

УДК 531/534: [57+61]

## **ИЗМЕРЕНИЕ ПОВОРОТА ПРЕДПЛЕЧЬЯ С ПОМОЩЬЮ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ДИСКОВОГО УСТРОЙСТВА**

**А. Рахикайнен**

Department of Biology of Physical Activity, University of Jyväskylä, FI-40014, 12 Seminaarinmaki, Jyväskylä, Finland, e-mail: ahti.rahikainen@hut.fi

Кафедра биологических аспектов физического воспитания, Университет г. Йювяскюля, Финляндия

**Аннотация.** В работе представлена новая система для анализа движения объекта с помощью фотосъемки, запатентованной в США А. Рахикайненом [6, 7]. Принцип действия метода заключается в фотографировании движущегося объекта посредством вращающегося диска с одним прозрачным и несколькими затемненными фильтрующими окошками, служащими в качестве оптических затворов. Необходимо провести серию снимков за равные промежутки времени. Далее, по полученным фотографиям (которые представляют собой набор изображений объекта с траекториями световых маркеров, прикрепленных к некоторым точкам тела, видимыми как прерывистые световые линии) можно измерить траектории движения точек при движении. Данный метод был использован для анализа поворота предплечья вверх и вниз. Данная работа продолжает предыдущие исследования по изучению движения руки [8]. В статье представлена теоретическая модель поворота руки под действием постоянной максимальной силы, результаты которой сравнивались с экспериментами по повороту предплечья вверх и вниз. Кривая по теоретической модели хорошо совпала с экспериментальной. В заключение отметим, что модель Хилла [1] может применяться для моделирования действия постоянной мощности.

**Ключевые слова:** фотография, вращающийся диск, фотоаппарат, система анализа движения человека.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Движущийся объект фотографируется с помощью устройства с вращающимся диском (рис. 1, 2) [6, 7]. На рис. 3, 4 представлены фотографии, полученные по данной методике. Поскольку диск вращается впереди объектива фотоаппарата, то в результате фотосъемки число кадров равняется числу раз, когда положение прозрачного окна 5 (см. рис. 2) совпадало с оптической осью линзы камеры. Полученные изображения характеризуют движение объекта от одного положения к другому. Свет, излучаемый световыми маркерами [прикрепленными к движущемуся объекту], проникает через фильтровые окошки 7 (см. рис. 1), и на получаемом изображении фиксируются световые траектории этих точек. Поскольку движущийся объект излучает свет, фон должен быть темным, чтобы поглощать падающий окружающий свет. Данный метод отображает походку человека как серию последовательных изображений, на которых траектории световых маркеров показаны как светлые линии. Эти световые линии связывают серию последовательных изображений таким образом, что между двумя последовательными изображениями находится равное количество светлых линий. Этот способ эффективен при полностью интегрированной системе анализа человеческого движения. Фотосъемка движения является удачной только при конкретном освещении

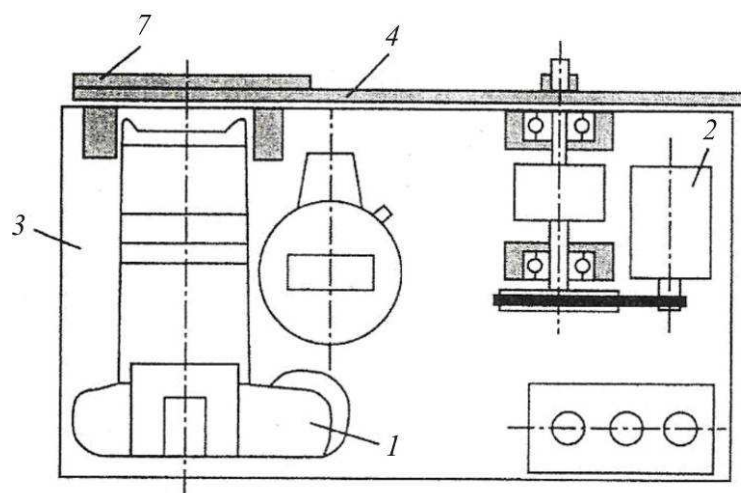


Рис. 1. Схема прибора, используемого для фотографирования: вращающийся диск 4 с фильтровыми окошками 7 перед камерой 1

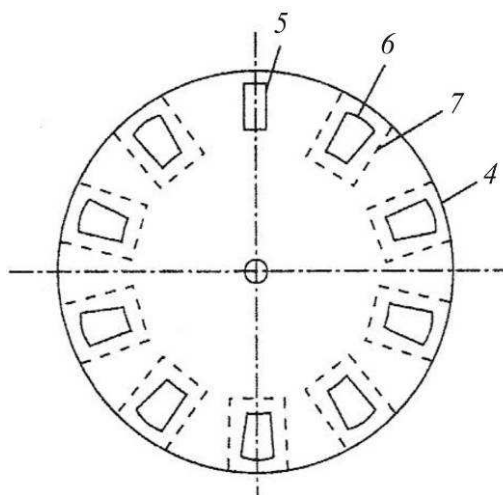


Рис. 2. Диск с одним прозрачным 5 и девятью фильтровыми окошками 6

и требует тщательного соблюдения всех условий эксперимента. Скорость вращения диска должна быть подобрана так, чтобы отдельное изображение в серии последовательных снимков было отчетливым, а направление движения и фазы были различимы. Если на полученной фотографии изображения сильно перекрывают друг друга, то их трудно идентифицировать и понять что-либо из них. Оптимальное количество последовательных изображений объекта на одной фотографии составляет от двух до четырех.

