

Ю.О. Подчашинський, д.т.н., проф.
А.В. Рижук, аспірант
Л.О. Чепюк, к.т.н.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Принципи та методи відтворення руху руки людини в комп'ютеризованих системах для роботи з небезпечними речовинами

Сучасні технології здатні замінити людину при роботі в небезпечних умовах та з небезпечними хімічними та біологічними речовинами. Але при побудові таких комп'ютеризованих систем необхідно мати інформацію про поточне положення та рухи руки людини, які відтворює комп'ютеризована система. Існують технології, які можуть розпізнавати положення та рухи людини за зображеннями. Також наявні технології, що дають можливість керувати роботом-маніпулятором. Але за існуючими технологіями потрібно одягати спеціальні костюми, які заважають оператору вільно рухатися, кріпити на тіло велику кількість датчиків, які дорого коштують і які дуже легко пошкодити. Щоб удосконалити отримання інформації про рухи людини та керування на її основі роботом-маніпулятором, потрібно створити програмно-алгоритмічні методи, які дозволять зчитувати з відеозображення рухи людини, трансформувати, розпізнавати їх за спеціальним алгоритмом та відтворювати за допомогою робота-маніпулятора. На основі отриманої інформації формуються сигнали управління, які передаються на виконавчі ланки, щоб робот повторював всі дії людини з такою ж точністю, як вона це робить. Найкращим та найдешевшим варіантом є створення безмаркерної системи зчитування рухів людини за допомогою машинного зору. Виконано аналіз існуючих розробок і взято за основу анатомічну модель руки людини, яку дещо оптимізовано для забезпечення правильної роботи робота-маніпулятора. Такий варіант побудови комп'ютеризованої системи є найкращим, тому що оператору не потрібно довго звикати та пристосовуватися до відмінної від його руки форми органів управління. Також наведено формулу про скорочення м'язів, яка в подальшому буде використана в розробці комп'ютеризованої системи. Для забезпечення практичної реалізації комп'ютеризованої системи досліджено математичну модель рухомих ланок.

Ключові слова: машинний зір; зображення; ступені свободи; математична модель; траєкторія руху.

Актуальність теми. На сьогоднішній день дуже важливо забезпечити людині безпеку її життя та здоров'я. Найкращим способом є запобігання фізичної присутності людини у небезпечних зонах і подалі від небезпечних елементів та речовин. Якщо є потреба здійснювати якісь маніпуляції з цими предметами в небезпечних зонах, то найкраще з цією роботою впорається робот-маніпулятор, який відтворює віртуальні рухи рук оператора, що знаходиться у небезпечному місці. Тому дуже важливо, щоб технології віддаленого управління роботами-маніпуляторами швидко розвивалися для збереження людського здоров'я та життя.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Загальні концепції робототехніки розглянуто у роботах John J. Craig [1], Saeed B. Niku [2], Ahmad Taher Azar [3]. Методи розпізнавання рухів розглянуто у роботах [5–10].

Метою статті є огляд та дослідження існуючих принципів та методів відтворення руху руки людини з метою дистанційного керування роботом-маніпулятором, вивчення математичної моделі руки з фізіологічного та робототехнічного боку, визначення способів вимірювання рухів.

Викладення основного матеріалу. Перш за все, перед тим як займатися розробкою та вдосконаленням системи управління маніпуляторів, потрібно вивчити те, що створено природою. Найкращі та найскладніші механізми створені саме природою. У тілі людини є велика кількість кісток – в тілі дитини їх 300, але у процесі росту ця кількість зменшується до 206. М'язів налічується набагато більше – приблизно 500–600. Щоб зменшити навантаження на розробку маніпулятора та його системи управління, потрібно побудувати математичну модель. Для цього необхідно визначити, скільки ступенів свободи є в тілі людини. Наприклад, у голови є 3 ступені свободи, в руці – 27, в нозі – 12, а загалом в тілі людини налічується 105 ступенів свободи. Оскільки є завдання керувати тільки руками людини, тому роздивимося більш детально управління рукою.

