

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ИНСТИТУТ ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ

В. М. Зациорский

КИНЕМАТИКА ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА

Лекция для студентов

Москва - 1990

План

- I. Основы кинематики точки и тела
 - I.1. Основные понятия кинематики
 - I.2. Сложные движения
 - I.3. Связи и степени свободы
2. Описание положений и движений человека
 - 2.1. Место, ориентация и поза тела
 - 2.2. Определение места тела
 - 2.3. Определение ориентации тела
 - 2.4. Определение позы тела
3. Кинематические пары. Движения в суставах
 - 3.1. Кинематические пары
 - 3.2. Движения в суставах
 - 3.3. Определение осей вращения. Биомеханические длины звеньев тела
4. Движения в кинематических цепях
 - 4.1. Кинематические цепи
 - 4.2. Сложение скоростей в кинематических цепях
 - 4.3. Ускорения в кинематических цепях
5. Сложение вращательного и поступательного движений

Кинематика – раздел механики, в котором изучаются движения материальных объектов без учета их масс и действующих на них сил. Любая совокупность материальных объектов именуется механической системой.

I. ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ ТОЧКИ И ТЕЛА

Вспомним главные сведения из курса средней школы.

I.1. Основные понятия кинематики

Воображаемый след, оставляемый движущейся точкой, называется ее траекторией. Различают движения:

- а) криволинейные (траектория – произвольная кривая; это самый общий вид движения);
- б) круговые (траектория – окружность);
- в) прямолинейные (траектория – прямая).

Расстояние, пройденное точкой вдоль ее траектории, называется путем, а кратчайшее расстояние между начальным и конечным положением точки – перемещением. Путь – это скалярная величина, а перемещение – векторная. Путь вовсе не обязательно совпадает с перемещением. Например, при плавании 100 м в 50-метровом бассейне путь равен пройденной дистанции, а перемещение – нулю, ведь старт и финиш находятся в одном и том же месте.

Скоростью называется величина, измеряемая длиной пути, проходимого в единицу времени. Различают мгновенную и среднюю скорости. Мгновенная скорость – величина векторная (слово "мгновенная" обычно для краткости опускают). Сложение скоростей производится по правилу параллелограмма (векторно).

Если скорость изменяется по величине или направлению, говорят, что тело движется с ускорением. Ускорением называется векторная величина, равная изменению скорости в единицу времени. Слово "ускорение" в механике используют в более широком смысле, чем это делают в быту. В механике термин "ускорение" применяют не только, когда скорость увеличивается, но и тогда, когда она уменьшается или изменяет направление.

При криволинейном и, в частности, круговом движении скорость всегда направлена по касательной к траектории, а ускоре-

ние может быть разложено на две составляющие. Одна из них, направление которой совпадает с направлением скорости или противоположно ему, называется тангенциальным. Оно изменяет величину скорости. Вторая составляющая, изменяющая направление скорости, называется нормальным ускорением. Нормальное ускорение (при равномерном круговом движении направлено к оси вращения и перпендикулярно к направлению скорости. Оно называется центростремительным ускорением и численно равно

$$a_n = \frac{v^2}{R} \quad (I)$$

где v - скорость, R - радиус.

Перейдем к кинематике движения твердых тел. Движение тела называется поступательным, если прямая линия, соединяющая две любые точки тела, остается при движении все время параллельной своему начальному положению. Поступательное движение вовсе не обязательно должно быть прямолинейным. Оно может быть криволинейным или круговым. Например, тело человека, неподвижно сидящего в "колесе обозрения", движется поступательно по круговой траектории.

При поступательном движении тела все его точки движутся с одинаковыми скоростями и ускорениями. Поэтому в данном случае для описания движения тела достаточно знать, как движется какая-либо одна его точка.

Вращательным называется движение тела, при котором все его точки совершают круговые движения вокруг одной и той же оси (при круговом поступательном движении, о котором говорилось выше разные точки тела совершают движения по окружностям относительно разных осей). Точки, лежащие на самой оси вращения, в рассматриваемой системе отсчета остаются неподвижными. Перемещение вращающегося тела из одного положения в другое называется поворотом.

Вращение характеризуется угловой скоростью и угловым ускорением. Угловая скорость - это величина, измеряемая углом поворота за единицу времени. Угловое ускорение - это мера изменения угловой скорости в единицу времени.

Угловая и линейная скорости точки, участвующей в круговом движении, связаны между собой соотношением:

$$v = \omega \cdot r \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что линейная скорость (например, вилета молота при метаниях) увеличивается, когда возрастает угловая скорость и/или радиус вращения точки вращающегося тела, расположенные на разном расстоянии от оси вращения, имеют разные линейные скорости и ускорения, но их угловые скорости и ускорения одинаковы.

Угловые скорости и ускорения обладают свойствами векторов - они имеют величину и направление. Чтобы можно было с ними оперировать как с векторами, в частности изображать графики в виде направленного отрезка, условимся руководствоваться так называемым "правилом большого пальца правой руки" (его называют также правилом буравчика или правилом винта): если поворот происходит в сторону сгибания пальцев кисти, то большой палец, направленный вдоль оси вращения, указывает направление, в котором должен быть ориентирован вектор угловой скорости.

