

Получена: 04 июля 2021 / Принята: 29 октября 2021 / Опубликовано online: 30 декабря 2021

DOI 10.34689/SH.2021.23.6.018

УДК 616-001:001.76(048.8)

## РОБОТИЗИРОВАННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕПОЗИЦИИ ПЕРЕЛОМОВ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.

**Сабина К. Аубакирова**<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-1730-4230>

**Марат А. Жанаспаев**<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-0610-0112>

<sup>1</sup> НАО «Медицинский университет Семей», Кафедра ортопедической хирургии, г. Семей, Республика Казахстан.

### Резюме

**Актуальность:** Благодаря развитию робототехники в медицине, преимуществам точной работы и эффективного снижения облучения персонала, роботы стали одним из лучших вариантов для устранения недостатков традиционной ортохирургии для репозиции переломов костей. В этой статье основное внимание уделяется применению роботов в хирургии для репозиции переломов, конструкции механизма, навигационной технологии, роботизированному управлению, технологии взаимодействия робота и восстановления кости при переломах. В обзоре литературы обсуждаются проблемы современной робототехники для репозиции переломов костей и его будущее развитие.

**Целью работы** является представление обзора литературных данных о развитии робототехники в медицине и применении роботизированных устройств при переломах для восстановления целостности костей.

**Стратегия поиска:** включала поиск публикации по теме исследования, литературных источников индексируемых в базах данных электронной библиотеки e-Library, Google Академия, Pubmed, Web of Science, Scopus. Для составления обзора изучались все доступные публикации по данной теме. Глубина поиска не была ограничена, оригинальный язык – английский и русский.

**Результаты:** Роботизированное устройство для репозиции переломов - это робот, сочетающий в себе командную работу врачей, инженеров, программистов, который постоянно модернизируется и в настоящее время добился большого прогресса. Но в настоящее время не имеется данных о результатах клинических исследований при применении роботов для репозиции костей при переломе.

**Ключевые слова:** *medical robot; surgical robot; orthopedic surgery; fracture reduction; computer-aided surgery; computer-assisted surgery; гексаподы; робот.*

### Abstract

## ROBOTIC DEVICES FOR REPOSITION OF FRACTURES. REVIEW.

**Sabina Aubakirova**<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-1730-4230>

**Marat Zhanaspayev**<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-0610-0112>

<sup>1</sup> NJSC "Semey Medical University", Department of Orthopedic Surgery, Semey, Republic of Kazakhstan;

**Relevance:** Due to the development of robotics in medicine, the advantages of precise work and effective exposure to radiation of personnel, robots have become one of the best options for eliminating the disadvantages of traditional orthosurgery for repositioning bone fractures. This article focuses on the use of robots in surgery for fracture repositioning, construction, navigation technology, robotic control, robot-bone interaction technology in fractures. The literature review discusses the problems of modern robotics for bone fracture repositioning and its future development.

**The aim** of the work is to provide an overview of the literature on the development of robotics in medicine and the use of robotic devices in fractures to restore the integrity of bones.

**Search strategy:** included the search for publications on the topic of research, literary sources indexed in the databases of the electronic library e-Library, Google Academy, Pubmed, Web of Science, Scopus. To compile the review, all available publications on this topic were studied. The search depth was not limited, the original languages were English and Russian.

**Results:** The robotic fracture reduction device is a robot that combines the teamwork of doctors, engineers, programmers, which is constantly being modernized and has now made great progress. But at present, there are no data on the results of clinical studies using robots for bone reposition in case of fracture.

**Keywords:** *medical robot; surgical robot; orthopedic surgery; fracture reduction; computer-aided surgery; computer-assisted surgery, hexapod.*

Түйіндеме

**СЫНАҚТАРДЫ РЕПОЗИЦИЯЛАУ ҮШІН АРНАЛҒАН РОБОТТЫҚ ҚҰРЫЛҒЫ. ӘДЕБИ ШОЛУ.****Сабина К. Аубакирова<sup>1</sup>**, <https://orcid.org/0000-0003-1730-4230>**Марат А. Жанаспаев<sup>1</sup>**, <https://orcid.org/0000-0002-0610-0112><sup>1</sup> «Семей медицина университеті» КЕАҚ, Ортопедиялық хирургия кафедрасы, Семей қ., Қазақстан Республикасы;

**Өзектілігі:** Медицинадағы робототехниканың дамуы, нақты жұмыстың артықшылықтары және персоналдың сәуленуін тиімді төмендеуі арқылы Роботтар сүйек сынықтарын репозициялау үшін дәстүрлі ортохирургияның кемшіліктерін жоюдың ең жақсы нұсқаларының біріне айналды. Бұл мақаланың негізгі назары роботтарды хирургияда сынықтарды репозициялау үшін қолданылуына, механизм құрылысына, навигациялық технологияға, роботтық басқаруға, роботтың өзара әрекеттесу технологиясы мен сынған сүйектердің қалпына келуіне аударылады. Әдебиетке шолуда сүйек сынықтарын репозициялауға арналған заманауи робототехниканың мәселелері және оның болашақ дамуы талқылануда.

**Жұмыстың мақсаты** - медицинадағы робототехниканың дамуы және сынықтар кезіндегі сүйектердің тұтастығын қалпына келтіру үшін роботты құрылғыларды қолдану бойынша әдеби деректерге шолу жасау.

**Іздеу стратегиясы:** зерттеу тақырыбы бойынша жарияланымды, e-Library, Google Академия, Pubmed, Web of Science, Scopus электрондық кітапханасының деректер базасында индекстелетін әдеби көздерді іздеуді қамтыды. Шолуды құрастыру үшін осы тақырып бойынша барлық қолжетімді жарияланымдар зерттелді. Іздеу тереңдігі шектелмеген, түпнұсқа тілі-ағылшын және орыс.

**Нәтижелері:** Сынықтарды репозициялауға арналған роботты құрылғы - бұл үнемі жаңарып отыратын және қазіргі уақытта үлкен жетістіктерге жеткен дәрігерлердің, инженерлердің, бағдарламашылардың командалық жұмысын біріктіретін робот.

Бірақ қазіргі уақытта сынық кезінде сүйектерді репозициялау үшін роботтарды қолдану бойынша клиникалық зерттеулердің нәтижелері туралы мәліметтер жоқ.

**Түйінді сөздер:** *medical robot; surgical robot; orthopedic surgery; fracture reduction; computer-aided surgery; computer-assisted surgery; гексаподтар; робот.*

**Библиографическая ссылка:**

Аубакирова С.К., Жанаспаев М.А. Роботизированные устройства для репозиции переломов. Обзор литературы // Наука и Здравоохранение. 2021. 6(Т.23). С. 164-177. doi 10.34689/SH.2021.23.6.018

Aubakirova S., Zhanaspayev M. Robotic devices for reposition of fractures. Review // Nauka i Zdravookhranenie [Science & Healthcare]. 2021, (Vol.23) 6, pp. 164-177. doi 10.34689/SH.2021.23.6.018

Аубакирова С.К., Жанаспаев М.А. Сынақтарды репозициялау үшін арналған роботтық құрылғы. Әдеби шолу // Ғылым және Денсаулық сақтау. 2021. 6 (Т.23). Б. 164-177. doi 10.34689/SH.2021.23.6.018

**Введение.**

Наблюдается тенденция возрастания различных типов переломов, таких как случайные переломы, связанные с падением с высоты своего роста, переломы, полученные при дорожно-транспортных происшествиях, переломы при падении с высоты, переломы у пожилых людей и т.д. [45] Ежегодная частота случайных не смертельных падений составляет 2831 на 100000, [57] а эпидемиологические исследования показывают, что во всем мире частота переломов составляет 8,5–36,0 / 1000 в год. [5]

При наличии перелома репозиция и восстановление целостности кости достигается за счет закрытой репозиции кости в сочетании с фиксацией, [9] в то время как лечение сложных переломов или безуспешных попыток закрытой репозиции достигается за счет оперативного вмешательства, заключающегося в открытой репозиции в сочетании с внутренней / внешней фиксацией. Однако, эти традиционные методы

лечения имеют ряд недостатков таких как: невысокая точность репозиции, так как она во многом зависит от опыта врача; закрытый метод репозиции требует от хирургов прилагать большую физическую силу; каркас наружной чрескостной фиксации неудобен для пациента в период послеоперационного восстановления; затрачивается значительное количество времени во время операции; открытая репозиция и внутренняя фиксация приводят к повреждению мягких тканей и нарушают кровоснабжение места перелома, что впоследствии приводит к замедленной консолидации или несращению перелома [37]

Чтобы избежать вышеупомянутые недостатки, при оперативном лечении переломов применяются минимально инвазивные методы, которые, как было доказано, имеют высокий уровень сращения и низкий уровень инфицирования. [68] Однако, частое рентгеновское облучение, как хирургов, так и пациентов

во время операции является одним из самых больших недостатков в медицине, в частности ортохирургии. [8, 18]

Роботы широко известны как потенциальное решение для преодоления недостатков традиционных методов лечения в хирургии и быстро стали предметом интереса и исследований с использованием робототехники в медицине. [13, 39, 16, 22, 30] Как отмечают многие авторы, роботизированная хирургия для лечения переломов осуществима и необходима, [21, 4] так как робот играет важную роль в интраоперационных манипуляциях, способствует высокой точности, обладает большей силой и крутящим моментом, сокращает время рабочего процесса и снижает облучение медперсонала.