В этом случае изображения достаточно отчетливо выделены, так что и изображения, и прерывистые светлые линии формируют четкую картину движения. Правильно выбранное освещение также является важным условием для удачной съемки. Фон должен быть достаточно темным. Если фон светлый, то вся область фотографии становится видимой на изображении при первом кадре и фотографии не перекрывают друг друга. Одежда человека влияет на исход фотографии. Обнаженные ноги и руки хорошо видимы, в то время как остальные части тела могут быть сделаны прозрачными с помощью темной одежды. Фотографии на рис. 3 и 4 были выполнены при искусственном освещении лампой с парами натрия. Вращающийся диск, который использовался, приведен на рис. 2. Скорость вращения диска составляла 150 об/мин  $150/60 \text{ с}^{-1} = 2,5 \text{ с}^{-1}$ . Поскольку одно изображение создается за один оборот диска, то интервал времени, соответствующий промежутку между двумя последовательными

изображениями,  $1/2,5 \text{ с}^{-1} = 0,4 \text{ с}^{-1}$ . Светлые линии между двумя последовательными изображениями разделены на 10 частей, и временной интервал  $\Delta t$  (время измерения) равен  $0,4/10 = 0,04 \text{ с}$ . Расстояния измерены согласно правилам измерения пешеходной дорожки. Линии на пешеходной дорожке расположены на расстоянии 0,5 м друг от друга. Расстояние от камеры до предмета 5 м. На одежде закреплены два световых маркера на обеих руках, один световой маркер в середине тела и два световых маркера на обеих ногах. Линии на пешеходной дорожке расположены на расстоянии 0,5 м друг от друга. На рис. 3 человек прыгает на одной ноге, а на рис. 4 – на двух ногах. Центр масс человека совершает определенный тип колебательного движения. При движении центра масс в воздухе можно достичь большей длины прыжка за счёт быстрого вращения рук. В то же время толчковая нога смещается вперёд.



Рис. 3. Человек прыгает на одной ноге



Рис. 4. Человек прыгает на двух ногах

## МЕТОД

### Измерение поворота предплечья

На рис. 5 показано вращение предплечья вниз. Скорость вращения диска, выполняющего роль створки, равна 300 оборотов в минуту. В этом случае можно получить  $300/60 = 5$  изображений человека в секунду, и они будут следовать друг за другом через  $1/5 = 0,2$  с. Между двумя изображениями человека находится девять светлых линий, и в этом случае светлые линии располагаются в интервале 0,02 с друг от друга. Уравнение угловой скорости вращения предплечья имеет вид

$$\dot{\phi} = \frac{\Delta s}{R \Delta t}, \quad (1)$$

где  $\Delta s$  – расстояние между двумя последовательными линиями,  $\Delta t$  – время вращения, соответствующее расстоянию  $\Delta s$ ,  $R$  – длина предплечья.

### Модель вращения руки

Новая модель движения руки была разработана в работе [8]. Предыдущая работа относилась к разделу мышечной механики, который является актуальным разделом биомеханики [1–4, 5, 9]. Данная новая модель основана на предположении, что существует максимальное значение силы  $P$ , равной максимально возможной мощности мышцы, которая может быть создана в пределах определенного диапазона скоростей. Следовательно, механическое поведение мышцы определяется не общим значением силы, вычисленной как представлено в вышеуказанных ссылках, а постоянным значением мощности в пределах определенного диапазона скоростей.

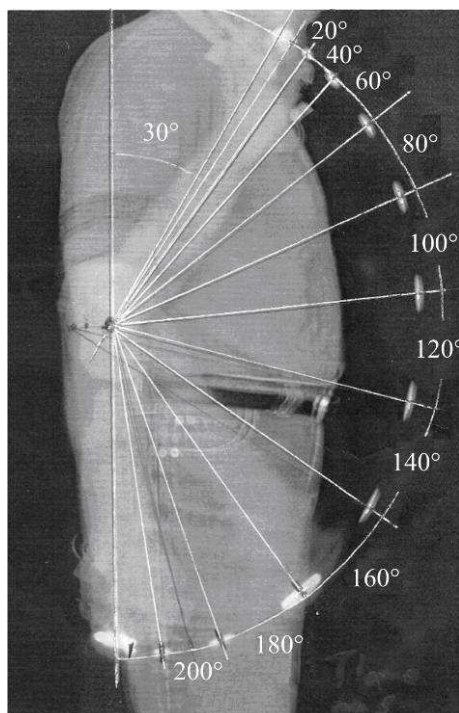


Рис. 5. Поворот предплечья вниз с максимальной силой. Угол вращения  $\phi$  и соответствующее ему время  $t$  (мс) можно увидеть на изображении человека. Время поворота предплечья  $\Delta t$ , соответствующее расстоянию  $\Delta s$  между двумя ближайшими светлыми линиями, равно 0,02 с