Угловые скорости и ускорения можно складывать и вычитать как векторы (по правилу параллелограмма). С угловыми перемещениями этого делать нельзя.

Движение может быть пространственным и плоским. Плоским (или плоскопараллельным) называется движение тела, при котором все его точки движутся параллельно какой-либо неподвижной плоскости. Все остальные движения называются пространственными. Любое плоское движение твердого тела можно рассматривать как сумму поступательного движения и поворота.

1.2. Сложные движения

Часто движение точки или тела рассматривают относительно двух систем отсчета. Одна из них условно считается неподвижной (ее называют абсолютной инерциальной или основной системой). Вторая движется по отношению к первой. Движение, совершаемое при этом точкой или телом, называется составным или сложным. Например, движение ноги при беге можно рассматривать как сложное: нога движется по отношению к туловищу (подвижной системе координат) и вместе с туловищем движется относительно дорожки (неподвижной системы координат). Введение подвижной системы координат позволяет разложить сложное движение на более простое. Например, точка на ободе велосипедного колеса движется по довольно сложной траектории. Использование подвижной системы координат, связанной с велосипедом, позволяет легко понять, что

это результат сложения двух движений: поступательного движения велосипедиста (подвижной системы координат) и вращательного движения колеса.

Движение, скорость и ускорения подвижной системы координат по отношению к неподвижной называются соответственно переносным движением, скоростью и ускорением. Движение, скорость и ускорение точки или тела по отношению к подвижным осям координат называются относительными, а по отношению к неподвижной абсолютными. Абсолютная скорость точки при сложном движении равна геометрической сумме относительной и переносной скоростей. С ускорением дело обстоит сложнее. При поступательном движении подвижной системы координат абсолютное ускорение точки также равно геометрической сумме относительного и переносного ускорения. Но, если движение подвижной системы отсчета является вращательным, абсолютное ускорение равно уже сумме не двух, а трех ускорений - переносного, относительного и так называемого ускорения Кориолиса, о котором будет рассказано в разделе 4.3.

В биомеханике часто используют подвижные системы координат, связанные с телом спортсмена (обычно с началом в центре масс тела). Такие системы именуются соматическими. Поступательное переносное движение соматической системы координат (а следовательно, и тела спортсмена в целом) называют переместительными движениями. Переместительные движения, выполняемые за счет собственных усилий человека (а не внешних источников энергии, скажем технических устройств), называются локомоторными движениями или локомоциями (от латинского *locus* - место, положение и *motion* - движение).

1.3. Связи и степени свободы

Тело, которое может перемещаться в любых направлениях, называется свободным. Примером может быть мяч, находящийся в воздухе. В большинстве случаев тела соприкасаются с другими телами, которые ограничивают их подвижность. Например, мяч, лежащий на площадке, не может двигаться вниз (провалиться сквозь пол). Тело, на движения которого наложены ограничения, называется несвободным. Сами ограничения называются связями. Связи могут ограничивать положения и/или скорости механической систе-

мы и (по предположению) сохраняются при любых, действующих на систему силах. Связи, которые ограничивают только положения (но не скорости) механической системы, называются геометрическими. Связи могут изменяться с течением времени. Связи, которые с течением времени не изменяются, называют стационарными.

Частным случаем нестационарных связей являются периодические связи. Например, при беге, когда нога ставится на землю, на стопу накладываются дополнительные связи, а когда стопа отрывается от опоры, эти связи снимаются. Если рассматривать только период опоры, связь можно считать стационарной. В лекции речь пойдет только о геометрических стационарных связях и для краткости будем называть их просто "связями".

Силы, действующие на механическую систему со стороны тел, осуществляющих связи, называются реакциями связей. Например, при отталкивании на спортсмена действует сила со стороны опоры. Это реакция связи (в данном случае ее называют реакцией опоры).

Степени свободы называются независимые движения, возможные для данной механической системы.

Свободная материальная точка имеет три степени свободы. Она может двигаться вдоль каждой из трех осей координат. Любое другое ее движение можно представить как сумму движения вдоль этих трех координатных осей. Свободное твердое тело имеет шесть степеней свободы. Оно может перемещаться относительно трех осей координат и совершать вращение относительно трех взаимно перпендикулярных осей. Любое движение твердого тела может быть представлено как результат этих шести движений. Если на систему наложены связи, число ее степеней свободы уменьшается.

Простейшей связью является твердая (недеформированная) поверхность. При движении тела по ней может возникать большее или меньшее трение. В идеальном случае трение равно нулю (поверхность идеально гладкая). Связи такого рода, когда деформации и трения нет, называются идеальными. Они полностью препятствуют движению в одних направлениях и совершенно не препятствуют перемещению в других.

2. ОПИСАНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ И ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА

2.1. место, ориентация и поза тела

Преподаватели физического воспитания и тренеры часто приходится описывать словами (объяснять, называть) положения тела

спортсмена при выполнении физических упражнений. Предположим дается указание: "принять положение лежа на спине руки вверх". Возможны два варианта выполнения этой команды. Какой из них является правильным? В первом случае занимающийся поднял руки вверх по отношению к земле, во втором - по отношению к собственному туловищу. Выражаясь более точно: они использовали разные системы координат. Согласно гимнастической терминологии (ее по традиции применяют не только в гимнастике, но и в других видах спорта), положения частей тела описываются по отношению к туловищу так, как это понял ученик в первом случае. Но в некоторых видах этого не придерживаются, и тогда команда может быть понята по-иному, как во втором случае.

Но, если даже самая простая команда может быть понята по-разному, как же обеспечить действительно точное описание движений, в особенности при их научном анализе, в учебной литературе и т.п.? Для этого надо применять способы их описания, принятые в механике.

В биомеханике положение тела характеризуется тремя основными признаками: местом, ориентацией и позой. Кроме того, для удобства указывается еще отношение к опору (вис, упор, безопорное положение и т.п.). Место тела характеризует, в какой части пространства (где именно - в какой части стадиона, зала) находится в данный момент человек. Ориентация тела отражает его поворот относительно неподвижной системы координат (вниз головой, горизонтальное и т.п.). Поза тела - это взаимное расположение звеньев тела относительно друг друга. Движения спортсмена включают в себя изменение места, ориентации и позы тела.

Если тело спортсмена моделируется точкой, то его положение определяется только местом. Когда используют модель твердого тела (это можно делать, если спортсмен не меняет позу), описание положения включает указание места и ориентации. Если спортсмена рассматривают как систему тел, надо указывать их взаимное расположение, т.е. позу тела.

Место тела и его ориентация могут быть описаны только по отношению к другому телу, выбранному в качестве тела отсчета. В спортивной биомеханике обычно в качестве тела отсчета выбирается Земля или другие тела, с нею неподвижно связанные (стены зала, например). Подвижные относительно земли тела отсчета используются сравнительно редко (примером может служить академи-

ческая лодка, если место гребца определяют относительно нее, а не по отношению к берегу).

2.2. Определение места тела

Для указания места тела надо либо мысленно заменить его точкой, либо указать на нем точку, положение которой затем будет определяться. В этом случае задача сводится к определению положения точки. При биомеханическом анализе в качестве такой точки часто выбирают центр масс тела спортсмена.

Существуют два основных способа указания положения точки в пространстве: естественный и координатный. Естественный применяют, когда траектория точки известна. В этом случае для указания ее положения достаточно указать расстояние от тела отсчета. Например, для определения места бегуна на 400 м достаточно указать пройденный им к данному моменту времени отрезок дистанции.

Для точного указания положения точки используют координатный способ. Наиболее широко применяется прямоугольная декартова система координат.

Положение в выбранной системе координат можно указать двумя способами:

а) модулем и направлением радиус-вектора, проведенного из начала координат в эту точку;

б) проекциями точки на оси координат.

Оба этих способа равноправны.

Если основное направление движения спортсмена постоянно, то одну из осей координат удобно выбрать таким образом, чтобы она совпадала с этим направлением. Такую ось называют генеральной (или продольной) осью, а скорость вдоль генеральной оси — полезной скоростью. Например, когда конькобежец бежит по прямой, его тело перемещается не только вперед, но и влево-вправо. Лишь составляющая скорости вдоль основного направления движения (генеральной оси) является полезной. Горизонтальную ось, перпендикулярную продольной, называют поперечной.

2.3. Определение ориентации тела

Для описания ориентации тела с ним надо связать две подвижные системы координат, имеющие начало в одной точке. Направление одной из них все время остается постоянным (таким, как у неподвижной системы), ориентация второй (соматической системы) изменяется так же, как меняется ориентация самого тела.

Рассмотрим сначала ситуацию, когда поза тела не меняется и соответствует основной стойке. В этом случае в соматической системе координат различают три основные плоскости и оси. Плоскость, разделяющая тело на левую и правую части, называется сагиттальной; делящая его на переднюю и заднюю части - фронтальной, а на верхнюю и нижнюю части - трансверсальной. Оси, являющиеся на пересечении указанных плоскостей, называются соответственно сагиттальной, фронтальной и краниокаудальной. Если эти плоскости и оси проходят через центр масс тела, их именуют центральными, в других случаях - периферическими. Например, при выполнении больших оборотов вперед или назад на перекладине гимнаст выполняет вращение относительно периферической фронтальной оси, проходящей в районе хвата кистями.

При изменении ориентации тела спортсмена в пространстве направления связанных с телом сагиттальной, фронтальной и краниокаудальной осей могут по-разному соотноситься с направлениями неподвижной системы координат. Например, плавание происходит в основном вдоль продольной краниокаудальной оси (слово "продольной" относится к абсолютной системе координат, а "краниокаудальной" - к соматической). Приставные шаги в сторону выполняются по продольной фронтальной оси. Сальто назад делается относительно поперечной фронтальной оси, сальто боком ("арабское") - относительно поперечной сагиттальной оси, вращения в фигурном катании - вокруг вертикальной краниокаудальной оси.