В обзоре *Karthik K. и соавт.* (2015) [31] представлены данные о применении роботов в различных областях ортохирургии. Так же авторы признают эффективность, безопасность и превосходство применения всех типов роботов в ортохирургии. Применение роботов в ортопедии имеет широкое распространение и разделено на роботов, производящих репозицию переломов, применяемых при оперативных вмешательствах на позвоночник и в ортохирургии так называемые компьютер ассистируемые системы при тотальном эндопротезировании тазобедренного и коленного суставов. [6, 69, 17, 29, 36, 43, 46, 15, 66] Тем не менее, существует мало исследований, посвященных роботам для репозиции переломов. В статье будет изучен весь доступный материал по данной теме, чтобы улучшить восприятие робототехники как развивающейся тенденции.

**Стратегия поиска** включала поиск публикации по теме исследования, литературных источников индексируемых в базах данных электронной библиотеки e-Library, Google Академия, Pubmed, Web of Science, Scopus. Для составления обзора изучались все доступные публикации по данной теме. Глубина поиска не была ограничена, оригинальный язык – английский и русский.

Чтобы получить достаточный обзор литературы, был произведен поиск по ключевым словам: “bone robot,” “Fracture Reduction Robot,” “orthopedic surgery robot,” “computer assisted orthopedic surgery в Google Scholar и Кохрейновской библиотеке.

#### Устройство роботов для репозиции переломов.

Переломы нижних конечностей составляют более 30% от общего числа переломов костей человека. [32,2] Во время оперативного вмешательства для репозиции и фиксации переломов, особенно при переломе бедренной кости и внутрисуставных переломах, требуются большие усилия. Таким образом, роботизированные устройства преимущественно необходимы при оперативных вмешательствах при переломах нижних конечностей.

Современные роботы можно разделить на робота для репозиции перелома и неподвижных (фиксированных) роботов. [24, 42, 38, 15, 36] Фиксированный робот в основном выполняет дистальную блокировку при остеосинтезе штифтом, который аналогичен роботу для протезирования (замены) суставов и транспедикулярной фиксации

позвоночника (для имплантации винтов в ножки спинных позвонков). Однако репозиция костей является первостепенной процедурой перед остеосинтезом переломов. Как известно, точная анатомическая репозиция является решающим шагом в оперативном лечении переломов. Неспособность или невозможность произвести точную репозицию перелома приводит к ряду осложнения, таких как отсроченное и неправильное сращение или несращение (ложный сустав) переломов. [18, 35] В настоящее время в основном используются четыре вида роботов для репозиции: на основе аппарата наружной фиксации (рамной конструкции); на основе серийной конструкции промышленного робота; на основе параллельной платформы робота; последовательно-параллельная гибридная структура робота.

#### Робот на основе аппарата наружной фиксации.

Аппараты наружной фиксации управляемые компьютерной навигационной программой называются **гексаподами**. Работа гексапода связана с возможностью выполнять точную репозицию костных отломков в трех плоскостях и шести степенях свободы, [50] которые производятся на основе расчетов прилагаемой компьютерной программой. В современной ортохирургии данные роботизированные устройства используются при репозиции переломов и устранении деформации длинных трубчатых костей. [1] Кроме того используется и односторонний аппарат наружной фиксации Dynafix. [35] (Рисунок 1)

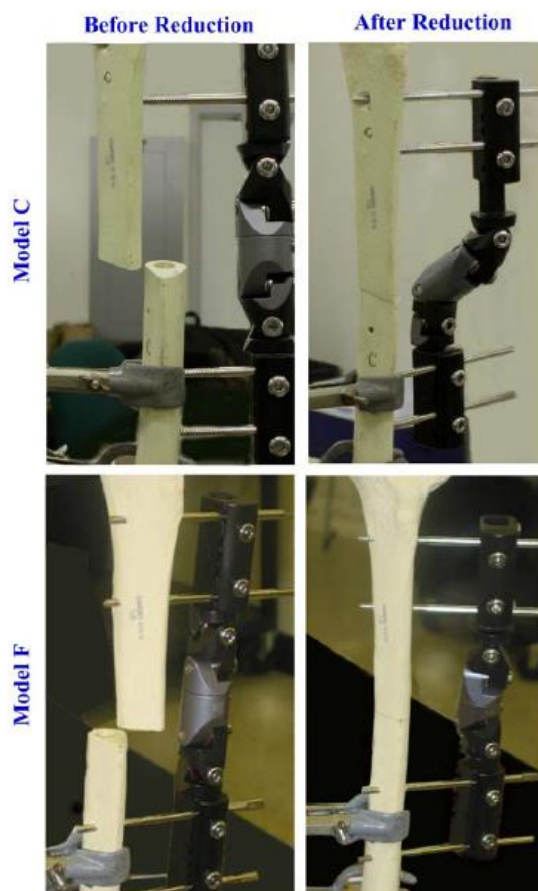


Рисунок 1. Репозиция перелома до и после применения.

Слева: до репозиции. Справа: после репозиции.  
(Figure 1. Fracture reduction before and after application.  
Left: before reduction. Right: after reduction).

Для того, чтобы робот имел возможность автоматической настройки Seide K. et al. добавили электромотор к фиксатору с ручным управлением, чтобы реализовать функции всех шести пространственных степеней свободы движений управляемых компьютерной программой. [49]

С развитием 3D технологии Tang P. et al. (Рисунок 2) применили технологию трехмерной реконструкции

изображений с помощью компьютерной томографии для улучшения результатов проделанной работы. [53]

Для модернизации робота исследователи разработали внешний фиксатор с индивидуальными приспособлениями, изготовленными с помощью 3D печати для репозиции перелома. [47] (Рисунок 3).

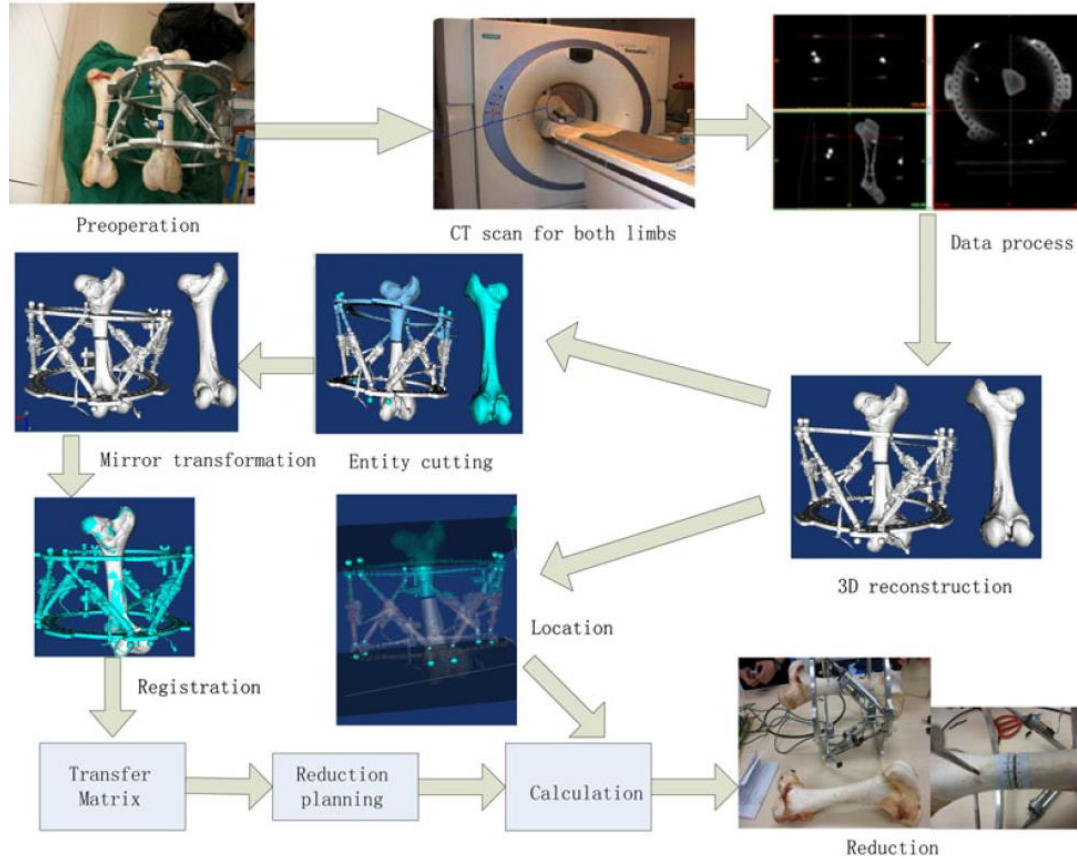


Рисунок 2. Схема примерно показывающая этапы репозиции перелома с помощью гексапода.  
Figure 2. Schematic showing the stages of fracture reduction using a hexapod.

2-сурет. Гексаподтың көмегімен сынықтың репозиция кезеңдерін шамалап көрсететін сызба.

