину 180 мм плюс конічний центр передачі висотою 80 мм. Це значно менше ніж у будь-якого існуючого на разі робота-хірурга. На виробництві розміри та кількість сегментів можна варіювати у значних проміжках.

З таким підходом механізм стане універсальним та незамінним у областях з невеликими за розмірами маніпуляторами. До того ж, виробництво може бути значно дешевшим за інші. Вартість прототипу одного маніпулятора складає близько 200 \$, якщо замінити пластик на метал, то ціна виросте до 1000 \$, відповідно загальна вартість робота-хірурга складатиме 800 – 4000 \$, що значно дешевше за всі аналоги.

Подібне обладнання може бути застосоване у місцях, де потрібно забезпечити високу планку оперативного втручання та надійну медичну допомогу від найкваліфікованіших осіб, зокрема у зонах бойових дій. Питання віддаленого доступу для хірургів не стоїть так гостро, як 20 років тому. Наразі у більшості українських батальйонів наявні станції starlink з швидкісним інтернетом, саме тому подібна революція серед медичних маніпуляторів відбувається сьогодні.

Для медичних боксів маніпулятор має володіти додатковими функціоналом для автоматизації. Тому блок конічного центру передачі додатково оснащується міні-комп'ютером для обчислень та програмування нових дій, що додає у вартості 200 \$, тобто загальна вартість маніпулятора складатиме від 400 до 1200 \$ за штуку (три сегменти). І при цьому це модульне устаткування, тому вартість ремонту значно нижча (30 – 90 \$ за заміну сегмента).

Висновки

У роботі представлений спосіб підвищення якості маніпулятора для стерильних боксів. У розробленому прототипі вдосконаленню підлягали дві основні характеристики: розмір та точність маніпулювання. Винесення всіх електронних компонент та двигунів поза сегменти маніпулятора дозволило без зменшення кількості двигунів, тобто без втрати потужності, зменшити розміри конструкції. Підвищення точності було досягнуто за рахунок використання у механізмі крокових двигунів.

Розглянуті технічні рішення дозволять автоматизувати роботу у стерильних боксах, забезпечивши максимальну надійність та захист від потрапляння зовнішніх факторів. Запропонована схема матиме значні переваги завдяки своїй модульності, розмірам, вартості виробництва та можливості автоматизації.

Список літератури:

1. Da Vinci (робот-хірург). <https://biokurs.com.ua/ua/news-biokurs-view/161/>
2. Система вирівнювання поверхні бедра ROBODOC. <https://www.medicaexpo.ru/prod/kaiser-precision-co/product-102760-868119.html>
3. Ibrahim Alkatout, Hamid Salehiniya, Leila Allahqoli. Assessment of the Versius Robotic Surgical System in Minimal Access Surgery: A Systematic Review. <https://www.medicaexpo.ru/prod/kaiser-precision-co/product-102760-868119.html>
4. Project Blue. <https://rl.berkeley.edu/blue/>
5. Karl Khandalavala, Tim Shimon, Laura Flores, Priscila Rodrigues Armijo, Dmitry Oleynikov. Emerging surgical robotic technology: a progression toward microbots. <https://ales.amegroups.com/article/view/5499/html>
6. Хірургічні операції роботом DaVinci. <https://uamt.com.ua/RU/robot-da-vinchi.html>
7. Innomed oncology. <https://davinci.innomed.ua>

Надійшла до редколегії 27.11.2023

Відомості про авторів:

Довнар Олександр Йосипович – канд. техн. наук, доц., Національний аерокосмічний університет ім. М.Є Жуковського «Харківський авіаційний інститут», доц. кафедри радіоелектронних та медичних комп'ютеризованих засобів та технологій; Україна; email: a.dovnar@khai.edu; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7171-0024>

Черкіс Владислав Ігорович – студент, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; Україна; email: v.i.cherkis@student.khai.edu

Зінченко Олександр Миколайович – аспірант, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є Жуковського «Харківський авіаційний інститут», асистент кафедри радіоелектронних та медичних комп'ютеризованих засобів та технологій; Україна; email: a.zinchenko@khai.edu; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5651-8931>

Каданер Олександр Олександрович – асистент кафедри радіоелектронних та медичних комп'ютеризованих засобів та технологій; Національний аерокосмічний університет ім. М.Є Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; Україна; email: o.kadanner@khai.edu