При выполнении сложных элементов в гимнастике, акробатике, прыжках в воду спортсмен может одновременно поворачиваться вокруг нескольких осей. Например, при выполнении сальто назад прогнувшись с поворотом на 360° ("сальто с пируэтом") происходит одновременное вращение относительно горизонтальной оси, постоянно ориентированной в пространстве (поворот "по сальто") и краниокаудальной оси, изменяющей свое положение в простран-

ве при выполнении сальто (поворот "по пируэту").

Вообще для ориентации тела в пространстве надо указать три угла. Обычно это так называемые углы Эйлера¹⁾. Выбор этих углов подчиняется определенным правилам. Один из таких углов (он называется углом процессии) образуется поворотом относительно неподвижной оси. В примере с "сальто с пируэтом" это горизонтальная ось, относительно которой отсчитывается поворот "по сальто". Другой угол (собственного вращения) характеризует поворот вокруг оси, связанной с телом. В приведенном примере - это поворот "по пируэту". Третий угол (нутации) образуется поворотом вокруг так называемой линии узлов - линии пересечения плоскостей двух систем координат, связанных с телом: неподвижной ориентированной и соматической.

Когда поза спортсмена меняется, связать с его телом соматическую систему координат может быть сложно. Как, например, провести сагиттальную плоскость, если спортсмен выполнил поворот туловища в сторону?

В подобных случаях соматическую систему координат обычно вводят следующим образом: тело спортсмена (в стойке руки вверх) делят горизонтальной плоскостью на две равные по весу половины. Линия, соединяющая центры масс верхней и нижней половины тела (она проходит и через общий центр масс тела), образует краниокаудальную ось. Другие две оси перпендикулярны ей и начинаются в ОЦМ. Сагиттальную направляют параллельно плоскости симметрии таза, а фронтальную - перпендикулярно к ней.

Таким образом, чтобы определить место и ориентацию тела спортсмена в пространстве, надо указать три координаты места и три угла Эйлера. Для этого следует ввести три системы координат:

1. Неподвижную (инерциальную), относительно которой определяют место тела.
2. Подвижную, направления осей которой совпадают с направлениями осей неподвижной системы и остаются при движении постоянными.
3. Подвижную (соматическую), имеющую общее начало со второй системой, но изменяющую свое положение в пространстве при изменении ориентации тела. Ориентация тела при этом характеризуется углами Эйлера между осями подвижных систем координат.

¹⁾ Д. Эйлер (1707-1783) - великий математик и механик. Член Петербургской академии наук. Долгие годы жил и работал в России.

2.4. Определение позы тела

Позой тела, как уже отмечалось, называется взаимное расположение его частей. В физкультурно-спортивной практике позу обычно характеризуют лишь описательно. Например, при выполнении сальто (в гимнастике, акробатике, прыжках в воду) спортсмен может принимать одну из трех поз: прогнувшись, согнувшись либо в группировке. При биомеханическом анализе движений человека часто возникает необходимость точно определить положение каждого звена. Для этого указывают углы его наклона в одной из следующих трех систем координат: 1) в абсолютной (инерциальной), 2) соматической (связанной с телом), 3) в системе координат, связанной с соседним звеном (например, положение предплечья характеризуют углом между кистью и плечом — такие углы называют межзвеньевыми или суставными).

В третьем случае в биомеханических исследованиях обычно используют так называемые углы Кардана¹⁾ (их называют также углами Браунта) — в этой лекции мы не будем объяснять, как они вводятся. Поскольку звеньев тела много и положение каждого из них характеризуется тремя углами, то полное описание позы тела является довольно громоздким.

Много раз предпринимались попытки ввести специальные системы записи поз и движений (подобные нотной записи музыки). Такая запись движений называется кинетографией. Кинетографические системы, претендующие на запись всех возможных движений, очень сложны — их надо осваивать несколько лет. Но в ряде видов спорта разработаны довольно простые и удобные системы для записи поз и движений, типичных для этого вида.

3. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРЫ. ДВИЖЕНИЯ В СУСТАВАХ

3.1. Кинематические пары

Кинематической (или биокинематической) парой называются два смежных звена тела с соединяющим их суставом. Двигательный аппарат человека состоит из кинематических пар.

Если одно из звеньев пары условно принять за неподвижное, то второе имеет по отношению к нему определенное количество

¹⁾ Кардан (правильнее Кардано) Дж. (1501-1576) — итальянский математик, философ и врач.

степеней свободы. Вообще говоря, если измерять возможное перемещение подвижных звеньев с очень большой точностью (до долей миллиметра), то каждое из них имеет шесть степеней свободы. Такие измерения бывают полезными в медицинской практике. Они характеризуют степень "разболтанности" сустава, что является признаком определенных заболеваний. Однако при анализе спортивной техники мы можем ограничиться лишь вращательными движениями, происходящими в суставах.

Все суставы относятся к системам с одной, двумя или тремя степенями свободы в зависимости от того, сколько независимых поворотов звена они допускают. Например, в суставах пальцев возможно только сгибание и разгибание - это суставы с одной степенью свободы. Плечевой сустав является примером сочленения с тремя степенями свободы - здесь возможны три типа движения: относительно фронтальной оси - сгибание и разгибание, относительно сагиттальной оси - отведение и приведение и относительно продольной оси звена - пронация и супинация.