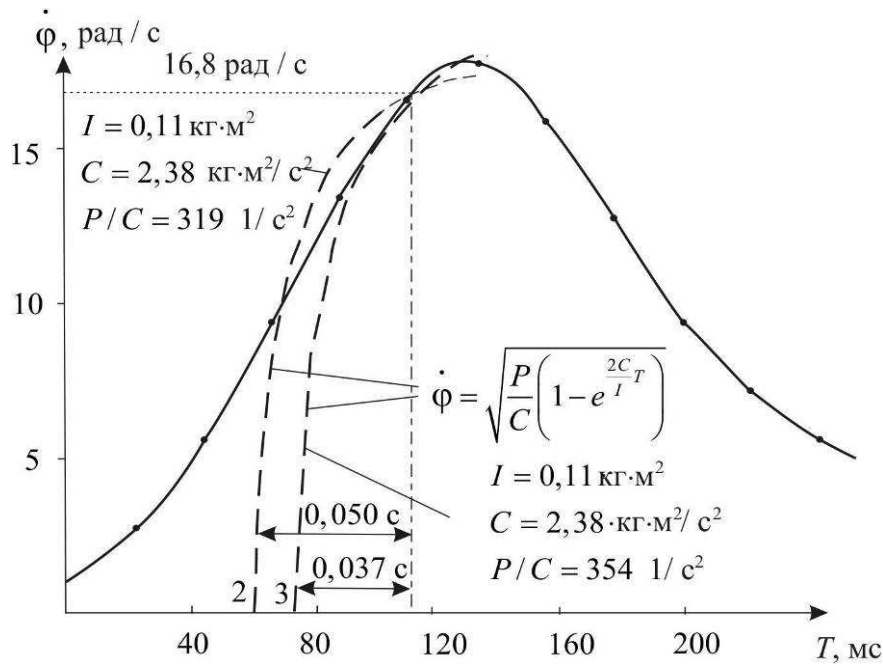


Рис. 6. Диапазон соответствия измеренной и теоретической функций скорости при вращении предплечья вниз. Нулевая точка времени для теоретической кривой угловой скорости находится на пересечении оси времени и штриховой линии

**Определение соответствующего диапазона между экспериментальной и теоретической кривой угловой скорости**

На рис. 6 показано сравнение экспериментальной и теоретической кривых (А8) (прил. 1) угловой скорости для нахождения соответствующего диапазона. Измеренные значения угловой скорости показаны как точки на кривой для угловой скорости.

Пункт 1. Начальная точка на кривой для скорости была выбрана в пределах соответствующего диапазона ( $\dot{\phi} = 16,8 \text{ рад/с}$ ).

Пункт 2. Нулевая точка отсчета по оси времени для теоретической функции скорости была взята при значении 0,05 с от начальной точки ( $\dot{\phi} = 16,8 \text{ рад/с}$ ,  $T = 110 \text{ мс}$ ). Был вычислен момент инерции ( $I = 0,11 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ) (прил. 2); коэффициент трения известен из предыдущих измерений ( $C = 2,38 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}^2$ ). Отношение мощности к коэффициенту трения

$$\frac{P}{C} = \frac{\dot{\phi}^2}{1 - e^{-\frac{2C}{I}T}}, \tag{13}$$

в котором  $\dot{\phi} = 16,8 \text{ рад/с}$  и  $T = 0,05 \text{ с}$ . Согласно этому отношению было вычислено:  $P/C = 319 \text{ 1/с}^2$ , и теоретическая угловая скорость была построена между точками 1 и 2.

Пункт 3. Видно, что нулевая точка функции для теоретической скорости должна быть меньше. После нескольких итераций нулевая точка была получена ( $T = 0,037 \text{ с}$ ). Точная теоретическая функция угловой скорости была построена между точками 1 и 3.

**РЕЗУЛЬТАТЫ**

Измеренные значения угла, угловой скорости и углового ускорения при повороте предплечья (см. рис. 5) представлены в табл. 1. Угловые ускорения были вычислены при помощи дифференцирования кривой угловой скорости. Углы были вычислены при добавлении приращений угла. Таким образом, общая сумма всех приращений соответствует углу, который непосредственно измеряется на фотографии.

Значения зависимостей «угловая скорость–время», приведенные в табл. 2, построены на рис. 7 (точки на кривой  $A-E$ ). Теоретическая функция угловой скорости (A8) (прил. 1) была аппроксимирована к экспериментальной кривой угловой скорости и времени. Момент инерции предплечья был вычислен ( $I = 0,11 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ) (прил. 2) Величина коэффициента трения  $C$  и отношение мощности к коэффициенту трения  $P/C$  были получены при аппроксимации кривых,  $C = 2,38 \text{ кг м/с}^2$  и  $P/C = 285 \text{ 1/с}^2$ . На участке  $A-B$  происходит движение при постоянном ускорении; на участке  $B-C$  начинает влиять вязкое трение, и ускорение уменьшается; на участке  $C-D$  движение происходит при постоянной мощности; на участке  $D-E$  происходит остановка движения. Теоретическая кривая угловой скорости отмечена как штриховая линия, которая совпадает с экспериментальной кривой на отрезке  $C-D$  (см. рис. 7).

