

КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ В ОПРЕДЕЛЕНИИ МАСС-ИНЕРЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕГМЕНТОВ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

В статье описывается компьютерная технология оценки погрешности в определении масс-инерционных характеристик сегментов тела человека на основе количественного сравнения истинных и расчетных антропометрических показателей.

Ключевые слова: биомеханическая система, сегменты, масс-инерционные характеристики, геометрия масс тела человека.

Проблема исследования и её связь с важнейшими научными заданиями. Педагогический анализ техники спортивных упражнений основывается, в большей степени, на материалах биомеханических исследований, и, в частности, на сведениях о геометрии масс тела человека, используемых в расчетных моделях анализа движений для получения количественной информации о кинематической и динамической структуре исследуемых упражнений [1-4]. Данные о геометрии масс тела спортсмена, его антропометрических показателях часто являются первейшими критериями для отбора занятий тем или иным видом спорта, а морфологический тип спортсмена является немаловажным фактором достижения высокого спортивного мастерства. Так, в работе [1] показано, что от конституциональных данных гимнаста зависит эффект двигательного действия. Например, при равной массе тела эффект безынерционного поворота в безопорном состоянии зависит от роста гимнаста: предпочтение отдается тем исполнителям у кого элементы масс тела больше "растянуты" по продольной оси биосистемы.

Для количественной оценки масс-инерционных характеристик (МИХ) сегментов тела человека используются различные методы, обладающие различной степенью погрешности. В рамках государственной программы Республики Беларусь "Конвергенция (3.5.04) подпрограммы "Междисциплинарные естественнонаучные исследования как база развития технологий будущего", мы предприняли попытку дать качественную и количественную оценки степени применения этих методов в биомеханических исследованиях.

Анализ последних исследований и публикаций показывает, что существующие в настоящее время методы оценки МИХ сегментов тела человека базируются на подходах, которые можно дифференцировать на следующие группы:

1. Группа среднестатистических методов.
2. Группа методов, основанных на использовании уравнений регрессии.
3. Экспериментально-аналитические методы.

Для количественной оценки МИХ сегментов тела спортсмена в биомеханических исследованиях наиболее широко используются первые две группы методов, обладающие различной погрешностью оценки. Третья группа методов, в настоящей статье нами не рассматривается, а для первых двух ниже будет дана качественная характеристика их применения.

Цель исследования – разработать компьютерную технологию определения погрешности МИХ сегментов тела человека с использованием различных методик их количественной оценки.

Задачи работы:

1. Дать качественную характеристику различным методикам определения масс-инерционных характеристик сегментов тела человека.
2. Разработать компьютерную программу определения погрешности расчета масс-инерционных характеристик сегментов тела человека.
3. Провести вычислительные эксперименты определения МИХ сегментов тела человека с использованием различных методик вычислений.

Результаты исследования

1. **Характеристика различных методик определения масс-инерционных характеристик сегментов тела человека** дана на основе анализа состояния исследований в данной области в республике и за рубежом. Как уже указывалось исходные материалы исследований (рис. 1) отечественных и зарубежных ученых, полученных в связи с использованием различных методов оценки геометрии масс тела человека, можно дифференцировать на две группы.