Иногда указывает не число степеней свободы в суставе, а так называемый класс кинематической пары, равный числу наложенных связей, т.е. разности

$6 - \text{число степеней свободы}$.

Например, сустав с двумя степенями свободы соответствует паре четвертого класса: $6 - 2 = 4$.

Не следует смешивать число степеней свободы сустава и кинематической пары. Число степеней свободы кинематической пары больше числа степеней свободы сустава на шесть: одно из звеньев может занимать любое положение в пространстве, а движение второго ограничено связями. Число степеней свободы кинематической пары можно определить по выражению: $I2 - i$, где i - класс кинематической пары, а число $I2$ равно числу степеней свободы двух свободных тел (звеньев пары).

3.2. Движения в суставах

При более детальном анализе движений, происходящих в суставах, оказывается, что их только приближенно можно считать вращениями. Напомним, что вращательным называется круговое движение всех точек тела относительно одной и той же оси. При движениях в суставах оси вращения, как правило, не остаются посто-

яниями. Поворот происходит относительно мгновенной оси, меняющей свое положение при изменении суставного угла. При анализе спортивной техники такое небольшое смещение оси вращения, как правило, особого значения не имеет и им пренебрегают, рассматривая все движения в суставах как вращательные. Но, если речь идет о функционировании самого сустава, таким смещением мгновенных осей вращения пренебрегать нельзя. Во-первых, при этом изменяются условия работы мышц, окружающих сустав, ввиду изменения их плеч силы. Во-вторых, изменение мгновенной оси вращения меняет нагрузку, приходящуюся на суставную поверхность.

Есть два основных типа движения одной суставной поверхности (выпуклой) относительно другой (вогнутой): качение и скольжение. При качении мгновенная ось вращения находится в точке, лежащей на границе сочленяющихся поверхностей. При повороте эта точка меняет свое положение, оставаясь все время общей для обеих поверхностей (выпуклая головка кости катится по вогнутой примерно так, как катилось бы колесо). При скольжении же одна суставная поверхность скользит относительно другой подобно тому, как движется поверхность вращающегося вала в подшипнике скольжения. При этом мгновенная ось вращения находится на некотором расстоянии (радиусе вращения) от суставной поверхности. Если бы выпуклая суставная поверхность была бы дугой окружности (точнее, поверхности кругового цилиндра), то ось вращения при скользящем движении суставных поверхностей должна была бы оставаться постоянной. Но, поскольку суставные поверхности имеют сложные геометрические формы, то для обеспечения беспрепятственного скольжения положение мгновенной оси вращения должно меняться в строгом соответствии с изменением формы суставной поверхности. В большинстве случаев именно так и происходит. Но иногда в результате травм, возрастного износа тканей или других причин движение в суставе начинает происходить относительно "неправильной" мгновенной оси. Тогда возникают дополнительные нагрузки, разрушающие суставные поверхности. Дополнительные нагрузки возникают и тогда, когда нарушается конгруэнтность (геометрическое совпадение) суставных поверхностей.

Как частный случай движения в суставе выделяет также так называемое кручение, при котором ось вращения проходит через выпуклую и вогнутую поверхность двух костей, образующих сустав (поэтому на этих поверхностях есть неподвижные соприкасающиеся

точки, не меняющие своего положения при повороте звена). Кручением является, например, сгибание в тазобедренном и плечевом суставах.

Максимально возможная подвижность в суставе (размах движений) определяется разницей дуг суставных поверхностей.

3.3. Определение осей вращения. Биомеханические длины звеньев тела

Если положение мгновенной оси вращения в суставе надо определить с очень большой точностью (до миллиметра), для этого приходится использовать довольно сложные методы, например, делать рентгеновские снимки при разном положении подвижного звена. Но при изучении спортивной техники такая точность обычно не нужна и положение осей вращения в суставах определяют приближенно, пренебрегая их смещением при повороте звена.

Ориентирами при этом служат определенные антропометрические точки (костные выступы), через которые проводят от руки секущие плоскости, проходящие через ось вращения. Это делается при отведенном в сторону положении звена тела. Плоскости и проекции осей отмечаются карандашом на коже.

При биомеханическом анализе техники часто нужны сведения о длинах сегментов тела. В антропологии длина звена тела определяется как кратчайшее расстояние между определенными антропометрическими точками. В биомеханике под длиной сегмента понимается кратчайшее расстояние между осями вращения суставов (биомеханическая длина сегмента). Антропометрические и биомеханические длины звеньев обычно не совпадают. Если оси вращения в суставах определены, то можно, конечно, измерить биомеханическую длину сегмента как расстояние между ними. Другой путь состоит в том, что измеряются антропометрические длины каждого из звеньев и затем, умножая их величины на специальные коэффициенты, находят биомеханические длины. Еще более грубый способ заключается в определении биомеханических длин по уравнениям регрессии на основе лишь известных значений длины тела, рук и ног. Число необходимых измерений при этом снижается, но точность становится хуже.