На рис. 9 и 11 показаны зависимости угловой скорости от времени, приведенные в табл. 2. Теоретическая кривая, построенная по формуле (A8) (прил. 1), была аппроксимирована к экспериментальной кривой. Момент инерции поворота предплечья был вычислен ( $I = 0,11 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ) (табл. 3) (прил. 2). Значения коэффициента трения  $C$  и отношения мощности к коэффициенту трения  $P/C$  были получены при аппроксимации кривых для вращения предплечья вниз ( $C = 2,38 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2$ ,  $P/C = 250 \text{ 1/с}^2$ ) и вращения предплечья вверх ( $C = 2,38 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2$ ,  $P/C = 275 \text{ 1/с}^2$ ). На участке  $A-B$  происходит движение при постоянном ускорении; на участке  $B-C$  начинает влиять вязкое трение, и ускорение уменьшается; на участке  $C-D$  движение происходит при постоянной мощности; на участке  $D-E$  происходит остановка движения. Теоретическая кривая угловой скорости отмечена как штриховая линия, которая совпадает с экспериментальной кривой на отрезке  $C-D$ . На рис. 10 показаны результаты вращения двух предплечий вверх. На рис. 12 показано вращение предплечья вниз и вверх.

### Результаты измерений и модель Хилла

В исследовании показано, что теоретическая модель постоянного максимального значения мощности хорошо согласуется с экспериментальными данными. Уравнение Хилла [1] также описывает модель с постоянной мощностью. В этом отношении модель Хилла схожа с моделью, предложенной в данном исследовании. Зависимость для силы и скорости Хилла была получена в ходе экспериментов, в которых скорость сокращения мышцы сопоставлялась с определенным постоянным значением силы. Уравнение Хилла  $(F + a)(v + b) = b(F_0 + a)$ , где  $F$  – сила,  $a$  – постоянная сила,  $v$  – скорость,  $b$  – постоянная скорость и  $F_0$  – постоянная сила. Поскольку векторы сил и скоростей являются сонаправленными, уравнение Хилла можно записать в скалярной форме. Левая половина уравнения Хилла представляет собой произведение силы и скорости – мощность. Поскольку правая половина уравнения является постоянной, то это показывает, что уравнение Хилла описывает модель с постоянной мощностью. Уравнение Хилла – одно из наиболее важных уравнений в биомеханике.

### Техника измерения

Данное исследование поворота предплечья требует измерений, сделанных с очень высокой точностью. Представленный метод данного исследования поворота предплечья удовлетворяет этому требованию; он точнее, чем большинство используемых методов. Измерение положения движущейся точки проводится обычными измерительными методами следующим образом: положение движущейся точки на кадре находится в положении  $A$ , а на следующем кадре – в положении  $B$ . Значения  $X_A$  и  $Y_A$  определяют положение  $A$ , и их соответствующими измерительными ошибками являются  $\Delta X_A$  и  $\Delta Y_A$ . Положению  $B$  подобным образом соответствуют  $X_B$  и

$YB$ , и их соответствующими измерительными ошибками являются  $\Delta XB$  и  $\Delta YB$ . Затем расстояние между положениями  $A$  и  $B$  может быть вычислено. Измерение расстояния  $A-B$  при помощи метода измерения в данном исследовании проводится на той же фотоплоскости, и, следовательно, здесь выполняется только одно измерение с соответствующей одной измерительной ошибкой. Следовательно, четырем измерительным ошибкам стандартного метода соответствует одна измерительная ошибка этой техники.

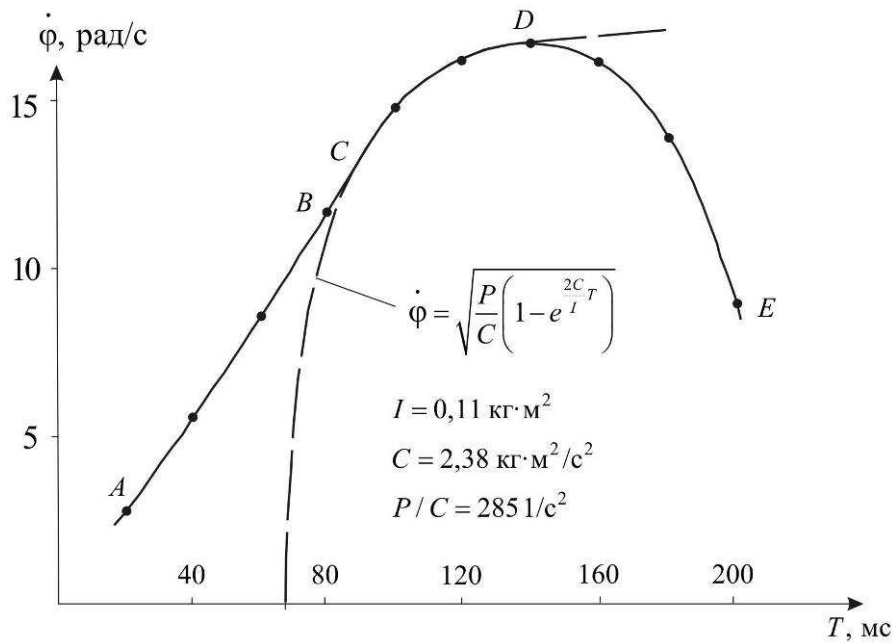


Рис. 7. Вращение предплечья вниз. Измеренные значения угловой скорости из рис. 5 отмечены как точки на кривой  $A-E$ , а теоретическая функция угловой скорости вычислялась с помощью (A8) и показана штриховой линией. Нулевая точка времени для теоретической кривой угловой скорости находится на пересечении оси времени и штриховой линии