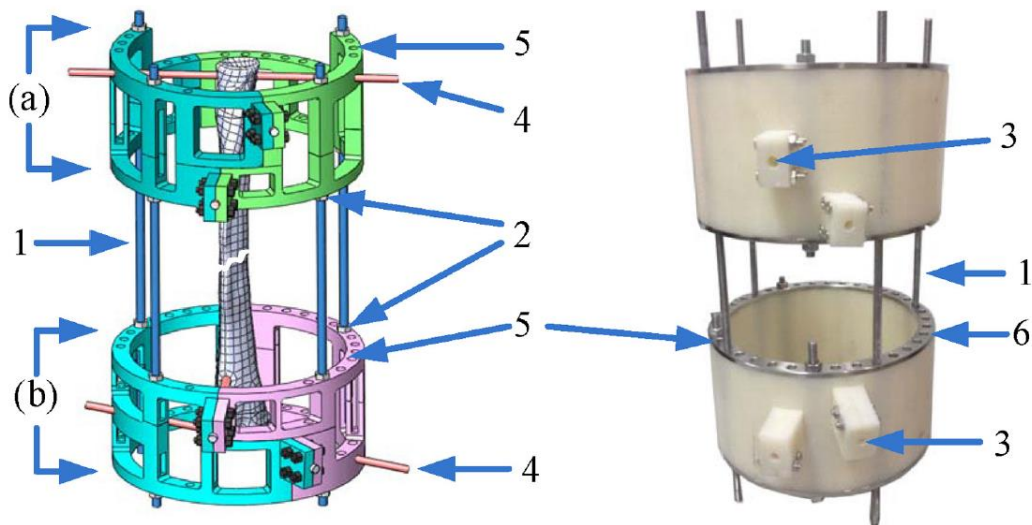


Рисунок 3. Конструкция Q-Fixator (а) проксимальный каркас; (б) дистальный каркас. Рама сделана из светочувствительной смолы и изготовлена методом 3D-печати. (1) Стержни с резьбой; (2) гайки; (3) монтажные отверстия; (4) стержень Штеймана; (5) соединительные отверстия; (6) металлические кольца, которые улучшают жесткость фиксатора.

(Figure 3. Q-Fixator design (a) proximal framework; (b) distal framework. Frame made of photosensitive resin and 3D printed. (1) Threaded rods; (2) nuts; (3) mounting holes; (4) needles; (5) connection holes; (6) metal rings that improve the rigidity of the retainer).



Разные виды гексаподов на основе аппаратов внешней фиксации с рамной конструкцией являются наиболее простыми и имеют самую низкую стоимость производства. Гексаподы использовались только для репозиции переломов диафиза длинных трубчатых костей.

#### Робот на основе серийного коммерческого промышленного робота.

В Германии в 2004 году исследователи из Регенсбургского клинического университета при

помощи инженеров создали робота для репозиции переломов, основанного на промышленном роботе Stäubli RX 130, RepoRobo. [19] (Рисунок 4). В нем использовался пневматический двухпальчатый захват и шесть датчиков, контролирующих усилие захвата и крутящий момент, во избежание проскальзывания и деформации костей. Управление роботом осуществлялось с помощью панели управления или трехмерной мыши. Оценка точности репозиции осуществлялась только визуально.

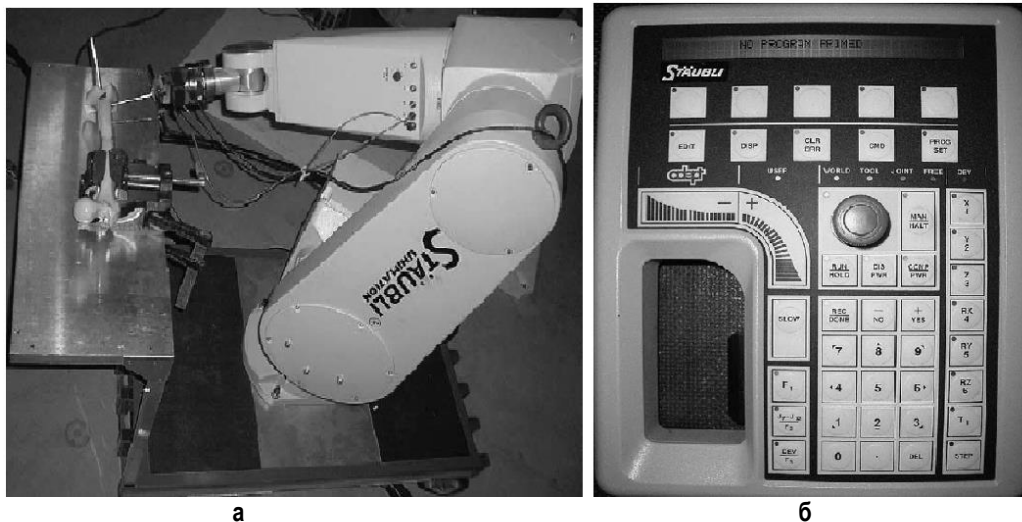


Рисунок 4. (а) RepoRobo во время проведения маневра репозиции кости. (б) Пульт управления роботом.  
(Figure 4. (a) RepoRobo during a bone repositioning maneuver. (b) Robot control panel).

В 2006 г. также в Германии преобразовали промышленного робота Stäubli Tec-Systems RX 90 в механического ручного робота для репозиции переломов, взаимодействовавшего с компьютером и управляемого с помощью стандартного компьютерного игрового джойстика, который использовал 2D-изображения для навигации. [60] (Рисунок 5).

К 2009 году они доработали модель и интегрировали с С-образной дугой, улучшив систему визуализации и навигации для остеосинтеза и дистальной блокировки штифта. [61] (Рисунок 6).

Этот вид робота обладает гибкостью и имеет большое рабочее пространство, но их грузоподъемность и точность невысоки.

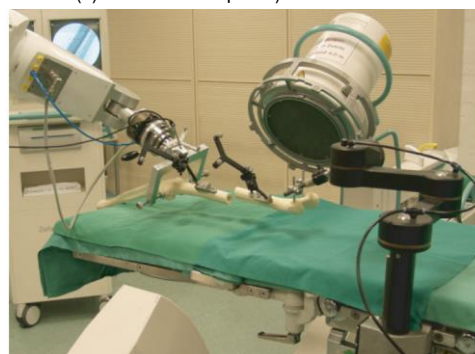


Рисунок 5. Робот RX 90 во время проведения манипуляции.  
(Figure 5. Robot RX 90 during manipulation).

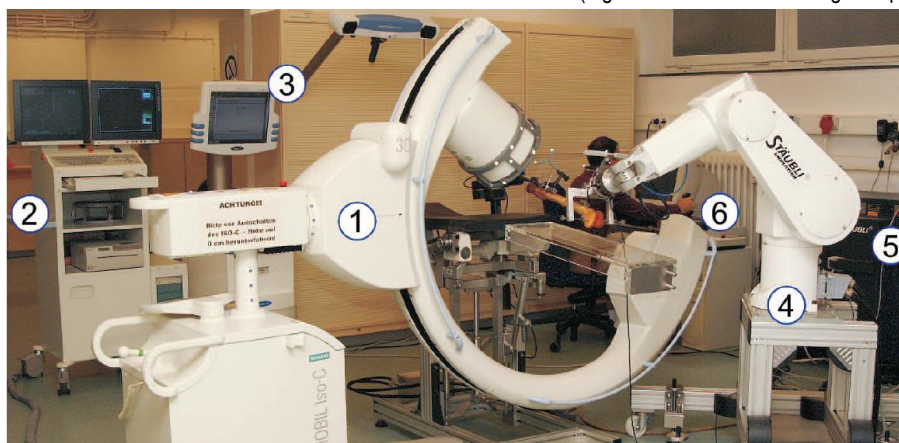


Рисунок 6. Вид на установку 3D-телеманипулятора. 1: Устройство для рентгеноסקопии. 2: Рабочая станция рентгеноסקопии. 3: Хирургическая навигационная система. 4: Робот RX 90. 5: Блок управления роботом. 6: Управляющий компьютер (ПК).  
Figure 6. View of the 3D telemanipulator installation. 1: Fluoroscopy device. 2: Fluoroscopy workstation. 3: Surgical navigation system. 4: RX 90 robot. 5: Robot control unit. 6: Control computer (PC).

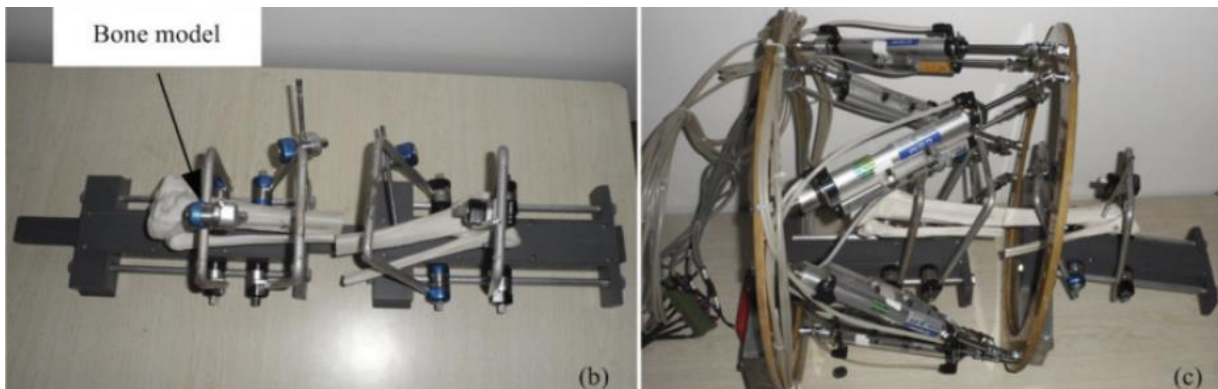
**Робот на основе параллельной структуры.**

В отличие от различных архитектур последовательных роботов, большинство роботов с параллельной репозицией были спроектированы на основе кольцевого фиксатора типа Илизарова или платформы Гофа-Стюарта. Роботы с параллельной репозицией могут в основном использоваться в качестве фиксатора внешнего кольца, тягового устройства и роботизированного манипулятора. Когда травмированная нога помещается внутрь колец, параллельный робот функционально подобен интеллектуальному кольцевому внешнему фиксатору, который является самым ранним прототипом робота для лечения переломов. При размещении за пределами травмированной ноги параллельный робот может манипулировать и восстанавливать сломанную кость,

используя свою движущуюся платформу через гибкое соединение, такое как тяговое устройство или жесткое соединение.