4. ДВИЖЕНИЯ В КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

4.1. Кинематические цепи

Объединение нескольких кинематических пар называется кинематической (или блокинематической) цепью. Типичной кинематической цепью является, например, рука или нога. Цепи делятся на открытые (незамкнутые) и замкнутые. В незамкнутых кинематических цепях конечное звено свободно, оно соединено только с соседним звеном. В таких цепях движения в каждом из суставов не зависят от движений в других сочленениях.

Число степеней свободы открытой кинематической цепи подсчитывается по-разному, в зависимости от того, предполагаются ли свободными оба конечных звена цепи или только одно. Во втором случае число степеней свободы открытой цепи равно сумме числа степеней свободы в суставах. Например, если считать туловище фиксированным, то рука (плечо, предплечье и кисть) имеет относительно него семь степеней свободы: три в плечевом суставе и по две в локтевом и лучезапястном. Если же считать туловище свободным телом, то число степеней свободы увеличивается еще на шесть. Легко видеть, что оба подхода отличаются лишь тем, в какой системе координат подсчитывается число степеней свободы: в абсолютной системе координат число степеней свободы на шесть больше, чем в соматической (с началом координат в центре вращения первого сустава кинематической цепи). Тринадцать степеней свободы руки (в абсолютной системе координат) позволяют ей сохранять определенную подвижность, когда кисть и плечевой сустав не меняют своего положения, т.е. на каждое из них положено по шесть связей. Можно убедиться в этом, скажем, положив кисть на стол: плечо и предплечье сохраняют при этом некоторую возможность двигаться.

Если учитывать движения и в суставах пальцев, то рука имеет (в абсолютной системе координат) 30 степеней свободы. Это обеспечивает ей исключительно большую подвижность.

Как открытую кинематическую цепь можно рассматривать и все тело в целом. Подсчеты показывают, что общее число степеней свободы тела человека достигает 244 (при этом подвижных костей в теле 148, суставов с тремя степенями свободы 29, с двумя степенями свободы 33, с одной 85). В технике нет в настоящее время машин со столь большим количеством степеней свободы (у современных роботов их число не превышает 7-9).

В замкнутой кинематической цепи последнего свободного звена нет. Примером замкнутой цепи могут быть соединения ребер с позвоночником и грудиной. Цепи могут быть замкнуты на себя (пример, левая рука у боксера, которую он держит на поясе) или через снаряд, либо опору (например, нижние конечности и таз при двуопорном положении). Замкнутая цепь при ее расчленении в каком-либо месте превращается в открытую. Обратное превращение открытой цепи в замкнутую равносильно наложению на нее дополнительных связей, что приводит к снижению числа степеней свободы. Это выражается, в частности, в том, что в замкнутой цепи становятся невозможными изолированные движения в одном из суставов. Движение в одном суставе вызывает движения и в других. Поэтому возможные варианты движений резко ограничиваются. Рассмотрим, например, движения ноги велосипедиста при педалировании. Если считать движение плоским, то нога имеет всего три степени свободы: в сагиттальной плоскости, в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах. Закрепление стопы на педали равносильно наложению на нее двух связей: теперь движения стопы вверх-вниз и вперед-назад могут проходить только по вполне определенной траектории - окружности. Поэтому нога сохраняет только одну степень свободы и варианты техники педалирования (с точки зрения кинематики) очень ограничены: велосипедист либо может сохранять положение стопы в пространстве постоянным ("носковый" вариант техники), либо активно работать стопой при вращении педалей ("пяточный" вариант педалирования).

Другой пример. Тело гребца при парной академической гребле представляет собой замкнутую кинематическую цепь, на которую наложены связи в четырех местах: в месте опоры ногами, на подвижном сидении и в месте хвата каждого из весел. Если считать движение плоским и пренебречь вариантами движения рукоятки весла (выше-ниже, с большим или меньшим разворотом лопасти), то тело в этом случае при гребке имеет только три степени свободы: разгибание ног, разгибание туловища и сгибание рук. Эти движения могут по-разному сочетаться во времени между собой. В связи с этим возникает различие стили гребли.

О двух видах кинематических цепей в биомеханике приходится говорить особенно часто. Это кинематические цепи верхних и нижних конечностей. Введем понятие о биомеханической длине конечности. Полной биомеханической длиной нижней (верхней) конеч-

ности называется наибольшее расстояние от оси вращения в тазобедренном (плечевом) суставе до максимально удаленной точки этой конечности (например, до кончика пальца). Неполная биомеханическая длина конечности - это расстояние от оси вращения в тазобедренном (плечевом) суставе до оси вращения в голеностопном (лучезапястном) суставе. Движение, приводящее к уменьшению биомеханической длины конечности, называется ее сгибанием, а приводящее к увеличению длины - разгибанием или выпрямлением. Сгибание и разгибание конечности не обязательно означают, что при этом происходит одновременное движение во всех суставах конечности. Например, при сгибании рук в упоре лежа происходит разгибание в плечевых и сгибание в локтевых суставах.

Если мысленно соединить тазобедренный (локтевой) и голеностопный (лучезапястный) суставы прямой линией, то можно видеть, что при многих движениях ориентация этой линии в пространстве меняется. Соответствующие движения называют поворотом ноги (руки). Например, отталкивание в прыжках в длину включает в себя сгибание-разгибание и поворот ноги.