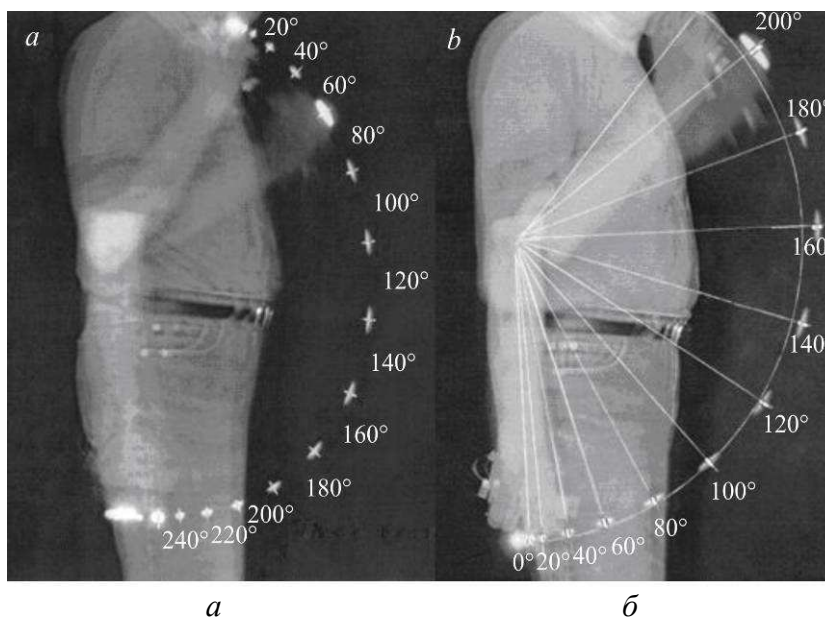


Рис. 8. Вращение предплечья вниз ( $a$ ) и вверх ( $б$ ). Человек среднего телосложения. Время вращения показано на изображении с временным интервалом 20 мс

Таблица 1

## Экспериментальные значения при вращении предплечья вниз (см. рис. 5)

Время $T$ , мс	$\Delta \phi$ , рад	$\phi = \sum \Delta \phi$ , рад	$\dot{\phi}$ , рад/с	$\ddot{\phi}$ , рад/с <sup>2</sup>
20	0,055	0,06	2,75	114
40	0,110	0,17	5,50	155
60	0,170	0,35	8,52	155
80	0,231	0,59	11,54	155
100	0,291	0,89	14,56	128
120	0,319	1,22	15,93	72,5
140	0,329	1,56	16,48	12
160	0,319	1,89	15,93	-56

Таблица 2

## Экспериментальные значения при вращении предплечья вниз (рис. 8) и вверх (рис. 9)

Вращение вниз ( $D3$ ) $R = 85$ , $\dot{\phi} = \frac{\Delta S}{R \Delta T}$ , $\Delta T = 20$ мс			Вращение вверх ( $D4$ ) $R = 99$ , $\dot{\phi} = \frac{\Delta S}{R \Delta T}$ , $\Delta T = 20$ мс		
Время вращения $T$ , мс	Приращение расстояния $\Delta S$	Угловая скорость $\dot{\phi}$ , рад/с	Время вращения $T$ , мс	Приращение расстояния $\Delta S$	Угловая скорость $\dot{\phi}$ , рад/с
0	3	1,8	20	4	2,02
20	7,5	4,4	40	9,2	4,14
40	12	7,1	60	13	6,67
60	17	10	80	18	9,09
80	21	12,4	100	23	11,62
100	24	14,1	120	27	13,64
120	26	15,3	140	30,5	15,4
140	25	14,7	160	32,5	16,41
160	22,5	13,2	180	32	16,16
180	18,5	10,9	200	31	15,66
200	13,5	7,9	220	24,5	12,37
220	10,5	6,2			
240	9,5	5,6			



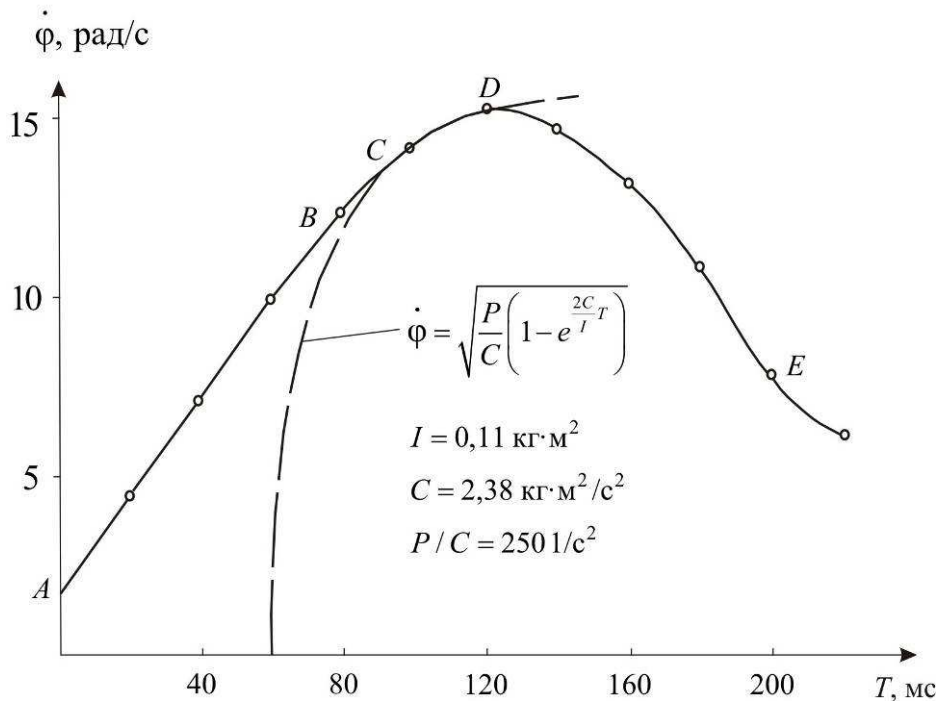


Рис. 9. Вращение предплечья вниз (см. рис. 8, а). Нулевая точка времени для теоретической кривой угловой скорости находится на пересечении оси времени и штриховой кривой. Экспериментальные значения угловой скорости взяты из табл. 2 и отмечены как точки на кривой А–Е, значения для теоретической кривой угловой скорости вычислены с помощью уравнения (А8) и показаны штриховой линией