В связи с необходимостью применения больших усилий во время оперативных вмешательств при переломах костей нижних конечностей от 201 до 411 Н крутящего момента в 2006 г. *Graham A.E. et al.* впервые предложили параллельную платформу с шестью степенями свободы для лечения переломов, разработав полную концепцию операционной системы. [40, 23]

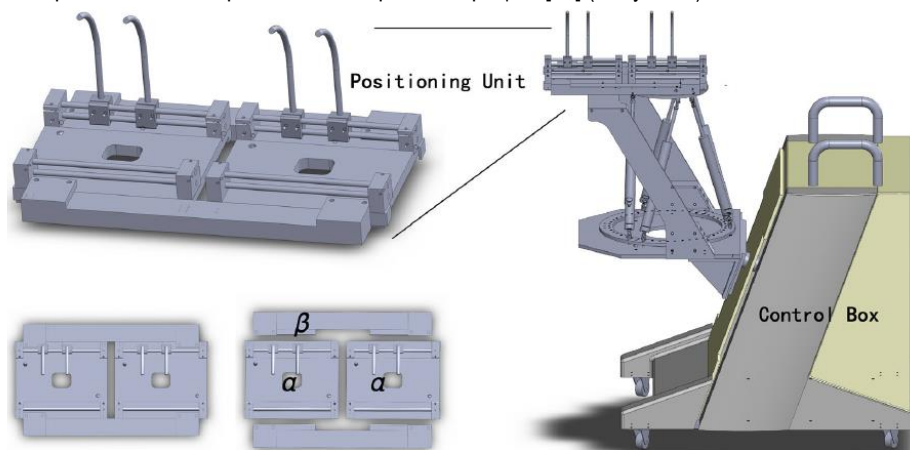
Другой типовой конструкцией робота параллельной репозиции является платформа Стюарта. Авторы разработали робота, который фиксируется на дистальном отломке, и на основе этой конструкции сможет увеличить рабочее пространство для хирурга. [56] (Рисунок 7).



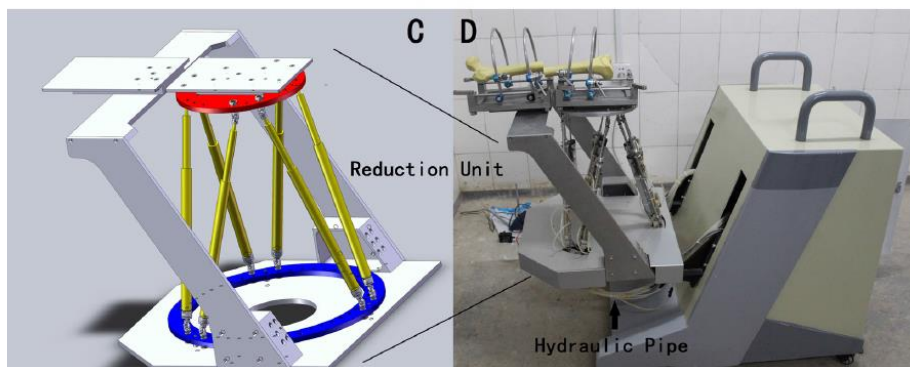
**Рисунок 7. Положение модели кости до (b) и после репозиции (c).**  
(Figure 7. Position of the bone model before (b) and after reduction (c).)

Так как робот был оснащен гидроприводами, во избежание постоянных утечек рабочей жидкости – робот был оснащен электромашинным приводом,

который позволил хирургам регулировать скорость передвижения рабочих рук (механизмов) робота во время операции. [18] (Рисунок 8)



**Рисунок 8. (A – D) Детали новой конструкции:**  
а - держатель кости;  
β - боковая планка.  
(Figure 8. (A - D) Details of the new design:  
A - bone holder;  
β - side bar).





В 2017 году *Abedinnasab M.H. et al.* предложили нового робота на параллельной платформе состоящего из трех ног, один оборотный шарнир от каждого пассивного универсального шарнира заменяется активным шарниром, что сокращает количество опор с шести до трех, каждая ножка приводится в действие оборотным и линейным приводом. [3] (Рисунок 9) Кроме того, подвижная платформа механизма легче, поскольку оборотные приводы опираются на неподвижную платформу. Этот робот прост в установке и в результате всех доработок достигается большее рабочее пространство для хирургических операций по сравнению с платформой Стюарта аналогичного размера.

В последние годы исследования в основном были сосредоточены на параллельных роботах, которые охарактеризовали себя как роботы, имеющие большую статическую жесткость, высокую точность

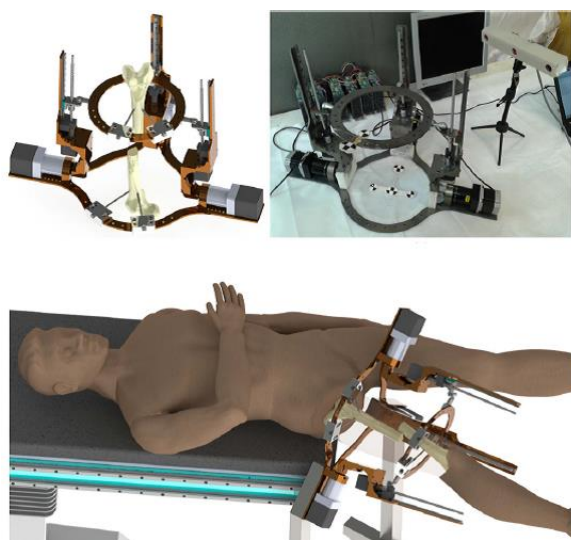


Рисунок 9. Детальная схема проектирования робота.  
(Figure 9. Detailed design diagram of the robot).

Репозиционный шаговый робот осуществляет движение исполнительных механизмов в трех плоскостях благодаря реверсивным двигателям, поэтому его движения более плавные и подходят для репозиции перелома кости с очень низкой скоростью. По сравнению с роботом по структуре Стюарта, данный робот имеет большую рабочую область с развитой кинематикой.



Рисунок 11. Эксперимент в лабораторных условиях с использованием робота для репозиции:  
а) сгибание колена;

позиционирования в купе с большой нагрузкой и отличной стабильностью работы. Тем не менее, параллельные роботы имеют ограниченный диапазон движений и нуждаются в комплексной перепроектировке в соответствии с клиническими задачами.

#### Робот на основе последовательно-параллельной гибридной структуре.

Из-за меньшего диапазона движения параллельных механизмов исследователи постепенно приняли последовательно-параллельную гибридную конструкцию, которая может сочетать в себе преимущества как последовательных, так и параллельных механизмов. В 2009 г. исследователи из Китая впервые предложили серийно-параллельного гибридного робота для репозиции с 6 степенями свободы, названного D'cross Dual Cartesian robot. [63, 55, 64, 65] (Рисунок 10)

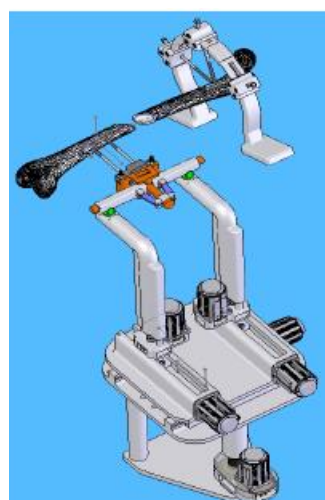


Рисунок 10. Параллельно-последовательный робот при репозиции перелома бедра.  
(Figure 10. Serial-Parallel Hybrid Structure robot for reduction of a hip fracture).

Кроме того, *Hung S.S. et al.* использовали С-образный штангенциркуль для фиксации последовательно-параллельного гибридного робота на операционном столе, тем самым усовершенствовав его для хирургического вмешательства при переломе нижней конечности, который может отдельно управлять проксимальным и дистальным концами перелома. [26] (Рисунок 11)



(Figure 11. An experiment in laboratory conditions using a robot for repositioning: a) knee flexion; (b) traction of the limb).

Кроме того, *Dagnino G. et al.* объединили платформу Стюарта с серийной роботизированной рукой и разработали робота для репозиции внутрисуставных переломов. [11, 12, 20] (Рисунок 12, 13) По сравнению с большинством описанных выше роботов для лечения переломов диафиза длинных костей, это была

прорывная технология, которая может уменьшить травмирование пациентов и повреждение мягких тканей, нервов, сосудов. Несмотря на то, что его точность высока в экспериментах на животных, достигаемое усилие сравнительно мало, что ограничивает его практическую осуществимость в клинике.

