

УДК 62-133.2+669

к.т.н. Левченко О.А.,
студ. Матвейчук А.С.,
студ. Сомченко А.А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ РУКИ ЧЕЛОВЕКА

Разработана кинематическая модель руки человека и проведен структурный анализ кинематических пар с определением их класса и степеней подвижности. Определена общая степень подвижности представленной кинематической модели.

Ключевые слова: кинематическая модель, рука человека, верхняя конечность, степень подвижности, структурный анализ, кинематическая пара.

Анализ работы руки человека и создание её кинематической модели, с учётом робототехнической инженерии, в современных условиях является перспективным научно-техническим заданием, как с точки зрения решения вопросов автоматизации различных отраслей промышленности, так и в медицинских целях у людей с нарушениями работы или потерей верхних конечностей [1].

Кроме того, в современных условиях ведущие компании в высокоразвитых в технологическом отношении странах строят свою перспективную политику области создания различных роботов, в том числе как управляемых, с помощью персонального компьютера, так и с применением искусственного интеллекта, в частности, бытового назначения [2]. В профессиональном спорте для достижения выдающихся результатов является необходимым знание и использование теоретических основ оптимизации технологии обучения на основе теории построения движений, органически связанной с изучением кинематических пар в теле человека, в частности и в конечностях [3].

Задачей данной статьи является выявление кинематических пар, образующих кинематическую цепь модели верхней конечности человека, анализ их относительного движения и степени подвижности модели в целом.

В настоящее время известны различные модели верхних конечностей человека, которые в различной степени приближаются к

истинному её строению. Однако, из-за большого количества звеньев, входящих в кинематическую цепь руки и сложности её построения, как биомеханической системы, такие варианты являются лишь приближенными и не отражают всей полноты гармоничной организации естественного процесса эволюции человека.

Простейшая биомеханическая модель руки человека состоит из трёх твёрдых тел: плечо, предплечье и кисть, соединённых между собой идеальными шарнирами, моделирующими плечевую, локтевую, и лучезапястный суставы (рис. 1).

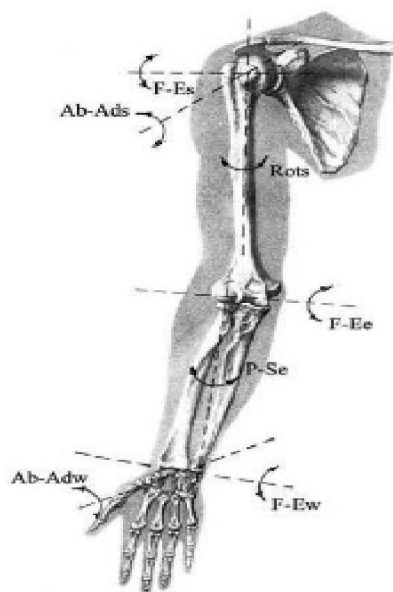


Рисунок 1 – Биомеханическая модель руки человека

Три степени подвижности в плечевом суставе связывают с движением – F-Es плеча в продольной (сагиттальной) плоскости тела, движением – Ab-Ads плеча в поперечной (фронтальной) плоскости тела и вращением осей сустава локтя относительно продольной оси плеча (Rots).

Локтевой сустав моделируется шарниром с двумя степенями свободы, соответствующими вращению предплечья относительно плеча – F-Ee вращению лучевой кости относительно локтевой – P-Se. В результате пронации – супинации происходит вращение кисти относительно продольной оси предплечья. Лучезапястный сустав также моделируется шарниром с двумя степенями свободы, соответствующими сгибанию – разгибанию (F-Ew) и отведению – приведению (Ab-Adw) кисти относительно предплечья. Таким образом, модель руки, не включающая пальцы, имеет семь степеней свободы, соответствующих семи независимым вращениям в суставах руки: трем – в плечевом, двум – в локтевом и двум – в лучезапястном.

Утверждается, что это справедливо для подавляющего большинства движений верхней конечности [4]. В данном случае плечевой сустав моделируется шаровым шарниром с тремя степенями свободы. Шарнир обеспечивает произвольные вращения плеча относительно центра сустава, которые могут быть описаны любым способом изменений ориентации твёрдого тела при движении вокруг неподвижной точки, например, тремя углами Эйлера или углами вращений вокруг фиксированных осей, связанных с телом человека.

Таким образом, в литературных источниках представлено большое разнообразие разных моделей, построенных для определенных целей и сфер жизнедеятельности человека.