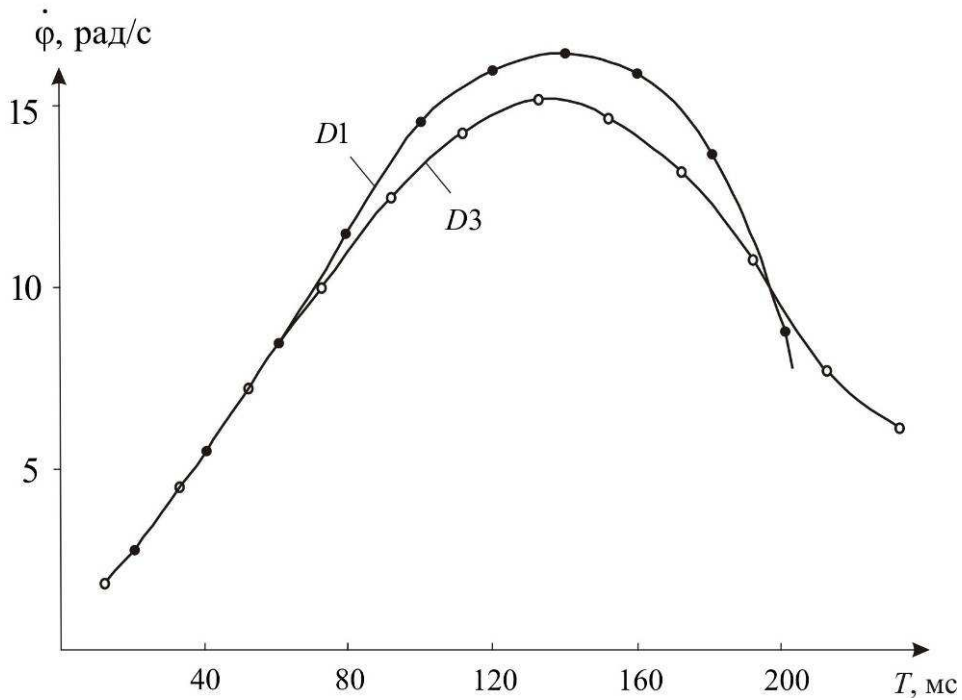


Рис. 10. Вращения предплечья вниз. D1 – вращение предплечья вниз при параметрах, взятых из табл. 1. D3 – вращение предплечья вниз при параметрах, взятых из табл. 2. На рисунке показано влияние отношения мощности к коэффициенту трения  $P/C$  при изменении угловой скорости. Вращение предплечья D1 вычислялось при  $P/C = 285 1/с$ , а вращение предплечья D3 – при  $P/C = 250 1/с$

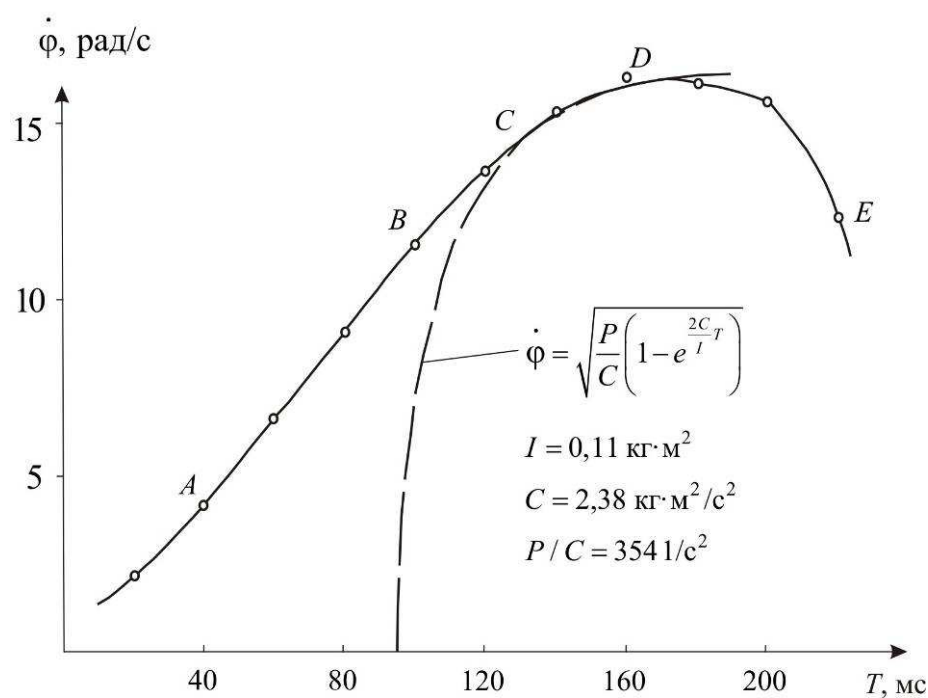


Рис. 11. Вращение предплечья вверх (см. рис. 8, б). Нуль времени для теоретической кривой находится на пересечении оси времени и штриховой кривой. Экспериментальные значения угловой скорости, взятые из табл. 2, отмечены как точки на кривой А–Е, значения для теоретической кривой угловой скорости вычислены с помощью уравнения (А8) и показаны штриховой линией