4.2. Сложение скоростей в кинематических цепях

Поскольку все движения в суставах вращательные, то в кинематических цепях происходит сложение вращений¹⁾.

Ограничимся рассмотрением плоских движений. Движение звена тела можно рассматривать как в абсолютной системе координат (поворот звена в пространстве), так и в системе координат, связанной со смежным звеном тела (как изменение межзвенного угла). Если с одним из звеньев кинематической пары связать подвижную систему координат, поворот этого звена в пространстве можно рассматривать как переносное движение, а поворот второго звена относительно первого, приводящий к изменению межзвенного угла, как движение относительное, поворот того же (второго) звена в абсолютной системе координат - как его абсолютное движение.

В механике известна следующая теорема: угловая скорость абсолютного движения равна алгебраической сумме скорости переносного и относительного движений. Если переносной и относительный повороты происходят в одном направлении, то их угловые

¹⁾ Разумеется, сложение вращений происходит не только в двигательном аппарате человека. Мы только рассматриваем этот общий вопрос кинематики на примере кинематических цепей.

скорости складываются, а, если в противоположных, то вычитаются. Например, если гимнаст, выполняющий большой оборот назад на перекладине, произведет сгибание в тазобедренных суставах, т.е. поворот ног в ту же сторону, что и вращение всего тела, то угловая скорость ног будет равна сумме угловых скоростей вращения тела вокруг перекладины и сгибания в тазобедренных суставах.

Когда оба звена кинематической пары движутся в одной плоскости, скорость изменения суставного угла (межзвенная угловая скорость) равна разности угловых скоростей поворота этих звеньев (с учетом направления их движения) в абсолютной системе координат:

$$\omega_{(1,2)} = \omega_1 - \omega_2 \quad (3)$$

Если угловая скорость первого звена больше угловой скорости второго, угол в суставе увеличивается, если меньше — уменьшается. При равных угловых скоростях звеньев одной кинематической пары суставной угол остается постоянным. В частном случае, когда угловые скорости переносного и относительного движения равны по величине и противоположны по направлению, абсолютная угловая скорость тела равна нулю — оно движется поступательно. Этот случай называется парой вращений. Например, можно так pedalировать на велосипеде, что педаль будет двигаться по окружности, не поворачиваясь. Шатун при этом вращается вперед, а педаль относительно него с той же скоростью назад. Эти два вращения вычитаются друг из друга и ориентация педали в пространстве остается постоянной.

В многозвенных кинематических цепях происходит сложение угловых скоростей всех звеньев, входящих в цепь.

В спортивных движениях довольно часто наблюдается случай, когда стопа находится на опоре, а туловище движется поступательно (опорные периоды в беге, ходьбе, передвижении на коньках и т.п.). При этом во всех суставах опорной ноги происходят вращательные движения, которые, суммируясь, приводят к поступательному движению туловища. Это происходит потому, что алгебраическая сумма их угловых скоростей равна нулю. Требование равенства этой сумме нулю равносильно наложению связей на угловые скорости в отдельных суставах кинематической цепи. Это означает,

что если угловая скорость в одном из суставов задана (или известна), то скорости в других суставах не могут быть какими угодно: они должны соответствовать известной межзвенной скорости. Ограничения при этом накладываются и на величины межзвенных углов. Например, если конькобежец не хочет изменять угол наклона туловища к горизонту, при отталкивании угол в коленном суставе всегда будет однозначно связан с суммой углов в голеностопном и тазобедренном суставах.

Зависимость между изменениями межзвенных углов в разных суставах одной кинематической цепи приводит к тому, что эта цепь функционирует как единое целое: движение в одном из суставов определяет движение в остальных. Подобное содружественное, сочетанное движение в разных суставах называют синергией (или кинематической синергией). С точки зрения механики существование синергии равносильно наложению дополнительных связей на систему (движение может происходить только так, а не иначе). Принципиальная разница, однако, состоит в том, что в данном случае нет никаких материальных объектов, которые препятствовали бы выполнить движение по-иному (вспомните пример с мячом, летящим на полу — там движению мяча вниз препятствует пол). В случае произвольных движений накладываемые связи являются элементом координации движений, осуществляемой центральной нервной системой. (Н.А.Бернштейн даже писал, что координация движений это преодоление избыточных степеней свободы двигательного аппарата. — Как вы понимаете эту фразу?).

Для описания движений при наличии синергии используют также заимствованное из механики понятие о механизме. Механизмом называется совокупность тел (звеньев), подвижно соединенных таким образом, что движение одного из звеньев приводит к движению остальных. Как механизм можно, например, рассматривать замкнутую кинематическую цепь. Приведенный пример с отталкиванием конькобежца показывает, что и движения открытых кинематических цепей при наличии синергии могут отличаться свойствами механизма. Однако в данном случае накладываемые связи вызваны не действием внешних материальных объектов, а определяются произвольной координацией движений (ведь ничто не мешает конькобежцу во время отталкивания выпрямиться — тогда строгой зависимости между углами в суставах нижней конечности не будет; он сам не желает этого делать, чтобы не ухудшить спортивный результат).