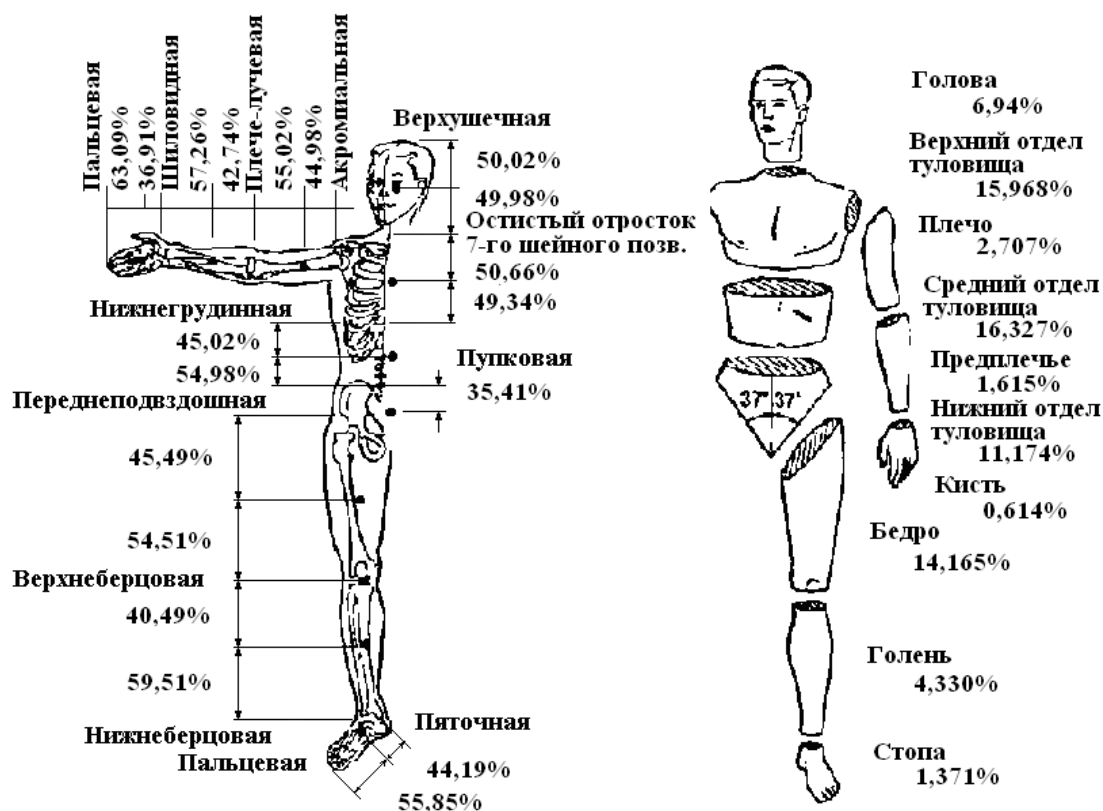


Рис. 1. Среднестатистические данные прижизненного определения масс-инерционных характеристик сегментов тела человека

В первой группе методов, первоначально использовались непосредственно среднестатистические оценки, полученные по материалам трупов [5]. Позднее были определены уточненные среднестатистические показатели масс сегмента тела человека и положение центра масс сегмента на его продольной оси, полученные в результате прижизненного определения с использованием радиоизотопной методики, разработанной профессором В.М. Зацiorским с соавторами [4].

Зная длину сегмента, по относительному расположению центра масс (ЦМ) сегмента на его продольной оси, выраженному в процентах, определяют координату ЦМ сегмента (табл. 1).

Таблица 1

Относительные (K_i) и весовые (C_i) коэффициенты для вычисления массы и координаты центра масс на продольной оси сегмента тела человека

№ п/п	Сегменты	Коэффициенты			
		Коэффициент массы (кг)		Коэффициент координаты центра масс (см)	
		K_i W. Braune, O Фишер [5]	K_i В.М.Зацiorский и др. [4]	C_i W. Braune, O Фишер [5]	C_i В.М.Зацiorский и др. [4]
1	Кисть	0,01	0,00614	0,50	0,3691
2	Предплечье	0,02	0,01625	0,42	0,4274
3	Плечо	0,03	0,02707	0,47	0,4498
4	Голова	0,07	0,06940	0,50	0,4998
5	Туловище (верхняя ч.)	-	0,15989	-	0,5066
6	Туловище (средняя ч.)	-	0,16327	-	0,4502
7	Туловище (нижняя ч.)	-	0,11174	-	0,4549
8	Туловище	0,43	0,43457	0,44	-
9	Бедро	0,12	0,14165	0,44	0,4549
10	Голень	0,05	0,04330	0,42	0,4049
11	Стопа	0,02	0,01371	0,44	0,4415

Массу сегмента определяют по весовому коэффициенту, представленному в процентном соотношении массы сегмента от массы тела испытуемого. Вычислительные формулы расчета массы и координаты центра масс (ЦМ) сегментов с использованием среднестатистических данных имеют вид

$$m_i = mK_i. \quad (1)$$

$$S_i = L_i C_i. \quad (2)$$

Здесь m_i – масса i -го сегмента, S_i – расстояние от антропометрической точки до ЦМ сегмента, m – масса тела испытуемого (кг), L_i – длина i -го сегмента. За антропометрические точки для отдельных сегментов принимаются:

1. Кисть – лучезапястный сустав.
2. Предплечье – локтевой сустав.
3. Плечо – плечевой сустав.
4. Голова – остистый отросток 7-го шейного позвонка.
5. Туловище (верхняя часть) – остистый отросток 7-го шейного позвонка.
6. Туловище (средняя часть) – нижнегрудинная.
7. Туловище (нижняя часть) – переднеподвздошная.
8. Бедро – переднеподвздошная (тазобедренный сустав).
9. Голень – верхнеберцовая (коленный сустав).
10. Стопа – пяточная.