Анатомія руки людини доволі складна та складається з великої кількості м'язів і кісток. В цілому їх можна поділити на 7 частин (рис. 1–2): пальці, які налічують 14 фаланг; п'ясток, який складається з 5 довгих кісток; зап'ясток, що має 8 маленьких об'єднаних в купу кісточок; передпліччя, має 2 кістки; ліктьовий суглоб; плечова кістка; плечовий суглоб.



Рис. 1. Кістки долоні

Важливо вивчити роботу м'язів, які рухають перелічені вище кістки. Немає необхідності розглядати всі, тому виділимо тільки основні, які відіграють важливу роль у русі кінцівки. Інші м'язи відіграють роль стабілізаторів. Вони розташовані по всій руці, окрім пальців. Згиначі і розгиначі фаланг пальців розташовані в передпліччі. Можливо навіть простежити роботу цих м'язів, взявши другою рукою своє передпліччя і порухати пальцями.



Рис. 2. Кістки руки

З точки зору анатомії пронація і супінація – це обертальні рухи кінцівок, керовані групами м'язів спеціального призначення. Супінація – це обертальний рух кінцівки або її частини назовні. Наприклад, якщо відбувається супінація кисті руки, зігнутої в лікті під кутом 90 градусів, то кисть з положення долонею вниз повертається в положення долонею вгору (позначено цифрою 1 на рисунку 3). Пронація – це зворотний супінації обертальний рух, що відбувається всередину [11].

Для пронації передпліччя використовується круглий пронатор. Також є ліктьовий згинач зап'ястя, який в свою чергу, виходячи з назви, згинає кисть та згинає ліктьовий суглоб. Плечопроменевий м'яз супінує передпліччя, яке перебуває в пронованому стані та пронує супіноване передпліччя. Важливу роль в орієнтуванні руки в просторі відіграє дельтоподібний м'яз, який відводить руку до горизонтального положення. Малий круглий і підостний м'яз обертає плечі назовні. На противагу їм існує також два м'язи, а саме великий круглий та підлопатковий м'яз, які в свою чергу обертають плече всередину. Згин передпліччя та плечової кістки виконує двоголовий м'яз плеча. Дзеркальну роботу в розгинанні руки виконує триголовий м'яз плеча. Всі ці м'язи виконують найважливішу функцію в процесі руху кінцівки. Тому за основу в розробці системи керування маніпулятором буде братися до уваги саме анатомічна будова людини.

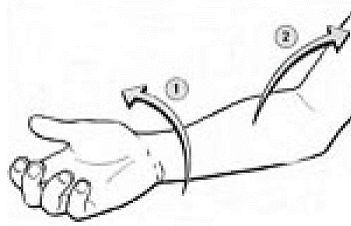


Рис. 3. Супінація руки

Далі потрібно вирішити питання отримання інформації з тіла людини, щоб в подальшому її обробляти та передавати дані параметрів руху на маніпулятор. На сьогоднішній час існує багато видів технологій захоплення руху – motion capture [12–16].

Перший вид – маркерна система motion capture, для якої потрібно спеціальне обладнання. На людину, або живу істоту, рухи якої треба відстежувати, одягається спеціальний костюм з закріпленими датчиками. Далі дані з цих датчиків фіксуються камерами і передаються комп'ютеру, який їх обробляє та створює тривимірну модель. Така модель дуже точно відтворює рухи персонажу. В цілому ця технологія використовується для анімації ігрових персонажів для більш їх реалістичності на екрані. Але найбільш поширена вона в зйомці фільмів, тому що дуже спрощує роботу фахівцям зі спецефектів та анімації. Набагато простіше зняти попередньо підготовлені рухи людини, яка по сюжету перестрибує ущелину, ніж дійсно заставляти її це робити в реальності і піддаючи неймовірному ризику. В свою чергу ця система має декілька різновидів:

1. *Оптично пасивні.* Датчики-маркери, які кріпляться до спеціального костюма та віддзеркалюють тільки наведене на них світло і не світять самі. В таких системах використовується інфрачервоне світло, яке випромінюється з високочастотних стробоскопів, встановлених на камерах. Відбившись від маркерів, воно потрапляє в об'єктив камери і таким чином відображає позицію та відстань до маркера. До недоліків такої системи можна належать:

- досить довгий час встановлення датчиків на людину;
- при швидкому русі дані можуть накладатися один на одного, в результаті чого ключові ланки можуть переплутатись, оскільки технологія не передбачає окрему ідентифікацію кожного датчика;

2. *Оптично активні.* Датчики-маркери, які кріпляться до костюма, містять інтегровані процесори, які виконують радіосинхронізацію. Така синхронізація дає змогу ідентифікувати кожен датчик і в випадку накладання їх в полі зору при зйомці, розпізнавати та не плутати. В іншому ця технологія подібна до оптично пасивної. Недоліки системи:

- висока вартість датчиків-маркерів та їх крихкість;
- на людину кріпиться додатковий контролер, який керує маркерами та сковує рухи;

3. *Магнітні системи.* Датчики-маркери є магнітами, а ресивери – камерами. Система зчитує позицію треків завдяки зміні магнітного потоку. Недоліки системи:

- дуже сильні перешкоди створюють металеві предмети, висока чутливість до оточення (проблемою може стати електропроводка приміщення, арматура в стінах будівлі);
- змінна чутливість маркерів у різних робочих зонах;
- висока вартість магнітних маркерів та апаратури;
- сильно сковує рухи додатковий контролер, що кріпиться до людини, та дрiт, який тягнеться від людини до комп'ютера;

4. *Гіроскопічні системи.* Як датчики-маркери використовуються мініатюрні гіроскопи та інерційні системи. Інформація з треків передається у комп'ютер, де записується та оброблюється. Перевагами таких сенсорів є можливість визначення не тільки положення, але й кут нахилу. Недоліки системи:

- висока вартість гіроскопів та інерційних систем;
- додатковий контролер, прикріплений до людини, а також дрiт до комп'ютера;
- для визначення положення людини в просторі потрібна додаткова оптична або магнітна система;

5. *Механічна система.* На людину одягається спеціальний екзоскелет який складається з тензодатчиків, які в свою чергу передають інформацію про згин суглобів. Недоліки такої системи:

- додатковий контролер, сам екзоскелет, та дроти, що тягнуться до комп'ютера;
- відсутність можливості знімати двох людей одночасно, рухів на підлозі (наприклад, перекидання або падіння);
- ризик виходу з ладу будь-якої механічної ланки.

Другий вид – безмаркерна система motion capture, для якої не потрібно спеціальних датчиків та спеціального костюма, що дуже прискорює підготовку до процесу фіксації рухів. Технологія застосована на технологіях комп'ютерного зору і розпізнаванні образів. Такий спосіб є достатньо новим та не є досить точним. Для його реалізації не потрібно спеціального устаткування, пристроїв та освітлення. Зйомка може проводитися за допомогою камери та комп'ютера, який виконує подальшу обробку.

Найкращим та найдешевшим варіантом буде створення безмаркерної системи зчитування рухів людини за допомогою машинного зору. Перш ніж перейти до розробки програмного коду, потрібно побудувати математичну модель руки людини.

У роботах А.Хілла [17] наведено інформацію щодо м'язового скорочення. Він перший увів формулу м'язового скорочення в 1938 р. Вона виражає швидкість зміни скорочення м'яза залежно від її навантаження.

$$(P + a)(v + b) = b(P_0 + a), \quad (1)$$

де v – швидкість скорочення м'язу при навантаженні P , P_0 – максимальне значення ізометричної сили при тетанічному подразненні всього м'язу, a та b – константи. a – емпірична величина, яка дорівнює $4 \cdot 10^5 \text{ дін/см}^2$ поперечного перерізу, а b має розмірність швидкості (см/с або l_0/c , де l_0 – довжина м'язу) і для різних м'язів відмінна.

Щоб описати траєкторію руху руки її положення в просторі, потрібно розробити механічну модель. Механічна модель з трьома ступенями свободи наведена на рисунку 4.

Будемо використовувати систему диференціальних рівнянь Лагранжа другого порядку:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_i} = Q_i, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

де N – кількість ступенів свободи, θ_i – узагальнені координати, $\dot{\theta}_i$ – узагальнені швидкості, T – повна кінетична енергія системи, Q_i – узагальнені сили, що діють в системі.