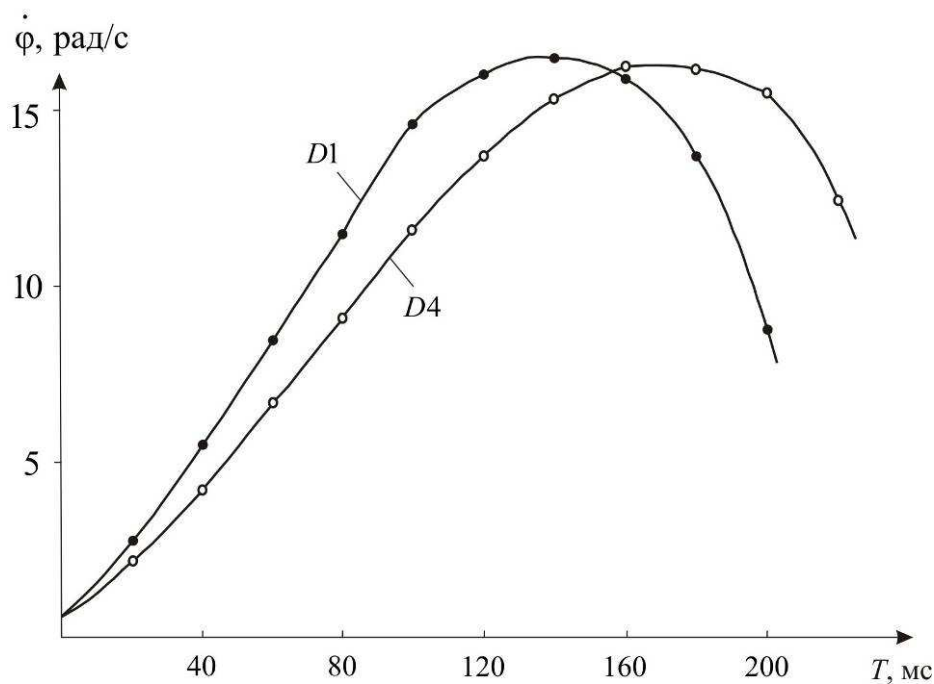


Рис. 12. Вращение предплечья вниз и вверх. D1 – вращение предплечья вниз при параметрах, взятых из табл. 1. D4 – вращение предплечья вверх при параметрах, взятых из табл. 2. На рисунке показано влияние вращающего усилия, действующего между точками А–В (см. рис. 7, 11), на изменение угловой скорости. Вращение предплечья вниз D1 имеет большее значение вращающего усилия, чем вращение предплечья вверх

На рис. 5 вращение предплечья происходит вниз. На изображении траектория была показана в виде окружности. Данная окружность показывает наименьшее движение локтевого сустава. Наблюдая вращательное движение предплечья, можно прийти к заключению, что движение локтя не оказывает влияния на определение скорости вращения. Она может быть вычислена при помощи (1) ( $\dot{\phi} = \Delta s / R \Delta T$ ), где  $\Delta s$  – приращение расстояния,  $R$  – радиус вращения и  $\Delta T$  – интервал времени. Приращение расстояния  $\Delta s$  может быть вычислено как дуга окружности. Рассмотренный случай является примером того, как данный новый метод измерения может быть применен для анализа сложных быстрых движений. С помощью системы анализа движений можно получить фотографии, которые дают общее наглядное представление о движении. Разные фазы и пути перемещений при движении могут быть представлены в более простом виде для измерения физических характеристик. При помощи этого приближения было преодолено неудовлетворительное общее представление сложного быстрого движения (типичный недостаток стандартных методов). Таким образом, этот метод является полезным дополнением к уже существующим методам. Техника устройства является простой и недорогой.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

#### Модель поворота руки

Уравнение движения

$$I \frac{d\dot{\phi}}{dT} = \frac{P}{\dot{\phi}} - C\dot{\phi}, \quad (A1)$$

где  $I$  – момент инерции при повороте руки,  $\dot{\phi}$  – угловая скорость,  $P$  – мощность, созданная мышцами руки,  $T$  – время,  $P/\dot{\phi}$  – момент, созданный силой мышцы,  $C\dot{\phi}$  – момент, созданный внутренним трением мышцы,  $C$  – коэффициент трения.

Уравнение мощности имеет следующий вид:

$$I\dot{\phi} \frac{d\dot{\phi}}{dT} = P - C\dot{\phi}^2, \quad (A2)$$

где  $I\dot{\phi} \frac{d\dot{\phi}}{dT}$  – мощность, затраченная при вращении руки,  $P$  – мощность, созданная мышцами руки,  $C\dot{\phi}^2$  – мощность, затраченная на трение.