Таким образом, для использования первой группы методов в биомеханических исследованиях необходимо знать:

1. Вес спортсмена, для расчета массы отдельных сегментов тела.
2. Длину отдельного сегмента, для расчета координаты его центра масс на продольной оси сегмента.

Здесь следует учесть, рассматриваемая методика не позволяет определить центральные моменты инерции сегментов относительно их фронтальной, сагиттальной и продольной осей. В то же время необходимо отметить возможность использования среднестатистических данных для расчета координаты ЦМ сегментов только в лабораторных условиях (необходимость измерения длин сегментов) и ограниченную возможность применения в соревновательных условиях, например для проведения видеосъемки упражнения без предварительного измерения длин сегментов.

Вторую группу данных составляют справочные сведения о коэффициентах, используемых в уравнениях регрессии для расчета МИХ сегментов тела человека [4] и непосредственно формульных выражений в уравнениях регрессии. Например, в таблице 2 приведены линейные и параболические уравнения регрессии, позволяющие по массе (x) тела вычислить массу сегментов (y) испытуемых. Еще раз следует отметить, что численные значения коэффициентов в формульных выражениях получены на основе радиоизотопного метода определения МИХ сегментов. По мнению авторов методики [4] погрешность определения МИХ не превышает 3%-5%.

Таблица 2

Регрессионные уравнения для вычисления массы (Y) отдельных сегментов по массе (x) тела человека

№ п/п	Сегмент	Регрессионное уравнение
1	Стопа	$Y = -0,440 + 0,0292x + 0,0001x^2$
2	Голень	$Y = 0,141 + 0,041x$
3	Бедро	$Y = -11,56 + 0,447x - 0,0019x^2$
4	Кисть	$Y = -0,109 + 0,0046x$
5	Предплечье	$Y = -0,165 + 0,0139x$
6	Плечо	$Y = -1,96 + 0,0786x + 0,0003x^2$
7	Голова	$Y = 2,13 + 0,0547x + 0,0002x^2$
8	Туловище (верхний отдел)	$Y = 2,614 + 0,0871x + 0,0004x^2$
9	Туловище (средний отдел)	$Y = 15,8 - 2,811x + 0,0031x^2$
10	Туловище (нижний отдел)	$Y = 6,96 - 0,0831x + 0,0013x^2$

Несомненно, что учет веса спортсмена повышает точность определения МИХ сегментов тела человека по сравнению с использованием среднестатистических показателей Фишера. Поэтому, можно предположить, что дополнительный учет еще одного изменяющегося антропометрического фактора, например, в виде роста спортсмена, позволит получить более точные данные МИХ сегментов. В таблице 3 приведены коэффициенты, позволяющие, на основании данных о росте и весе испытуемых, определить массу, координату центра масс на продольной оси и длину сегмента у женщин. Так как в уравнениях регрессии используются сведения о росте и весе испытуемого, то считается, что вычисленные по этой методике показатели более точны, чем с использованием среднестатистических данных.

Здесь весьма важным является то обстоятельство, что появляется возможность вычисления биомеханических длин сегментов тела на основе данных о росте и весе спортсмена. Несомненно, что в условиях отсутствия экспериментально зарегистрированных значений длин сегментов испытуемых это предоставляет более широкие перспективы в использовании рассматриваемых сведений (коэффициентов) в биомеханических исследованиях техники упражнений по материалам оптической регистрации движений.

Таблица 3

**Коэффициенты уравнений регрессии для расчета массы,
координаты центра масс на продольной оси и длины сегмента у женщин**

№ п/п	Сегменты	Коэффициенты массы сегмента (кг)			Коэффициенты координаты центра масс сегмента (см)			Коэффициенты длины сегмента (см)		
		$A_{0,i}$	$A_{1,i}$	$A_{2,i}$	$B_{0,i}$	$B_{1,i}$	$B_{2,i}$	$R_{0,i}$	$R_{1,i}$	$R_{2,i}$
1	Стопа	-1,207	-0,0175	0,0057	30,25	-0,103	0,200	1,60	-0,035	0,139
2	Голень	-0,436	-0,011	0,0238	41,94	-0,102	0,025	-1,81	-0,182	0,304
3	Бедро	5,185	0,183	-0,0420	50,90	-0,090	0,0072	-5,09	0,232	0,233
4	Кисть	-0,116	0,0017	0,0020	41,74	-0,120	0,172	8,78	-0,012	0,055
5	Предплечье	0,295	0,009	0,0003	61,40	0,096	-0,062	-14,54	-0,220	0,305
6	Плечо	0,206	0,0053	0,0066	44,96	0,034	0,051	-7,99	-0,239	0,279
7	Голова	2,388	-0,001	0,0150	21,50	0,181	-0,085	12,96	-0,191	0,138
8	Туловище (верхняя ч.)	-16,593	0,140	0,0995	34,50	0,012	0,084	-17,17	0,105	0,191
9	Туловище (средняя ч.)	-2,741	0,031	0,0560	36,68	0,025	0,037	9,86	-0,180	0,121
10	Туловище (нижняя ч.)	-4,908	0,124	0,0272	26,10	-0,020	0,056	0,10	0,124	0,098