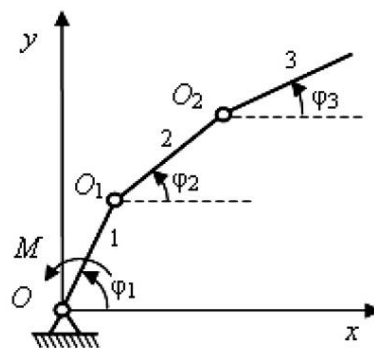


Рис. 4. Механічна модель з трьома степенями свободи

Якщо не брати до уваги об'єм, прямолінійний розрахунок повної кінетичної енергії і її часткових похідних має вигляд:

$$B \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1(t) \\ \ddot{\theta}_2(t) \\ \ddot{\theta}_3(t) \end{pmatrix} + D \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1(t) \\ \dot{\theta}_2(t) \\ \dot{\theta}_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_1(A_1, t) \\ Q_2(A_2, t) \\ Q_3(A_3, t) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де A_1, A_2, A_3 – функції управління, які потрібно знайти,

$$B = \begin{pmatrix} \frac{7}{3} l^2 m & \frac{3}{2} l^2 m \cos(\theta_1 - \theta_2) & \frac{1}{2} l^2 m \cos(\theta_1 - \theta_3) \\ \frac{3}{2} l^2 m \cos(\theta_1 - \theta_2) & \frac{4}{3} l^2 m & \frac{1}{2} l^2 m \cos(\theta_2 - \theta_3) \\ \frac{1}{2} l^2 m \cos(\theta_1 - \theta_3) & \frac{1}{2} l^2 m \cos(\theta_2 - \theta_3) & \frac{1}{3} l^2 m \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 & \frac{3}{2} l^2 m \sin(\theta_1 - \theta_2) & \frac{1}{2} l^2 m \sin(\theta_1 - \theta_3) \\ -\frac{3}{2} l^2 m \sin(\theta_1 - \theta_2) & 0 & \frac{1}{2} l^2 m \sin(\theta_1 - \theta_3) \\ -\frac{1}{2} l^2 m \sin(\theta_1 - \theta_2) & -\frac{1}{2} l^2 m \sin(\theta_1 - \theta_3) & 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

Аналіз значень у вузлах матриці B і D , дозволив розповсюдити на систему с N степенями свободи:

$$\sum_{j=i}^N B_{ij} \ddot{\theta}_i + \sum_{j=i}^N B_{ij} \dot{\theta}_i^2 = Q_i, \quad i = \overline{1, N}.$$

Таким чином, якщо підставляти значення в формулу (3) закони руху для θ_i , можна отримати значення сил, що діють в системі, тобто розв'язати пряму задачу динаміки. В подальшому ці вирази та формули можна використовувати як основу для моделювання руху ланок та передачі інформації про рух.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Виконано аналіз анатомічної будови руки, положення та функції кісток, суглобів, роботу м'язів та їх розміщення для зрозуміння принципів руху кінцівки і для подальшої розробки комп'ютеризованої системи для роботи з небезпечними хімічними та біологічними речовинами. Вивчені основні види систем захоплення та вимірювання руху – motion capture, які існують на сьогоднішній день. Обрано безмаркерну систему, яка зчитує інформацію про рух за допомогою машинного зору. Виконано аналіз загальної математичної моделі з трьома ступенями свободи, яка притаманна пальцям, що згинаються, та руці в цілому. В подальшому отриману інформацію можна використати як основу для розробки робота-маніпулятора, який за допомогою програмно-алгоритмічного забезпечення може керуватися дистанційно, не піддаючи людину прямій небезпеці. Для розробки комп'ютеризованої системи в частині вимірювання параметрів руху руки людини не потрібно спеціальне обладнання, потрібні тільки відеокамери та обчислювальний пристрій, що здійснює аналіз та програмно-алгоритмічну обробку вимірювальної відеоінформації.