Решение (A2):

$$I \frac{\dot{\phi}}{P - C\dot{\phi}^2} d\dot{\phi} = dT, \quad (A3)$$

$$-\frac{I}{2C} \int_0^{\dot{\phi}} -2C\dot{\phi} \frac{1}{P - C\dot{\phi}^2} d\dot{\phi} = \int_0^T dT, \quad (A4)$$

$$\ln(P - C\dot{\phi}^2) - \ln(P) = -\frac{2C}{I} T, \quad (A5)$$

$$\ln\left(\frac{P - C\dot{\phi}^2}{P}\right) = -\frac{2C}{I} T, \quad (A6)$$

$$1 - \frac{C}{P} \dot{\phi}^2 = e^{-\frac{2C}{I} T}, \quad (\text{A7})$$

$$\dot{\phi} = \sqrt{\frac{P}{C} \left( 1 - e^{-\frac{2C}{I} T} \right)}. \quad (\text{A8})$$

Влияние тяжести является незначительным при вращении предплечья при максимальном значении вращающего усилия. Следовательно, в данном анализе он не учитывался.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Вычисление момента инерции

Момент инерции имеет вид

$$I = \int r^2 dm, \quad (\text{B1})$$

где  $dm$  – вращающаяся масса,  $r$  – расстояние вращающейся массы от оси вращения.

Момент инерции вращающейся руки

$$I = \int_0^L r^2 dm = \int_0^L r^2 \frac{dm}{dr} dr = \frac{m}{L} \int_0^L r^2 dr = \frac{m L^2}{3}, \quad (\text{B2})$$

где  $m$  – масса вращающейся руки,  $L$  – длина вращающейся руки. Поскольку распределение массы в руке неоднородно, момент инерции дополнительной массы был вычислен по формуле

$$I = m r^2, \quad (\text{B3})$$

где  $m$  – приложенная масса сегмента руки,  $r$  – расстояние от этого сегмента до оси вращения.

### Момент инерции при вращении предплечья

Момент инерции при повороте предплечья для системы «рука+предплечье»

$$I_{k1} = \frac{m L^2}{3} = \frac{1,5 \cdot 0,384^2}{3} = 0,072 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Таблица 3

Инерциальные параметры сегментов руки

Участок руки	Расстояние от локтевого сустава	Длина участка руки	Масса участка руки
Рука		0,128 м	0,5 кг
Предплечье 1		0,128 м	0,5 кг
Предплечье 2 (дополнительная масса)		0,128 м	0,5 кг + 0,66 кг
Рука + предплечье (дополнительная масса)	0,064 м (0,5·0,128)	0,384 м (3·0,128)	1,5 кг (3·0,5) + + 0,66 кг
Световой маркер	0,384 м (3·0,128)		0,25 кг

Момент инерции дополнительной массы предплечья 2

$$I_{k_2} = m r^2 = 0,66 \cdot 0,064^2 = 0,002 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции светового маркера

$$I_p = 0,25 \cdot 0,38^2 = 0,0361 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Общий момент инерции при повороте предплечья  $0,072 + 0,003 + 0,0361 = 0,11 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hill A.V. The heat of shortening and the dynamic constants of muscle / Proc. Royal Soc. London. 126 (B). – 1938. – P. 136–195.
2. Hill A.V. First and last experiments in muscle mechanics / Cambridge University Press, Cambridge. – 1970.
3. MacIntosh B.R., Holash R.J. Power output and force velocity properties of muscle // Biomechanics and Biology of Movement. Human Kinetics. – 2000. – P. 193–210.
4. Nigg B.M., Herzog W. Force-velocity relation. Biomechanics of the Musculo-Skeletal System 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England. – 1999. – P. 173–180.
5. Raikova R.T. A model of the flexion–extension motion in the elbow joint – some problems concerning muscle forces modelling and computation // Journal of Biomechanics. – 1996. – Vol. 29, No. 6. – P. 763–772.
6. Rahikainen A. Method and apparatus for photographing a movement / United States Patent, Patent No. 4927261, 1990.
7. Rahikainen A. The use of rotating disc in the photography of movements // Russian Journal of Biomechanics. – 2003. – Vol. 7, No. 1. – P. 47–64.
8. Rahikainen A., Luhtanen P. A study of the effect of body rotation on the arm push in shot put // Russian Journal of Biomechanics. – 2004 – Vol. 8, No. 2. – P. 78–93.
9. Winter D.A. Biomechanics and motor control of human movement, 3rd ed / John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, New Jersey, 2004. – P. 215–222.

## MEASUREMENT OF FOREARM ROTATION WITH ROTATING DISC DEVICE

A. Rahikainen (Jyväskylä, Finland)

The paper presents a new system intended for photographic motion analysis of a moving subject. This device was established by US patent (A. Rahikainen, [6, 7]). The principle of the method is to photograph the moving subject through a rotating disc with one transparent and several filter openings serving as shutter apertures. It is necessary to perform a series of exposures made at equal time intervals. After that using obtained photographs (which are a series of images of the subject with the paths of spotlights attached to the moving subject seen as broken light-lines), one could measure the point motion paths. This measuring technique was used to study of forearm rotation upwards and downwards. The present study continues the earlier studies of arm movement [8]. The paper contains a theoretical model of arm rotation at constant maximum power. The results of comparison between model and experiments of forearm rotation upwards and downwards were fitted with success. In conclusion, it can be noticed that the Hill's model [1] may be adopted to simulate a constant power action.

**Key words:** photograph, rotating disc, camera, analysis system of human motion.

*Получено 20 марта 2010*