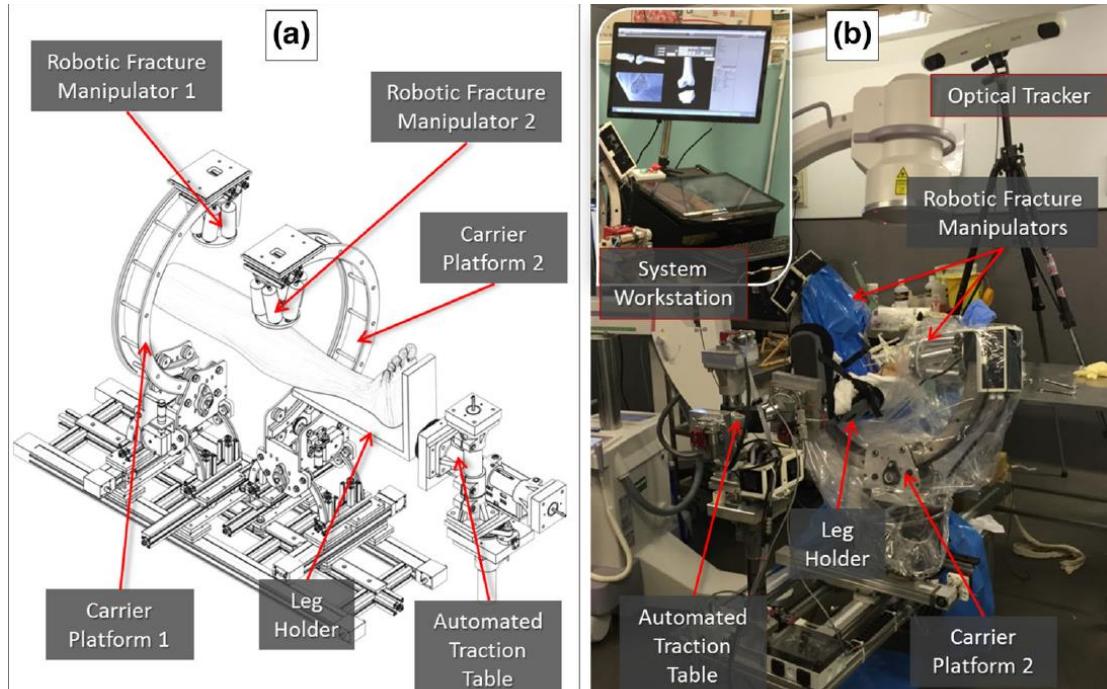


Рисунок 12. Хирургическая система RAFS: схема роботизированной системы (a) и ее интеграция с навигационной системой в лаборатории на трупе (b).  
(Figure 12. RAFS surgical system: diagram of the robotic system (a) and its integration with the navigation system in a cadaveric laboratory on the corpse (b).)

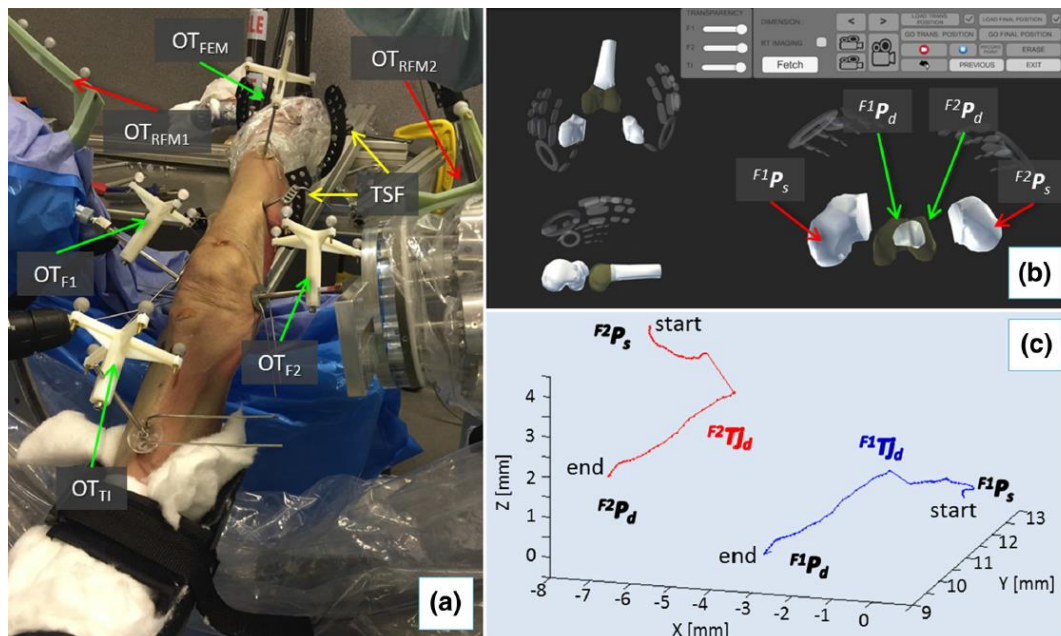


Рисунок 13. Система RAFS в лаборатории эксперимент на трупе. Оптические инструменты, прикрепленные к ортопедическим штифтам и манипуляторам (RFM), позволяют получать изображения в реальном времени во время операции и управлять системой с обратной связью (a); предоперационные данные импортируются в программное обеспечение для репозиции, и хирург приступает к интраоперационной виртуальной репозиции (b), генерируя желаемые траектории редукции F1Tjd и F2Tjd (c) для каждого фрагмента.  
Figure 13. RAFS system in laboratory cadaver experiment. Optical instruments attached to prosthetic posts and manipulators (RFM) provide real-time imaging during surgery and control the feedback system (a); preoperative data imported into software for reduction, and the surgeon proceeds to intraoperative virtual reduction (b), generating the desired reduction trajectories F1Tjd and F2Tjd (c) for each fragment.



**Сравнение различных вариантов роботов.**

*Робот для репозиции на основе внешней фиксированной рамы* впервые был изучен из-за его самой низкой стоимости конструкции, но его работа груба и имеет ряд недостатков. Модификации над конструкциями оказали хорошие результаты в экспериментах на модели кости, но не использовались в клинических испытаниях. Гексапод не может произвести более кропотливую работу для репозиции перелома. Серийный робот имеет такие преимущества как большую маневренность, ловкость и быстроту и большее рабочее пространство. После 2012 года почти не изучается из-за их очевидных недостатков.

*Параллельный робот*: большинство из них были разработаны на основе робота с неподвижной рамной конструкции Гофа-Стюарта, но использовались по другому принципу. По сравнению с серийным роботом-манипулятором параллельный робот может обеспечить более высокую жесткость, отношение полезной нагрузки к весу и точность работы. С развитием навигационных технологий параллельные роботы постепенно объединяются с другими технологиями, чтобы сформировать более полную роботизированную систему для лечения переломов. Последовательно-параллельная гибридная структура постепенно стала основным направлением исследований в этой области благодаря своим преимуществам. Точность репозиции и диапазон движения робота являются наилучшими достигнутыми результатами. Несмотря на то, что диапазон движений параллельного робота невелик, сила и крутящий момент, создаваемые во время операции, могут соответствовать медицинским требованиям. Хотя и экспериментально на моделях роботы показали хороший результат, их эффективность при переломах длинных трубчатых костей в настоящее время неудовлетворительна. Таким роботам по литературным данным по-прежнему помогают тяговые кровати для тракции из-за недостаточной тяги, которой они не обладают. [3, 63, 55, 64]

*Роботизированная хирургия* также имеет недостатки. Платформа робота требует больших операционных помещений для размещения манипуляторов, консолей и компьютеров. В некоторых учреждениях пространство операционной не позволяет размещать громоздкую аппаратуру и создает проблемы с мобилизацией пациентов, персонала и оборудования, а так же не гарантирована стерильность всей аппаратуры в операционной. Роботизированные платформы не автоматизированы и требуются манипуляции с помощью хирурга для доступа к операционному полю, не исключена необходимость и в других манипуляциях. Еще одна важная проблема для хирургов - отсутствие тактильных ощущений и обратной связи. Потеря ощущения прикосновения в сочетании с силой роботов-манипуляторов может привести к техническим ошибкам, к чрезмерному применению силы при обращении с мягкими тканями и вызвать ятрогенное повреждение, увеличение времени работы. Кроме того, после репозиции необходима фиксация перелома, выполнение которой это другой важный вопрос, требующий решения. Наружное фиксирующее устройство не является наилучшим выбором лечения

для внутрисуставных переломов в клинической практике, которая обычно используется в качестве временной иммобилизации для пациентов с тяжелой травмой или повреждении мягких тканей. [34] Как и любое устройство, использующее передовые технологии, роботизированная платформа показала более высокие затраты при эксплуатации по сравнению с традиционными методами лечения. Внедрение роботизированной хирургии в учреждениях требует обслуживания и покупки роботизированных принадлежностей, что влечет за собой значительное экономическое бремя. Однако, когда выполняется большое количество роботизированных операций, процедура может быть рентабельной. [28]

Вспомогательные технологии для репозиции переломов.

Для проведения репозиции перелома необходимо интегрировать робот со вспомогательной системой, оборудование для получения изображений, навигационной системой, интерактивной системой и т. д. На основе полной автоматизированной системы оперативное лечение перелома состоит из следующих шагов:

1. Выполняется инструментальная диагностика места перелома, затем путем обработки данных получается трехмерное изображение места перелома, а информацию получают с помощью навигационной системой.

2. Происходит расчет и робот переходит в рабочее положение с помощью компьютерного алгоритма. Затем производится планирование хода оперативного вмешательства.

3. Робот работает автоматически или управляется хирургом для проведения репозиции.

4. После вышеуказанных операций необходима эффективная фиксация (накостно пластиной или внутрикостный остеосинтез).

Роль навигационных технологий в травматологии заключается в получении данных о пациенте с помощью приложения, которое производит сбор медицинских изображений, данных о пространственном положении конечности, положение робота и данных хирургического инструментария с помощью устройства отслеживания пространственных координат. Наконец, вышеуказанные данные обрабатываются компьютерной системой для реализации объединения системы распознавания кости, управлением роботом, тем самым помогая хирургу выполнять точную и быструю операцию по репозиции перелома кости.

На сегодняшний день используются следующие **инструментальные методы**:

*КТ*: позволяет получать высокоточные томографические данные костной ткани. С помощью технологии обработки изображений место перелома можно реконструировать и отобразить с помощью визуального изображения. Однако КТ - процедура сопровождается относительно высокими дозами радиации и способствует облучению персонала. [48, 44]

*Стереорентгенография*: для получения изображений используя С-дуги, G-дуги или O-образные дуги, что обеспечивает высокую производительность в реальном времени. По сравнению с 2D, 3D-навигация в

перспективе может обеспечить более точное предоперационное планирование и 3D-визуализацию во время операции, что широко используется в хирургии. Однако из-за эффекта объема полученное трехмерное изображение менее эффективно, чем полученное с помощью КТ. [67]

**Ультразвуковая визуализация:** самым большим преимуществом, которой является неинвазивность. Однако этому могут помешать разные факторы, такие как скорость ультразвука, расстояние, деформация тканей и т. д.