Список використаної літератури:

1. *John J. Craig* Introduction To Robotics: Mechanics and Control. – 4th Edition, Global Edition / *John J. Craig* // Pearson Education International. – 2022. – p. 448.
2. *Saeed B. Niku* Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications. – 3rd Edition / *B.Saeed*. – Publishing house: Wiley, 2020. – 530 p.
3. *Ahmad Taher Azar* Control Systems Design of Bio-Robotics and Bio-Mechatronics with Advanced Applications / *Ahmad Taher Azar*. – Publishing house: Academic Press, 2020. – 502 p.
4. *Soldatov D.* Методи розпізнавання рухів, дій людей на відео послідовностях / *D.Soldatov* // Електронна та Акустична Інженерія. – 2019. – № 2 (3). – С. 27–33 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://feltran.kpi.ua/article/view/164709>. DOI: 10.20535/2617-0965.2019.2.3.164709.
5. *Petlitsky V.* Розробка алгоритму розпізнавання рухів об'єктів за допомогою нейронної мережі для системи відеонагляду / *V.Petlitsky, S.Shevchenko, N.Mazur* // Кібербезпека: освіта, наука, техніка : електронне фахове наукове видання. – 2019. – № 2 (6). – Р. 105–111 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://csecurity.kubg.edu.ua/index.php/journal/article/view/117>. DOI: 10.28925/2663-4023.2019.6.105111.
6. *Elisha Odemakinde* Human Pose Estimation with Deep Learning – Ultimate Overview in 2022 / *Elisha Odemakinde*. – 2022 [Electronic resource] – Access mode : <https://viso.ai/deep-learning/pose-estimationultimate-overview/>.
7. Computer vision in sport. – 2020 [Electronic resource] – Access mode : <http://surl.li/ibcqs>.
8. Computer vision use cases in sports industry [Electronic resource] – Access mode : <http://surl.li/ibcrb>.
9. Historical & Real-Time Player Tracking [Electronic resource] – Access mode : <http://sportspower.ai/tech-rd/>.
10. Real-time optical tracking [Electronic resource] – Access mode : <http://surl.li/ibcro>.
11. М'язи верхньої кінцівки людини [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://surl.li/hhowv>.
12. *Дзелендзяк У.* Система автоматизованого розпізнавання рухів / *У.Дзелендзяк, В.Самотий*. – 2014 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/3643/dzelendziakusamotyiv.pdf>.
13. Capturing Body Motion in 3D [Electronic resource] – Access mode : <http://surl.li/ibcsh>.
14. Захоплення руху. – 2021 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.wiki-ua.nina.az/Motion_capture.html.
15. В армрестлінгу сильна пронація і супінація це запорука перемоги // ALEXUS [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://alexus.com.ua/v-armrestlingu-silna-pronaciya-i-supinaciya-ce-zaporuka-peremogi/>.
16. Hand landmarks detection guide [Electronic resource] – Access mode : https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/hand_landmarker.
17. Skeletal Muscle Mechanics from Hill-Based Muscle Model to Computer Applications: State of the Art Review / *Hamid Asadi Dereshgi, Kasim Serbest, Sema Nur Sahin, Busra Balik* // Journal of Smart Systems Research (JOINSSR). – 2021. – № 2 (1). – Р. 27–39 [Electronic resource] – Access mode : <http://surl.li/ibcrx>.

References:

1. John, J. (2022), «Craig Introduction To Robotics: Mechanics and Control, 4th Edition», *Pearson Education International*, pp. 448.
2. Saeed, B. (2020), *Niku Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications*, 3rd Edition, Publishing house: Wiley, 530 p.
3. Ahmad, Taher Azar (2020), *Control Systems Design of Bio-Robotics and Bio-Mechatronics with Advanced Applications*, Publishing house: Academic Press, 502 p.
4. Soldatov, D. (2019), «Metody rozpoznavannia rukhiv, dii liudei na video poslidovnostiakh», *Elektronna ta Akustychna Inzheneriia*, No. 2 (3), pp. 27–33, [Online], available at: <http://feltran.kpi.ua/article/view/164709>, doi: 10.20535/2617-0965.2019.2.3.164709.
5. Petlitsky, V., Shevchenko, S. and Mazur, N. (2019), «Rozrobka alhorytmu rozpoznavannia rukhiv obiektiv za dopomohoiu neironnoi merezhi dlia systemy videonahliadu», *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, elektronne fakhove naukove vydannia, No. 2 (6), pp. 105–111, [Online], available at: <https://csecurity.kubg.edu.ua/index.php/journal/article/view/117>, doi: 10.28925/2663-4023.2019.6.105111.