Одним из известных и самых распространенных способов, позволяющих изучить строение кинематической цепи в такой дисциплине, как теория механизмов и машин, является метод структурного ана-

лиза, заключающийся в разбиении целого механизма на составные части с последующим изучением их свойств. В данном случае внимание будет уделяться кинематическим парам, представляющими собой подвижные соединения двух звеньев. Такая методика позволяет определить вид кинематической пары по относительному движению её звеньев, класс по классификации Л.В. Ассура – И.И. Артоболевского и рассчитать степень подвижности кинематической цепи по формуле Сомова-Малышева для пространственных механизмов, звенья которых могут двигаться в разных взаимно-перпендикулярных плоскостях [5]:

$$W = 6 \cdot n - 5 \cdot p_5 - 4 \cdot p_4 - 3 \cdot p_3 - 2 \cdot p_2 - p_1,$$
















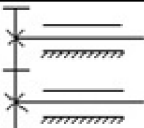
где n – число подвижных звеньев; p_5 – количество кинематических пар V класса; p_4 – количество кинематических пар IV класса; p_3 – количество кинематических пар III класса; p_2 – количество кинематических пар II класса; p_1 – количество кинематических пар I класса.

Известные разновидности кинематических пар представлены в таблице 1 [5].

При этом, кинематические пары первого и пятого классов применяются в технике очень редко, а в биологических моделях вообще отсутствуют. Зубчатая кинематическая пара в искусственных механизмах, используемая для передачи и преобразования движения по различным параметрам, у живых организмов не встречается, за исключением механизма движителя цикад. Она представляет собой, миниатюрную зубчатую передачу. Оказалось, что у этих цикад основания бедер задних ног имеют ряд миниатюрных отростков, напоминающих зубья шестерни. Перед самым толчком насекомое сводит ноги так, что зубья одной ноги входят в зацепление с зубьями другой, что и обеспечивает практически идеальную синхронность движений обеих конечностей при прыжках [6].

МЕХАНИКА

Таблица 1 – Виды кинематический пар и их свойства

Эскиз	Условное обозначение	Название пары	Класс пары	Способ контакта	Способ замыкания
		Вращательная	V	По площади	Геометрическое
		Поступательная	V	По площади	Геометрическое
		Винтовая	V	По площади	Геометрическое
		Цилиндрическая	IV	По площади	Геометрическое
		Сферическая	III	По площади	Геометрическое
		Сферическая с пальцем	IV	По площади	Геометрическое
		Цилиндр-плоскость	II	Линейный	Силовое
		Шар-плоскость	I	Точечный	Силовое
		Зубчатая	IV	Линейный	Силовое

Представим кинематическую схему модели руки человека в виде изображённой на рисунке 2. Пронумеруем звенья, из которых состоят кинематические пары, за стойку приняв корпус тела человека.

Выделим кинематические пары, начиная с неподвижного звена (корпуса), определим их вид движения и класс.

На рисунке 2 показана кинематическая схема модели верхней конечности человека, в которой учтены только значимые при выполнении движений кинематические пары, а оказывающими слабое влияние на подвижность руки в целом кинематическими парами пренебрежено.

Структурируем кинематические пары в модели руки при следующих допущениях:

1. За неподвижное звено условно примем корпус тела человека (туловище), соединенное с плечом сферическим шарниром.

2. Локтевое соединение, представляющее собой цилиндрический шарнир, представим сферическим шарниром с пальцем, т.к. он способствует вращательному движению кисти вокруг предплечья, а само запястье таким движением в полной мере не обладает.

3. Ввиду сильной неподвижности костей ладони, исключим пять суставов, соединяющих пальцы, оставив только их фаланги (рис.3).