Чтобы подчеркнуть своеобразие таких механизмов в движениях человека, их часто называют биомеханизмами.

4.3. Ускорения в кинематических цепях

Если угловые скорости вращений при движениях в кинематических парах и цепях просто алгебраически складываются, то с ускорениями сложнее. Когда звено кинематической цепи поворачивается относительно оси, которая сама движется по окружности, возникает поворотное ускорение или, как его чаще называют, ускорение Кориолиса.¹⁾

Рассмотрим, например, движение стоп гимнаста, который выполняет большой оборот на перекладине, согнулся в тазобедренных суставах. Для простоты будем считать, что оба поворота - и тела гимнаста относительно перекладины, и ног относительно туловища - происходят с постоянными угловыми скоростями. Тогда стопы испытывают следующие ускорения:

а) центростремительное ускорение за счет поворота тела вокруг перекладины (ускорение переносного движения);

б) центростремительное ускорение за счет сгибания ног в тазобедренных суставах - ускорение относительного движения (оба этих ускорения, как вы знаете, направлены к осям вращения и изменяют только направление скорости);

в) ускорение Кориолиса, которое при описанном движении возникает из-за того, что стопы приблизились к перекладине и движутся теперь по другому радиусу, чем прежде. При этом их линейные скорости изменились как по величине, так и по направлению. Изменение скорости и означает, что тело двигалось с ускорением.

Ускорение Кориолиса возникает всегда, когда тело движется во вращающейся системе отсчета. Из-за поворота этой системы направление и величина скорости тела в абсолютной системе отсчета меняются.

Ускорение Кориолиса численно равно

$$a_k = 2 \omega_1 \cdot \omega_{(1,2)} \cdot r, \quad (4)$$

где ω_1 - угловая скорость переносного движения (в приведенном выше примере - оборота на перекладине), $\omega_{1,2}$ - угловая скорость относительного движения (в примере выше - мекзвен-

¹⁾ По имени французского ученого Г. Кориолиса (1792-1843).

ная угловая скорость сгибания в тазобедренных суставах),

r - радиус вращения точки в подвижной системе координат (в примере - расстояние от тазобедренных суставов до стоп). В случае, когда переносное движение представляет собой вращение, ускорение Кориолиса всегда направлено вдоль продольной оси звена, совершающего относительное движение. Если вращения в переносном и относительном движении совершаются в одну и ту же сторону, ускорение Кориолиса направлено к оси вращений; при разнонаправленном движении звеньев - от оси.

5. СЛОЖЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО И ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЙ

В механике известна теорема (так называемая теорема Шалля), согласно которой любое движение твердого тела сводится в каждый момент времени к двум простым движениям: поступательному и вращательному вокруг оси. Отдельные точки тела участвуют одновременно в этих двух движениях. Их линейные скорости, создаваемые поступательным и вращательным движением, складываются обычным образом - по правилу параллелограмма. В частности, если линейные скорости какой-либо точки тела, создаваемые поступательным и вращательным движением, равны по величине и противоположны по направлению, то они вычитаются и эта точка в данный момент неподвижна. Такую точку называют мгновенным центром скоростей. Движение тела в данный момент времени можно рассматривать как "чистое" вращение относительно этого мгновенного центра (мгновенного центра вращения, если рассматривается плоское движение, и мгновенной оси вращения, когда изучается движение в пространстве).

Посмотрим на примере, как образуется мгновенная ось вращения. Когда гимнаст выполняет сальто прогнувшись, стопы перемещаются быстрее других звеньев, так как скорости их поступательного движения и вращения складываются. Голова же и плечи движутся в сторону, противоположную поступательному движению, и поэтому теряют скорость. В этот момент сторонний наблюдатель видит, что тело гимнаста вращается вокруг относительно неподвижной оси, проходящей в области плеч или головы, т.е. видит мгновенную ось вращения. Поскольку такое выполнение сальто судьями расценивается как правильное, то некоторые тренерч,

не знающие биомеханики, требуют от своих учеников, чтобы те, находясь в воздухе, "перевели ось вращения к плечам". Это безграмотное требование - выполнять такое указание нельзя. Но можно сделать другое: предложить спортсмену так изменить горизонтальную составляющую скорости поступательного движения (т.е. оттолкнуться больше или меньше назад), чтобы эта горизонтальная скорость соответствовала скорости вращения. Тогда можно подобрать соотношение скорости вращения и горизонтальной скорости, при котором сальто будет выполняться с мгновенной осью вращения "в районе головы", т.е. так, как хочет тренер.

ГРО
2002

2002/1/2

КИНЕМАТИКА ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА

Лекция для студентов ГЦОЛИФКа

Редактор Н.Свечникова.

Корректор Н.Ушакова.

Подписано к печати 11.02.91.

Объем 1,3 уч.-изд.л.

Тираж 350 экз.

Заказ 160

Издание Редакционно-издательского отдела ГЦОЛИФКа

Участок ротавинной печати ГЦОЛИФКа.

Москва, Сиреневый бульвар, 4.