6. Odemakinde, Elisha (2022), «Human Pose Estimation with Deep Learning – Ultimate Overview in 2022», [Online], available at: <https://viso.ai/deep-learning/pose-estimationultimate-overview/>
7. *Computer vision in sport* (2020), [Online], available at: <http://surl.li/ibcqs>
8. *Computer vision use cases in sports industry*, [Online], available at: <http://surl.li/ibcrb>.
9. *Historical & Real-Time Player Tracking*, [Online], available at: <http://sportspower.ai/tech-rd/>
10. *Real-time optical tracking*, [Online], available at: <http://surl.li/ibcro>
11. *Miazy verkhnoi kintsivky liudyny*, [Online], available at: <http://surl.li/hhowv>
12. Dzelendziak, U. and Samoty, V. (2014), *Systema avtomatyzovanoho rozpiznavannia rukhiv*, [Online], available at: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/3643/dzelendziakusamotyiv.pdf>
13. *Capturing Body Motion in 3D*, [Online], available at: <http://surl.li/ibcsh>
14. *Zakhoplennia rukhu* (2021), [Online], available at: https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Motion_capture.html
15. «V armrestlinhu sylna pronatsiia i supinatsiia tse zaporuka peremohy», *ALEXUS*, [Online], available at: <https://alexus.com.ua/v-armrestlingu-silna-pronaciya-i-supinaciya-ce-zaporuka-peremogi/>
16. *Hand landmarks detection guide*, [Online], available at: https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/hand_landmarker
17. Asadi Dereshgi, Hamid, Serbest, Kasim, Nur Sahin, Sema and Balik, Busra (2021), «Skeletal Muscle Mechanics from Hill-Based Muscle Model to Computer Applications: State of the Art Review», *Journal of Smart Systems Research (JOINSSR)*, No. 2 (1), pp. 27–39 [Online], available at: <http://surl.li/ibcrx>

Подчашинський Юрій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка». <http://orcid.org/0000-0002-8344-6061>.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- метрологія, засоби вимірювання;
- інформаційні системи та технології.

Рижук Андрій Вікторович – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- методи та алгоритми цифрової обробки сигналів і відеозображень;
- інформаційні системи та технології;
- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи.

Чепюк Ларіна Олексіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-8072-8186>.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- метрологія, засоби вимірювання;
- інформаційні системи та технології.

Podchashinskiy Yu.O., Ryzhuk A.V., Chepiuk L.O.

Principles and methods of reproducing the movement of a human hand in computerized systems for working with hazardous substances

Modern technologies can replace a person when working in hazardous conditions and with dangerous chemical and biological substances. But when building such computerized systems, it is necessary to have information about the current position and movements of the human hand, reproduced by the computerized system. There are technologies that can recognize the position and movements of a person from images. There are also technologies that allow you to control the robotic arm. But according to existing technologies, it is necessary to wear special suits that prevent the operator from moving freely, to attach a large number of expensive sensors to the body, which are very easy to damage. To improve the acquisition of information about human movements and the control of a robot-manipulator based on it, it is necessary to create software-algorithmic methods that allow reading human movements from a video image, transforming them, recognizing them using a special algorithm and playing them using a robot-manipulator. Based on the information received, control signals are generated that are transmitted to the executive links so that the robot repeats all the actions of a person with the same accuracy as he does. The best and cheapest option is to create a marker-free system for reading human movements using machine vision. An analysis of existing developments was made and an anatomical model of a human hand was taken as a basis, slightly optimized to ensure the correct operation of the robotic arm. This option for building a computerized system is the best, because the operator does not need to get used to and adapt to the shape of the controls, which differs from his hands. A formula for muscle contraction is also given, which will later be used in the development of a computerized system. To ensure the practical implementation of a computerized system, a mathematical model of moving links was studied.

Keywords: machine vision; image; degrees of freedom; mathematical model; motion trajectory.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2023.