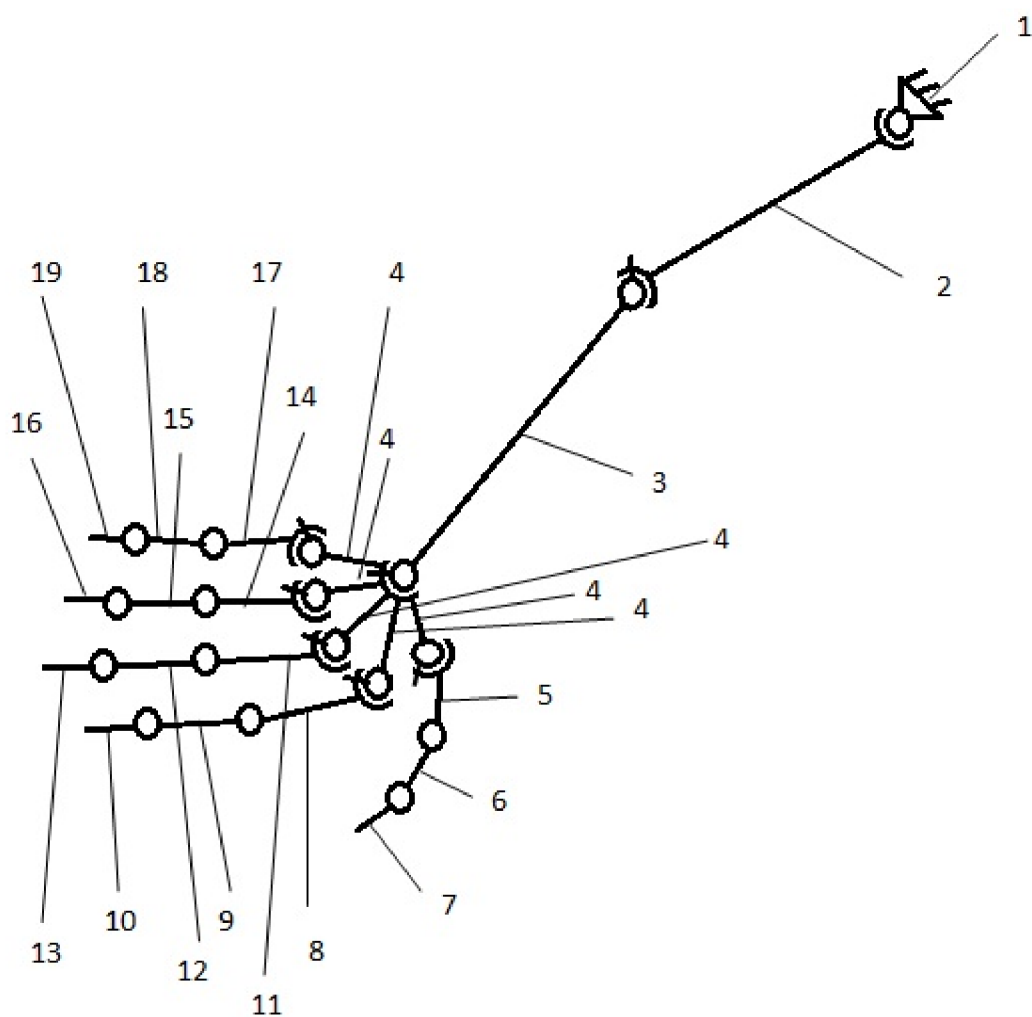


Рисунок 2 – Кинематическая схема модели верхней конечности человека

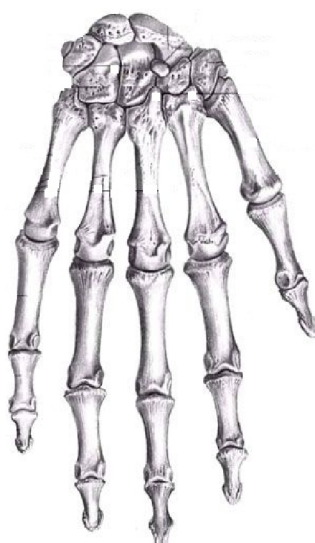


Рисунок 3 – Строение кисти руки

Из анализа кинематических пар на рисунке 2 имеем:

1-2 – кинематическая пара III класса, вращательная - p_3 (соединение корпуса тела человека с плечом);

2-3 – кинематическая пара IV класса, вращательная – p_4 (сочленение плеча и предплечья);

3-4 – кинематическая пара IV класса, вращательная – p_4 (соединение предплечья с кистью);

4-5 – кинематическая пара IV класса, вращательная – p_4 ;

5-6 – кинематическая пара V класса, вращательная – p_5 ;

6-7 – кинематическая пара V класса, вращательная – p_5 ;

4-8 – кинематическая пара IV класса, вращательная – p_4 ;

8-9 – кинематическая пара V класса, вращательная – p_5 ;

9-10 – кинематическая пара V класса, вращательная – p_5 ;

4-11 – кинематическая пара IV класса, вращательная – p_4 ;

11-12 – кинематическая пара V класса, вращательная – p_5 ;

12-13 – кинематическая пара V класса, вращательная – p_5 ;

4-14 – кинематическая пара IV класса, вращательная – p_4 ;

14-15 – кинематическая пара V класса, вращательная – p_5 ;

14-16 – кинематическая пара V класса, вращательная - p_5 ;

4-17 – кинематическая пара IV класса, вращательная – p_4 ;

17-18 – кинематическая пара V класса, вращательная – p_5 ;

18-19 – кинематическая пара V класса, вращательная – p_5 .