**МРТ:** помимо того, что она неинвазивна, самым большим преимуществом по сравнению с другими методами является то, что оно не ограничивает поле одним лишь сегментом. Однако на него будут воздействовать окружающие электромагнитные поля и металлическое медицинское оборудование.

**Компьютерная навигация без изображения:** относится к созданию виртуального представления объекта путем определения различных анатомических структур и референтных меток с помощью системы фотоэлектрического отслеживания. Однако при минимально инвазивной хирургии репозиции перелома контрольный маркер может вызвать дополнительную травму у пациента.

Для объединения системы состоящей из кости, робот и компьютер комбинируют несколько вышеперечисленных устройств. Для достижения более точного управления проводится калибровка робота для изучения точного положения кости в пространстве. [54] Благодаря такой системе навигации врач может точно управлять роботом. Однако для достижения автоматической репозиции также требуется регистрация изображения. В настоящее время существует в основном два типа стратегий регистрации: один основан на анатомической статистике; другой основан на изображении контралатеральной кости. [25, 33] В рамках этих двух методов он использует данные модели кости в статистической базе данных или зеркальное изображение данных модели реконструкции контралатеральной стороны в качестве критерия для репозиции и использует проксимальные и дистальные изображения перелома, полученные с помощью компьютерной томографии.

#### **Управление роботом.**

Основным преимуществом робота для репозиции переломов является эффективное снижение уровня излучения с помощью дистанционного и автоматического управления. В настоящее время нет реальных коммерческих роботов для репозиции переломов и нет клинических данных, поэтому невозможно дать точный диапазон данных. Однако различия в производительности, рентабельности зависит от вида робота и способа управления.

В 1994 году впервые был применен робот для определения местоположения и сверления используя С-дугу и рентген снимки при переломах бедра на дистанционном управлении. [7] Управление с помощью джойстика - это дистанционное управление, который позволяет перемещать объект только в пределах плоскости изображения. Далее *R.Westphal et al.* впервые использовали джойстик для реализации

поступательного и вращательного движения. [62] Самым большим преимуществом дистанционного управления с помощью джойстика является его низкая стоимость и легкость в обучении, а недостатком - отсутствие тактильной обратной связи, но и существенных недостатков, чтобы не использовать джойстик, для манипуляции нет. [51]

Автоматический контроль, как видно в вышеперечисленных исследованиях, основан на перемещении дистального отломка относительно центрального. А результаты репозиции перелома прямо пропорционально зависят от предоперационной подготовки, алгоритма набора команд для репозиции и точности самого робота. В исследовании было проведено сравнение нескольких алгоритмов репозиции перелома бедренной кости и сделан вывод о том, что автоматическое управление удобнее и результат более точен, чем дистанционное. [52] Однако автоматическое управление во многом зависит от предоперационной подготовки, щепетильного детального планирования и не может работать при экстренных ситуациях и при интраоперационных находках.

#### **Роботизированные манипуляции.**

Поскольку операция с роботизированным устройством для репозиции переломов является минимально инвазивной процедурой, сам захват роботом кости не может быть выполнен с помощью большого инструмента. Однако при мини доступе и отсутствии большой площади контакта инструмента с костью может снизиться прочность соединения, а именно, полный захват кости для завершения репозиции. Чаще всего используются следующие методы захвата кости роботом: стержня (штеймана) внешней фиксации или винта с разными модификациями; с помощью сапога на стопе (подстопник).

*Weber – Spickschen et al.* протестировали три различных метода захвата роботом кости при переломах диафиза бедра с использованием аппарата внешней фиксации и стержня Шанца, репозиционной пластиной с блокируемыми винтами и трехточечного устройства (фиксируемого с трех точек доступа), состоящего из рамы и с двумя монокортикальными винтами на медиальном и латеральном мыщелках и стержня Шанца вводимого в диафиз бедра, [59] и пришли к выводу, что последний метод является единственным методом, способным выдержать нагрузку для репозиции перелома бедра. Но для этого необходимо сделать несколько мини разрезов что вызывает ятрогенное повреждение мягких тканей, а также кости при введении нескольких стержней.

*Giulio et al.* предложили инновационное устройство захвата, в виде ортопедического стержня, вводимого в кость и требующего только один разрез и одно отверстие в кости, в последующем соединяемого с манипулятором робота. [10] Это устройство подходит только для внутрисуставных переломов и требует индивидуальной настройки.

Что касается управления дистальным фрагментом с помощью сапога (подстопника), [58, 41] то специального разреза для захвата кости не требуется, но это «мягкое соединение», которое не может обеспечить прочную

фиксацию фрагментов кости для выполнения репозиции. Таким образом, этот метод не подходит для репозиции сложных переломов. Существуют и другие методы захвата кости, но они не прошли клинических испытаний либо являются недостаточно прочными для фиксации фрагментов во время репозиции.

#### **Обсуждение.**

В последние годы в научных работах с применением роботов в медицине был достигнут большой прогресс, но исследования роботов для репозиции переломов развивались сравнительно медленно. В настоящее время не существует робота для лечения переломов прошедшего клинические испытания. Поскольку модель вместо кости, кость животного или эксперимент с трупом сильно отличаются от реальных клинических случаев, многие роботы не могут полностью соответствовать клиническим требованиям. Есть потенциальные факторы, препятствующие разработке роботов для репозиции переломов это отсутствие учета реалистичных биомеханических моделей для исследования. Текущие исследования, использовавшие реалистичные биомеханические модели для выполнения репозиции роботами не имеют достаточную техподдержку для планирования и выполнения манипуляции. Также нерентабельны, большинство изучаемых в настоящее время роботов для репозиции переломов могут выполнять только вспомогательные функции во время операций (некоторым даже требуется помощь в виде тракционного аппарата), в то время как их стоимость и эксплуатация довольно высока.

Преимущества роботизированных устройств перед традиционной хирургией полностью не доказаны клиническими испытаниями, что ограничивает его практическую ценность. Однако с точки зрения клинической ценности, робот должен решить и улучшить проблемы с высокой дозой облучения медперсонала и пациентов, лечение пациентов с тяжелыми травмами, уменьшить физическую нагрузку хирурга.

По мнению многих авторов, операция по репозиции переломов должна выполняться с помощью уникальных хирургических роботов. В частности, ключевыми факторами являются низкое либо отсутствие излучения, минимальное травмирование пациентов, простота в эксплуатации и высокая адаптивность при экстренных ситуациях.

Избежать радиационного облучения хирурга и медперсонала возможно с помощью автоматического управления. Несмотря на то, что современные технологии управления достигли большого прогресса, до сих пор не существует операции, проводимой дистанционно, либо автоматизировано, которая могла бы точно осуществлять этапы операции. Для реализации необходима обратная связь, которая является наиболее важным фактором для операции. Следовательно, с точки зрения исследователей, в будущем работа будет сосредоточена на достижении точной обратной связи. Кроме того, авторы считают, что исследование биомеханической модели скелетно-мышечной системы поможет роботу достичь точности управления.

Фиксация роботом фрагментов кости может вызвать травмирование тканей во время операции по репозиции перелома. С точки зрения бионики, для достижения стабильного и не инвазивного захвата кости может быть хорошей идеей имитировать человеческую руку, удерживающую сегмент перелома. Это могут быть ловкий манипулятор с пятью либо тремя пальцами, который будет имитировать человеческую руку и сможет не инвазивно репозировать перелом за счет захвата. Развитие сенсорной и интерактивной технологий может улучшить понимание роботом намерений хирурга и добиться точности в манипуляциях, уменьшить травмирование за счет обратной связи.

Большинство операции могут обеспечить требование по репозиции переломов с помощью последовательно-параллельного гибридного механизма, который может стать основным прототипом для будущих роботов. Однако для некоторых манипуляций требуются больше сил, для адаптации к таким операциям робот будет оснащен модульными механизмами и может быть объединен с различными типами структур для адаптации к потребностям того или иного вида переломов.

Кроме робототехники, по мнению авторов, в дополнение к ключевым технологиям, рассмотренным выше, технология «big data» имеет большой потенциал в медицинском менеджменте и хирургии, [14] поэтому они будут применяться в этой области в будущем. Послеоперационное отслеживание операции после репозиции и фиксации переломов также будет гарантировано на основе технологии «big data». Будут записаны данные предоперационной диагностики, хирургических операций пациентов с переломами, а также данные о послеоперационном восстановлении. Большое количество данных пациентов будет проанализировано и обработано, чтобы обеспечить надежную справочную поддержку.

#### **Заключение.**

В этой статье рассматривается современное развитие роботизированных устройств для репозиции переломов. Робот для репозиции переломов - это продукт, сочетающий в себе медицинскую и инженерную работу, и за последние десятилетия он добился большого прогресса. Постоянно производится модернизация роботов. В основном в зависимости от их структуры роботы могут быть классифицированы на основе аппарата наружной фиксации (рамной конструкции), на серийной конструкции промышленного робота, параллельной платформе робота, последовательно-параллельной гибридной платформе. Среди них на основе последовательной платформы имеет лучшую маневренность, а параллельный механизм может лучше соответствовать требованиям силы и нагрузки при проведении репозиции, в то время как последовательно-параллельная гибридная структура имеет в разной степени преимущества как последовательной, так и параллельной структуры.