Расчетные данные искомым показателей можно получить с использованием уравнений

$$m_i = A_{0,i} + A_{1,i} m + A_{2,i} H. \quad (3)$$

$$S_i = B_{0,i} + B_{1,i} m + B_{2,i} H. \quad (4)$$

$$L_i = R_{0,i} + R_{1,i} m + R_{2,i} H. \quad (5)$$

Здесь m – масса испытуемого (кг), H – длина тела испытуемого (рост – см), m_i – масса i -го сегмента, S_i – расстояние от антропометрической точки i -го сегмента до его центра масс, L_i – длина i -го сегмента, i – номер сегмента.

В уравнениях (3-5) учитываются индивидуальные антропометрические особенности испытуемых (рост, вес), что позволяет определить массу и координаты ЦМ сегмента с погрешностью от 3% до 5% [4].

2. Технология определения погрешности МИХ сегментов с использованием различных методик расчета масс-инерционных характеристик сегментов тела человека. Для оценки погрешности используемого метода в количественной оценке МИХ сегментов тела человека мы исходили из следующих предположений:

1) В качестве исходных данных росто-весовых значений спортсменов предпочтительно взять выборку, характеризующую антропометрические показатели испытуемых как среднестатистические. В этой связи в качестве исходных данных, например, для гимнасток мы использовали результаты исследований, опубликованные в работе [1]. В частности, эти сведения представлены в таблице 4.

2) При задании веса гимнасток и длины тела, входящих в качестве сомножителей коэффициентов слагаемых в уравнения регрессии, вычисленное по этим уравнениям значение, например, веса гимнастки, будет отличаться от исходного на определенную величину. Это отклонение можно выразить в процентах.

3) Процентное отклонение вычисленного значения от исходного (заданного) уровня и будет отражать погрешность используемого для вычислений метода. Продемонстрируем это на примере. Например, для первой категории гимнасток, введенное исходное значение веса составляло 43,0 кг, а рост – 155 см (рис. 2).

**Антропометрические показатели гимнасток разного класса
(по данным А.Л. Васильчук, Ю.К. Гавердовского, 1985)**

№ п/п	Категория гимнасток, выполняющих упражнение на оценку	Вес тела, кг	Длина тела, см	Длина рук, см	Длина ног, см
1	9,9-9,6 балла	43,0±1,43	155,0±1,30	50,0±0,70	75,0±1,10
2	9,5-9,2 балла	49,4±1,60	157,0±1,40	50,3±0,60	78,4±0,93
3	9,1-9,8 балла	55,8±0,46	159,50±0,31	50,8±0,17	80,7±0,22
4	На приблизительно равную оценку	45,5±1,45	152,89±1,54	50,5±0,70	72,25±1,44

Для восстановления экрана нормальных размеров щелкните по средней кнопке «развернуть» правого верхнего угла экрана формы

Введите данные о росте-весовых показателях спортсмена (модели)
Щелкните по любой ячейке таблицы, наберите значение, щелкните по **<Enter>**

	Рост (см)	Вес (кг)
Данные	155	43

Закончить ввод

Рис. 2. Операция ввода значения веса и роста гимнасток

Суммарная величина вычисленных значений веса сегментов (рис. 3) составила 42,8 кг или 99,61% от исходной величины.

	Длина	Координата ЦМ	Масса	Момент инерции
1. Кисть	0,168	1,081	000,534	0,00064
2. Предплечье	0,233	0,749	001,457	0,00438
3. Плечо	0,455	0,665	002,914	0,01273
4. Голова	0,261	0,161	004,670	0,02471
5. Верхн.часть Туловища	0,170	1,363	016,762	0,06021
6. Бедро	0,410	0,481	013,088	0,11689
7. Голень	0,375	0,414	005,560	0,05232
8. Стопа	0,216	0,568	002,152	0,00330
9. Средн.часть Туловища	0,209	0,435	007,272	0,03679
10. Нижн.часть Туловища	0,206	0,339	004,640	0,01814