В рассматриваемой кинематической схеме все кинематические пары являются вращательными, из них III класса – 1 штука, IV класса – 7 штук, V класса – 10 штук.

Степень подвижности такой пространственной модели, ввиду отсутствия кинематических пар I и II класса выразится сокращённой формулой:

матических пар I и II класса выразится сокращённой формулой:

$$W = 6 \cdot n - 5 \cdot p_5 - 4 \cdot p_4 - 3 \cdot p_3,$$

где $n=18$; $p_5=10$; $p_4=7$; $p_3=1$.

$$W = 6 \cdot 18 - 5 \cdot 10 - 4 \cdot 7 - 3 \cdot 1 = 27.$$

Часто, в аналогичных моделях, локтевой сустав представляют в виде кинематической пары V класса, а соединение кисти с предплечьем, как кинематическую пару IV класса. В этом случае $p_3=2$, $p_4=6$; $p_5=11$, а степень подвижности:

$$W = 6 \cdot 18 - 5 \cdot 11 - 4 \cdot 6 - 3 \cdot 2 = 23.$$

Таким образом, число возможных независимых перемещений звеньев модели существенно снижается, что для кинематической цепи в целом означает потерю возможностей на 15,2 %.

С точки зрения практической реализации данные замещения кинематических пар не представляют никаких трудностей и, практически, не влияют на сложность или экономическую составляющую проекта изготовления верхней конечности. Ну, а так как управление пространственным механизмом все равно требует микропроцессорного слежения по разработанной программе или в режиме самообучения, то ограничение степени свободы механизма не является рациональной, в связи с тем, что это приводит к снижению его потенциальных возможностей.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Синтезирована модель верхней конечности человека в виде девятнадцатизвенной разомкнутой кинематической цепи. Все кинематические пары, входящие в состав модели вращательные. Степень подвижности – 27.

Результаты кинематического моделирования могут быть использованы при создании кибернетических механизмов пространственного типа, облегчающих деятельность человека или применяемых при протезировании людей, не имеющих верхних конечностей.

Библиографический список

1. Платонов А. К. Методы биомехатроники тренажера руки человека [Электронный ресурс] / А. К. Платонов, А. А. Фролов, Е. В. Бирюкова и [др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. — 2012. — № 82. — 40 с. — Режим доступа: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-82>.
2. Robotbase – Ещё один личный робот. — Режим доступа: <http://www.robo-geek.ru/bytovye-roboty/robotbase-esche-odin-lichnyi-robot>.
3. Зайцева Л. С. Биомеханические основы строения ударных действий и оптимизация технологии обучения (На примере тенниса): автореф. дис. на соискание научн. степени докт. пед. наук : спец. 01.02.08. "Биомеханика" / Л. С. Зайцева. — Москва, 2000. — 21 с.
4. Winter D. A. Biomechanics and motor control in human movement (Se-cond ed.) / D. A. Winter. — NewYork: JohnWiley and Sons, 1990.
5. Заблонский К. И. Теория механизмов и машин : учебник / К. И. Заблонский, Б. М. Щекин.— К.: Высш. шк.. Головное издательство, 1989. — 376 с.
6. Malcolm Burrows. Interacting gears synchronize propulsive leg movements in a jumping insect / Malcolm Burrows, Gregory Sutton. — Science, 2013. — V. 341. — P. 1254–1256. Doi:10.1126/science.1240284. — Режим доступа: <http://www.sciencemag.org/content/341/6151/1254>

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. ЛГУ им. Даля Харламовым Ю.А.,
к.т.н., проф. ДонГТУ Ульяницким В.Н.**

Статья поступила в редакцию 10.11.15.

к.т.н. Левченко О.О., студ. Матвейчук О.С., студ. Сомченко О.О.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

КІНЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ РУКИ ЛЮДИНИ

Розроблено кінематичну модель руки людини та проведено структурний аналіз кінематичних пар з визначенням їх класу та ступеню рухомості. Визначено загальну ступінь рухомості приведеної кінематичної моделі.

Ключові слова: кінематична модель, рука людини, верхня кінцівка, ступінь рухомості, структурний аналіз, кінематична пара.

PhD in Engineering Levchenko O.A., Student Matveichuk A.S., Student Somchenko A.A.
(DonSTU, Alchevsk, LPR)

KINEMATIC MODEL AND STRUCTURAL ANALYSIS OF MAN'S ARM

Kinematic model of man's arm was designed and structural analysis of the kinematic pairs was made along with their classification and ranging according to degree of freedom. The general degree of freedom of the proposed kinematic model was determined.

Key words: kinematic model, man's arm, upper limb, degree of freedom, structural analysis, kinematic pairs.