В последние годы исследования конструкции роботов достигли большого прогресса. Особенно заинтересовались роботами для репозиции переломов, исследования в этой области постепенно



фокусировались на ключевых технологиях и проблемах, таких как хирургическая навигация, управление роботом и взаимодействие кости с машиной. В навигационной технологии широко используется компьютерная томография для получения 2D, 3D изображений и навигационных устройств. В управлении роботом и технологии взаимодействия применяются как дистанционное, так и автоматическое управление. Кроме того, обратная связь между роботом и компьютером, включая механические параметры, является основным фактором, влияющим на практическую хирургического робота, где мгновенная интраоперационная обработка важна для автоматического управления. Кроме того, в последние годы начали развиваться исследования по созданию скелетных моделей, но в полученных результатах исследований есть недоработки. В настоящее время роботы, используемые в хирургии для репозиции переломов, достигли замечательных результатов в области точности управления роботами и навигации. Тем не менее, все существующие модели роботов еще недостаточно развиты, чтобы начать применять в клинической практике. В будущем робот для репозиции переломов будет развиваться в направлении снижения облучения, минимальной инвазивности, упрощению управления и высокой адаптируемости. Кроме того, будут развиваться технологии «big data», для послеоперационного отслеживания пациентов после роботизированной репозиции и фиксации переломов.

**Вклад авторов.** Все авторы в равной мере принимали участие в проведении исследования и написании данной статьи.

**Конфликт интересов.** Конфликт интересов не заявлен.

**Финансирование.** При проведении данной работы не было финансирования сторонними организациями и медицинскими представительствами.

**Сведения о публикации.** Авторы заявляют, что данный материал не был заявлен ранее для публикации в других изданиях и не был частично или полностью скопирован из других источников.

#### Литература:

1. Виленский В.А., Поздеев А.П., Бухарев Е.В., Поздеев А.А., Зубаиров Т.Ф., Соломин Л.Н. Ортопедические гексаподы: история, настоящее, перспективы // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2015. Том III. Выпуск 1. С. 61-69. ISSN 2309-3994
2. Поворознюк В.В., Григор'єва Н.В., Корж М.О., Страфун С.С., Власенко Р.О. Епідеміологія переломів кісток нижньої кінцівки в населення Вінницького району // Ортопедия, травматология и протезирование. 2018. № 1. С. 5–14. ISSN 0030-5987
3. Abedinnasab M.H., Farahmand F., Gallardo-Alvarado J. The Wide-Open Three-Legged Parallel Robot for Long-Bone Fracture Reduction // J. Mech. Robot. 2017, Vol. 9 (1). Paper No: JMR-16-1145
4. Adili Anthony. Robot-Assisted Orthopedic Surgery. Seminars in Laparoscopic Surgery, Vol 11, No 2 (June), 2004: pp 89-98
5. Aitken S.A., Rodrigues M.A., Duckworth A.D., Clement N.D., McQueen M.M., Court-Brown C.M.

Determining the Incidence of Adult Fractures: How Accurate Are Emergency Department Data? The Orthopaedic Trauma Unit, Department of Orthopaedics, Royal Infirmary of Edinburgh, Little France, Edinburgh EH16 4SU, UK. Volume 2012, Article ID 837928, 7 pages

6. Bai L., Yang J., Chen X., Sun Y. and Li X. Medical Robotics in Bone Fracture Reduction Surgery: A Review. Sensors 2019, 19, p.3593
7. Bouazza-Marouf K., Browbank I. Robotic-assisted internal fixation of femoral fractures // Proc. Inst. Mech. Eng. Part H J. Eng. Med. 1995, 209, 51–58
8. Bratschitsch G., Leitner L., Stücklschweiger G., Guss H., Sadoghi P., Puchwein P., Leithner A. & Radl R. Radiation Exposure of Patient and Operating Room Personnel by Fluoroscopy and Navigation during Spinal Surgery. Competence Center for Medical Physics and Radiation Protection, Medical University of Graz, Graz, Austria. 2019. 9:17652
9. Calori G.M., Tagliabue L., Mazza E., de Bellis U., Pierannunzi L., Marelli B.M., Colombo M., Albisetti W. Tibial pilon fractures: Which method of treatment? // J. Care Injured 41 (2010) 1183–1190
10. Dagnino G., Georgilas I., Tarassoli P., Atkins R., Dogramadzi S. Design and Real-Time Control of a Robotic System for Fracture Manipulation. In Proceedings of the 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Milan, Italy, 25–29 August 2015; pp. 4865–4868
11. Dagnino G., Georgilas I., Tarassoli P., Atkins R., Dogramadzi S. Vision-based real-time position control of a semi-automated system for robot-assisted joint fracture surgery // Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg. 2016, 11, 437–455.
12. Dagnino G., Georgilas I., Kohler P., Atkins R., Dogramadzi S. Image-Based Robotic System for Enhanced Minimally Invasive Intra-Articular Fracture Surgeries. In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Stockholm, Sweden, 16–21 May 2016. pp. 696–701. ISBN: 978-1-4673-8026-3
13. Dagnino G., Georgilas I., Morad S., Gibbons P., Tarassoli P., Atkins R., Dogramadzi S. Image-Guided Surgical Robotic System for Percutaneous Reduction of Joint Fractures // Annals of Biomedical Engineering 2017. p. 2648–2662. ISSN 0090-6964
14. Dash S., Shakyawar S.K., Sharma M., Kaushik S. Big data in healthcare: management, analysis and future prospects. Dash et al // J Big Data (2019) 6:54
15. Deep K., Shankar S., Mahendra A. Computer assisted navigation in total knee and hip arthroplasty. SICOT J 2017, 3, 50
16. Dirhold B.M., Citak M., Al-Khateeb H., Haasper C., Kendoff D., Krettek C., Citak M. Current state of computer-assisted trauma surgery // Curr Rev Musculoskelet Med. 2012. 5:184–191
17. Du H., Hu L., Hao M. Application of binocular vision navigation technique in diaphyseal fracture reduction // Int J Med Robotics Comput Assist Surg. 2020. 16:e2082
18. Du H., Hu L., Li C., Wang T., Zhao L., Li Y., Mao Z., Liu D., Zhang L., He C., et al. Advancing computer-assisted orthopaedic surgery using a hexapod device for closed diaphyseal fracture reduction // Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg. 2015, 11, 348–359

19. Führtmeier B., Egersdoerfer S., Mai R., Hente R., Dragoi D., Monkman G., Nerlich M. Reduction of femoral shaft fractures in vitro by a new developed reduction robot system 'RepoRobo'. // *J. Care Injured*. 2004. 35, S-A113—S-A119
20. Georgilas I., Dagnino G., Tarassoli P., Atkins R. And Dogramadzi S. Robot-Assisted Fracture Surgery: Surgical Requirements and System Design. *Annals of Biomedical Engineering* 2018
21. Gosling T., Westphal R., Hufner T., Faulstich J., Kfuri M., Wahl F., Krettek C. Robot-assisted fracture reduction: A preliminary study in the femur shaft // *Medical & Biological Engineering & Computing*, Vol.43, pp. 115-120, 2005
22. Gould Fumito Ito Jon C. Robotic foregut surgery. *The international journal of medical robotics and computer assisted surgery*. 2006; 2: 287–292.
23. Graham A.E., Xie S.Q., Aw K.C., Xu W.L., Mukherjee S. Design of a Parallel Long Bone Fracture Reduction Robot with Planning Treatment Tool. *International Conference on Intelligent Robots and Systems* October 9 - 15, 2006, Beijing, China. pp. 1255–1260. ISSN: 2153-0866
24. He M., Han W., Zhao C-p, Su Y-g, Zhou L., Wu X-b, Wang J-q. Evaluation of a Bi-Planar Robot Navigation System for Insertion of Cannulated Screws in Femoral Neck Fractures // *Orthopaedic Surgery*. 2019. 11:373–379.
25. Hu L., Zhang J., Li C., Wang Y., Yang Y., Tang P., Fang L., Zhang L., Du H., Wang L. A femur fracture reduction method based on anatomy of the contralateral side // *Comput. Biol. Med.* 2013, 43, 840–846.
26. Hung S.S., Lee, M.Y. Functional assessment of a surgical robot for reduction of lower limb fractures // *J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.* 2010. 6, 413–421
27. Fumito Ito, Jon C. Gould. Robotic foregut surgery // *J Med Robotics Comput Assist Surg* 2006. 2: 287–292
28. Jara R.D., Guerrón A.D., Portenier D. Complications of Robotic Surgery. 2020 Apr;100(2):461-468
29. Jiang B., Azad Tej D., Cottrill E., Zygorakis C.C., Zhu A.M., Crawford N., Theodore N. New spinal robotic technologies. Higher Education Press and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019, p. 723-729
30. Karkenny A.J., Mendelis J.R., Geller D.S., Gomez J.A. The Role of Intraoperative Navigation in Orthopaedic Surgery. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, October 1, 2019, Vol 27, No 19
31. Karthik K., Legate-Stone T.C., Dasgupta P., Tavakkolizadeh A., Sinha J. Robotic surgery in trauma and orthopaedics: a systematic review // *Bone Jt. J.* 2015, 97, 292–299
32. Kaye J.A., Jick H. Epidemiology of lower limb fractures in general practice in the United Kingdom // *Injury Prevention* 2004;10:368–374
33. Keast-Butler O., Lutz M. J., Angelini M., Lash N., Pearce D., Crookshank M., Zdero R., Schemitsch E.H. Computer navigation in the reduction and fixation of femoral shaft fractures: A randomized control study. *Injury*. 2012, 43, 749–756;
34. Keudell A., Shoji K., Nasr M., Lucas R., Dolan R., and Weaver M.J. Treatment options for distal femur fractures // *J. Orthop. Trauma* 30 (Suppl 2):S25–27, 2016
35. Koo T.K., Chao E.Y., Mak A.F. Development and validation of a new approach for computer-aided long bone fracture reduction using unilateral external fixator // *Journal of Biomechanics*. 2006. 39. 2104–2112.
36. Kuang S., Leung sui K., Wang T., Hu L., Chui E., Liu W., Wang Yu. A novel passive/active hybrid robot for orthopaedic trauma surgery // *Int J Med Robotics Comput Assist Surg* 2012.8(4):458-67
37. Kuo L.T., Chi C.C., Chuang C.H. Surgical interventions for treating distal tibial metaphyseal fractures in adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2015, Issue 3. Art. No.: CD010261
38. Lei H., Sheng L., Manyi W., Junqiang W., Wenyong L.A biplanar robot navigation system for the distal locking of intramedullary nails. // *J Med Robotics Comput Assist Surg*. 2010; 6: 61–65
39. Li C., Wang T., Hu L., Tang P., Wang L., Zhang L., Guo N., Tan Y. A novel master–slave teleoperation robot system for diaphyseal fracture reduction: a preliminary study // *Computer assisted surgery*, 2016. vol. 21, №S1, 163–168
40. Maeda Y., Tamura Y., Saito M., Yamamotoa T., Yonenobua K., Warisawab S., Mitsuishib M., Suganoc N. Measurement of traction load and torque transferred to the lower extremity during simulated fracture reduction. *Int Congr Ser* 2005; 1281: 674–679
41. Maeda Y., Sugan N., Saito M., Yonenobu K., Sakuma I., Naiajima Y., Warsawa S., Mitsuishi M. Robot-assisted femoral fracture reduction: Preliminary study in patients and healthy volunteers // *Comput. Aided Surg*. 2008, 13, 148–156
42. Mason A., Paulsen R., Babuska J.M., Rajpal S., Burneikiene S., Nelson E.L., Villavicencio A.T. The accuracy of pedicle screw placement using intraoperative image guidance systems: A systematic review // *J Neurosurg Spine*. 20:196–203, 2014
43. Mavrogenis A.F., Savvidou O.D., Mimidis G., Papanastasiou J., Koulalis D., Demertzis N., Papagelopoulos P.J. Computer-assisted Navigation in Orthopedic Surgery // *CME article*. 2013. V.36(8), p. 631-42
44. Mettler Jr.F., Wiest P.W., Locken J.A., Kelsey C.A. CT scanning: patterns of use and dose // *J. Radiol. Prot.* 20 (2000) 353–359. Printed in the UK PII: S0952-4746(00)17764-X
45. Pavić R., Hnatešen D., Margetić P. Epidemiology of adult fractures in eastern Croatia by cause of injury, fracture location and type of treatment // *Acta Clin Croat*, 2017. Vol. 56 (3), p. 494-504.
46. Pearle A.D., Kendoff D., Musahl V. Perspectives on Computer-Assisted Orthopaedic Surgery: Movement Toward Quantitative Orthopaedic Surgery // *J Bone Joint Surg Am*. 2009. 91 Suppl 1, p. 7-12.
47. Qiao F., Li D., Jin Z., Gao Y., Zhou T., He J., Cheng L. Application of 3D printed customized external fixator in fracture reduction. *G Model JINJ*-6054. Pages 6.
48. Raman S.P., Mahesh M., Blasko R.V. CT Scan Parameters and Radiation Dose: Practical Advice for Radiologists // *J Am Coll Radiol*. 2013. 10:840-846
49. Seide K., Faschingbauer M., Wenzl M.E., Weinrich N., Juergens C. A hexapod robot external fixator for computer assisted fracture reduction and deformity