ГИМНАСТКИ Рост - 155 см. Вес 43

Исходный вес 43,0 кг - 100%
Расчетный вес 42,8 кг - 99,6%
Расхождение - 0,39%

Рис. 3. Вычисленные значения МИХ сегментов гимнасток с использованием уравнений регрессии по росту и весу спортсменов

Таким образом, вычисленная величина веса тела гимнасток расходится с исходным заданным значением веса на 0,2 кг или на 0,39%. Расхождение незначительное и находится в пределах среднеквадратического отклонения выборки ($\pm 1,43$ кг, табл. 4). Следовательно, вычисление массы сегментов с использованием уравнений регрессии (3) и коэффициентов для массы сегментов (табл. 3), в данном случае является корректным и может быть использовано в биомеханических исследованиях, в которых требуется количественная оценка масс-инерционных характеристик опорно-двигательного аппарата тела спортсмена.

4) По вышерассмотренной технологии определяется степень погрешности и при использовании методик вычислений с использованием данных таблиц 1, 2.

3. Вычислительные эксперименты определения МИХ сегментов тела человека с использованием различных методик вычислений были проведены на материале антропометрических показателей гимнасток (табл. 4). Даже уже первичный анализ показывает, что не во всех случаях правомерно употребление данных

радиоизотопной методики определения МИХ сегментов тела человека с использованием уравнений регрессии с учетом веса и роста испытуемых. Например, результаты вычисления координаты ЦМ сегмента на его продольной оси (рис. 3) не соответствуют действительности и не могут быть использованы в дальнейших вычислительных процедурах. В этом случае целесообразно пользоваться среднестатистическими показателями МИХ сегментов человека.

Выводы

1. Разработана методика компьютерной оценки корректности использования различных методик в вычислительных процедурах определения масс-инерционных характеристик сегментов тела человека.

2. Использование конкретной методики вычислений МИХ сегментов испытуемых определяется расхождением между истинными и расчетными значениями антропометрических показателей. Для практического применения в конкретном случае используется тот из них, который дает наименьшее расхождение между расчетными и истинными данными.

3. Целесообразно продолжить исследования в данном направлении для определения границ применения конкретной методики определения МИХ сегментов тела человека соответственно исходным антропометрическим данным.

4. Для практического использования регрессионных уравнений МИХ сегментов тела человека в биомеханических исследованиях спортивной техники необходимо разработать методику определения МИХ туловища по данным МИХ верхней, средней и нижней частей туловища.

Использованные источники

1. Васильчук А.Л. Антропометрические показатели гимнасток высокой квалификации как фактор освоения упражнения / А.Л. Васильчук, Ю.К. Гаввердовский // Гимнастика: сб. статей. Вып. 1-й; сост. В.М. Смолевский. – М.: Физкультура и спорт, 1985. – С. 8–13.
2. Загrevский В.И. Построение оптимальной техники спортивных упражнений в вычислительном эксперименте на ПЭВМ: монография / В.И. Загrevский, Д.А. Лавшук, О.И. Загrevский. – Могилев: МГУ им. А.А.Кулешова, 2000. – 190 с.
3. Загrevский В.И. Математическое моделирование движений человека как инструмент оптимизации спортивной техники / В.И. Загrevский, Ю.В. Воронович, О.И. Загrevский, Д.А. Лавшук // Актуальные вопросы права, образования и психологии: сб. научн. трудов / М-во внутр. дел Респ. Беларусь, учреждение образования "Могилевский высший колледж Министерства внутренних дел Республики Беларусь"; редкол.: Ю.П. Шкаплеров (отв. ред) [и др.]. – Могилев: Могилев. высш. колледж МВД Респ. Беларусь, 2014. – С. 256–262.
4. Зациорский В.М. Биомеханика двигательного аппарата человека / В.М. Зациорский, А.С. Аруин, В.Н. Селуянов. – М.: ФиС, 1981. – 143 с.
5. Braune W. In: Abhandlunger der mathematischphysischen Class der Konigl Sachsischen Gesellschaft der Wissenschaften / W. Braune, O. Fisher. – 1889. – Bd. 26. – S. 561–672.

Zagrevsky V., Zagrevsky O.

COMPUTER TECHNOLOGY ASSESSMENT OF ERRORS IN DETERMINING MASS-INERTIAL CHARACTERISTICS SEGMENTS OF THE HUMAN BODY

The article describes the computer technology evaluation error in the determination of mass-inertial characteristics of human body segments based on a quantitative comparison of the true and calculated anthropometric parameters.

Key words: *biomechanical system, segments, mass-inertial characteristics, the geometry of the mass of the human body.*

Стаття надійшла до редакції 28.08.2014 р.