correction // J Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2004. 1(1):64–69

50. Stewart D. A platform with six degrees of freedom // Proc Insn Mech Engr. 196. 5-66 Vol 180 Pt I No 15

51. Suero E.M., Hartung T., Westphal R., Hawi N., Liodakis E., Citak M., Krettek C., Stuebig T. Improving the human-robot interface for telemanipulated robotic long bone fracture reduction: Joystick device vs. haptic manipulator // J Med Robotics Comput Assist Surg. 2018. 14. e1863.

52. Suero E.M., Westphal R., Citak M., Hawi N., Liodakis E., Omar M., Krettek C., Stuebig T. Comparison of algorithms for automated femur fracture reduction // J Med Robotics Comput Assist Surg. 2017. e1864.

53. Tang P., Hu L., Du H., Gong M., Zhang L. Novel 3D hexapod computer-assisted orthopaedic surgery system for closed diaphyseal fracture reduction // Int J Med Robotics Comput Assist Surg. 2012. 8: 17–24.

54. Wang L., Wang T., Tang P., Hu L., Liu W., Han Z., Hao M., Liu H., Wang K., Zhao Y., Guo N., Cao Y., Li C. A new hand-eye calibration approach for fracture reduction robot // Computer assisted surgery, 2017. At: 04:04

55. Wang S., Chen Y., Ping Z. Control Simulation of a six DOF Parallel-Serial Robot for femur fracture reduction. In Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems, Hong Kong, China, 11–13 May 2009; pp. 330–335;

56. Wang T., Li C., Hu L., Tang P., Zhang L., Du H., Luan S., Wang L., Tan Y., Peng C. A Removable Hybrid Robot System for Long Bone Fracture Reduction // Bio-Medical Materials and Engineering 24 (2014) 501–509

57. Wang Y. Campbell's Operative Orthopaedics, 13th ed.; Peking University Medical Press: Beijing, China, 2009

58. Warisawa S., Ishizuka T., Mitsuishi M., Sugano N., Yonenobu K., Nakazawa T. Development of a femur fracture reduction robot. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004 (ICRA'04), New Orleans, LA, USA, 26 April–1 May 2004; pp. 3999–4004;

59. Weber-Spickschen T.S., Oszwald M., Westphal R., Krettek C., Wahl F., Gosling T. Development of a fixation device for robot assisted fracture reduction of femoral shaft fractures: A biomechanical study // Technol. Health Care 2010, 18, 207–216

60. Westphal R., Winkelbach S., Gössling T., Hüfner T., Faulstich J., Martin P., Krettek C., Wahl F.M. A surgical telemanipulator for femur shaft fracture reduction // J Med Robotics Comput Assist Surg. 2006, 2: 238–250

61. Westphal R., Winkelbach S., Wahl F., Gössling T., Oszwald M., Hüfner T., Krettek C. Robot-assisted Long

Bone Fracture Reduction // The International Journal of Robotics Research Vol. 28, No. 10, October 2009, pp. 1259–1278

62. Westphal R., Winkelbach S., Wahl F., Gössling T., Oszwald M., Hüfner T., Krettek C. Robot-assisted long bone fracture reduction. // J. Robot. Res. 2009, 28, 1259–1278

63. Ye R., Chen Y. Development of A Six Degree of Freedom (DOF) Hybrid Robot for Femur Shaft Fracture Reduction. In Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok, Thailand, 22–25 February 2009. V. 1–4, pp.306–311.

64. Ye R., Chen Y. Path Planning for Robot Assisted Femur Shaft Fracture Reduction: A Preliminary Investigation. In Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems, Hong Kong, China, 11–13 May 2009.; pp. 113–117

65. Ye R., Chen Y. and Yau W. A Simple and Novel Hybrid Robotic System for Robot-Assisted Femur Fracture Reduction. Advanced Robotics. 2012. 26. 83–104

66. Yen P.L., Davies B.L. Active constraint control for image-guided robotic surgery. Proc. IMechE Vol. 224 Part H: // J. Engineering in Medicine 2009

67. Zhang J., Weir V., Fajardo L., Lin J., Hsiung H., Ritenour E.R. Dosimetric characterization of a cone-beam O-arm (TM) imaging system. Journal of X-Ray Science and Technology. 2009. 17 305–317

68. Zhang Q., Sun N., Huang Q., Zhu Sh. & Wu X. Minimally Invasive Plating Osteosynthesis in the Treatment of Humeral Shaft Fractures: A Meta-Analysis // Journal of Investigative Surgery, 2016, 1–10.

69. Zhao J.X., Li C., Ren H., Hao M., Zhang L.C. and Tang P.F. Evolution and Current Applications of Robot-Assisted Fracture Reduction: A Comprehensive Review // Annals of Biomedical Engineering. 2020. 48(1): pp. 203-224.

#### References (1-2):

1. Vilenskii V.A., Pozdeev A.P., Bukharev E.V., Pozdeev A.A., Zubairov T.F., Solomin L.N. Ortopedicheskie geksapody: istoriya, nastoyashchee, perspektivy [Orthopedic hexapods: history, present, prospects]. Ortopediya, travmatologiya i vosstanovitel'naya khirurgiya detskogo vozrasta [Orthopedics, Traumatology and Pediatric Reconstructive Surgery]. 2015. Tom III (1). pp. 61-69. ISSN 2309-3994

2. Povoroznyuk V.V., Grigor'eva N.V., Korzh M.O., Strafun S.S., Vlasenko R.O. Epidemiologiya perelomiv kistok nizhn'oi kintsivki v naseleennyi Vinnits'kogo raionu [Epidemiology of lower extremities fractures in the population in Vinnitsa region]. Ortopediya, travmatologiya i protezirovanie [Orthopedics, traumatology and prosthetics]. 2018. №1, pp. 5–14. ISSN 0030-5987

#### Контактная информация:

**Аубакирова Сабина Кайратовна** – докторант 2-го года обучения по специальности «медицина», ассистент кафедры ортопедической хирургии. Кафедра ортопедической хирургии, НАО «Медицинский университет Семей», г. Семей, Республика Казахстан.

**E-mail:** sabina\_ak@mail.ru

**Почтовый адрес:** Республика Казахстан, Восточно-Казахстанская область, 071400, г. Семей, ул. Мичурина 140А.

**Тел.:** +7 702 852 95 60