

儿童的惯性—惯量特征及其生长

李 愉

(中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044)

(英国利物浦大学人体解剖及细胞生物学系)

摘 要

本文应用排水法得到儿童肢体沿长轴的体积分布函数。根据关于人类肢体体积—质量的假定, 肢体的质心、转动惯量及旋转半径等动力学常数可由前述的体积分布函数中求出。本文结果显示, 部分力学参数与儿童的生长有着密切的联系, 并受到性别的影响。因此, 这些参数可以用来作为儿童的生长指标。以往数据的离散性表明, 无论从系统上或技术上, 这一领域都有许多工作要做。

关键词 儿童生长, 生物力学参数, 质心, 转动惯量

最早的有关人体四肢及躯干的质量、质心及转动惯量的系统研究可以追溯到 19 世纪末至本世纪初 (Harless, 1860; Meeh, 1895; Braune *et al.*, 1889; Fisher, 1906 等等)。于本世纪 30 年代, Bernstein *et al.* (1931) 和 Weinbach (1938) 分别指出了两个关于人体肢段重心 (质心) 的假设, 为后来的活体研究铺平了道路。前者假定人类肢体的质心与体积中心重合; 后者假定人体各肢段的横截面为椭圆形, 故其面积可以用简单的几何学公式计算出来。虽然这两个假设都与客观实际略有出入, 但由于活体直接测量的困难, 他们仍在人体生物力学参数的间接测量中, 得到了广泛的应用。

本文中, 人体生物力学参数主要指质心 (重心)、转动惯量和旋转半径。重心为相对于一个力学系统的一个点, 当系统内一个物体的全部质量都集中在该点时, 仍然保持其在外力作用下的力学性质。在本文, 质心与重心通用。转动惯量 (Moment of Inertia) 为一个物体抵抗转动加速度的性质, 其值与转动轴的选择有关。若转动轴穿过该物体的质心, 其转动惯量则被称为主转动惯量 (Principal Moment of Inertia)。假设一个具质量 m 的物体被均匀地分为两部分, 并将该两部假想为两个质量各为 $m/2$ 的颗粒。将两个 $m/2$ 沿某轴等距 p 置于质心两侧。如系统沿该轴的转动惯量恰好等于物体原来的转动惯量, 则此时颗粒至质心的距离 p 即被定义为旋转半径 (Radius of Gyration)。

与传统的人体测量项目相同, 人体惯性特征 (Inertial characteristics, 或生物力学参数, Biomechanical parameters) 既应用于体质人类学, 又应用于人体工程学的研究。从这种意义上来说, 人体惯性参数是传统测量项目由一维向高维的延伸。实际上, 迄今为止

的大多数这类研究应归于人体工程学 (Ergonomics) 的范畴。这包括在本领域里最重要的工作如 Dempster (1955), Clauser *et al.* (1969), Chandler *et al.* (1975)。这类工作主要以尸体为材料, 以选择性样本 (而非随机样本) 进行研究。Jensen (1987), Yokoi *et al.* (1985), Ackland *et al.* (1988) 测量了活体儿童的这些参数, 并以其作为青少年生长的指标。Li (1991), Li *et al.* (1993) 亦属于这一类的工作。Meeh (1895) 是这一领域的先行者, Zook (1932) 建立了第一个具有统计学意义的样本。不过, 这二者只选择了肢体体积作为研究指标。质量、质心的引入是最近 10 年的事。

以往的研究者已经在人体惯性-惯量特征的测量方面做了大量的工作。但是, 所得数据能用于青少年生长研究的并不多。虽然, Jensen (1978, 1987), Ackland *et al.* (1988) 着眼于青少年, 但他们的研究结果受小样本含量所限, 不能提供一幅清晰的生长图示。90 年代之前, Yokoi *et al.* (1985) 在这一方面是唯一的。他们的研究对象包括 93 名男性及 91 名女性青少年, 年龄分布于 5—15 岁。但作者在文章中没有任何技术参数、测量误差等数据。加之过于简略的统计方法, 降低了该工作的价值。

本研究应用 Bernstein *et al.* (1931), Bernstein (1967) 的假设, 以测量得到的肢体体积中心作为质心 (或重心) 的估计值。测量方法则采用经改进的 Drillis and Contini's (1966) 的排水法, 力图揭示惯性-惯量特征在不同年龄、性别组间的变化, 并以这些特征反映人体生长的形态学规律。

1 材料与 方法

数据的采集在利物浦市的 3 所学校进行。被测者均为高加索人种, 年龄分布见表 1。

表 1 研究样本的性别年龄分布
Sample size of each sex-age group

肢段\ 年龄	8	9	10	11	12	13	14	15	16	总计
上肢 男	9	32	27	19	16	23	5	7	2	140
上肢 女	12	33	28	14	11	16	10	11	5	140
小腿 男	4	13	9	12	13	23	5	7	2	88
小腿 女	5	9	10	8	10	15	8	8	4	77
小腿 男	3	10	8	10	7	12	-	-	-	50
小腿 女	5	9	9	5	9	11	-	-	-	48

采用排水法测定四肢体积沿其各自长轴的分布。测量装置仿照 Drillis 和 Contini (1966) 并加以改进, 使测量速度提高并更适于测量儿童。装置如图 1 所示, 包括两个有机玻璃筒。筒 A 用于容纳被测肢体, 被肢体排出的水流入筒 B。筒 B 与一个细管 (C) 在底部相联使两者的水面等高。一个水漂 (J) 与一只笔 (D) 被置于管 C。一块坐标板 (E) 可在滑轨 (F) 上移动。另外, 还有一个滑轮组, 将被测者肢体与坐标板连接起来。

测量时, 将被测者的肢体送入筒 A 中, 筒 A 中的水即被排入筒 B, 使管 C 的水位升高, 浮起记录笔 D。同时, 固定于被测肢体末端的细绳将坐标板 E 移动。如此, 一条曲

线即可记录于板 E 上。曲线的横坐标为肢体长度，纵坐标为其体积。曲线的形状决定于当肢体沉入水中时，其排水量的多少。

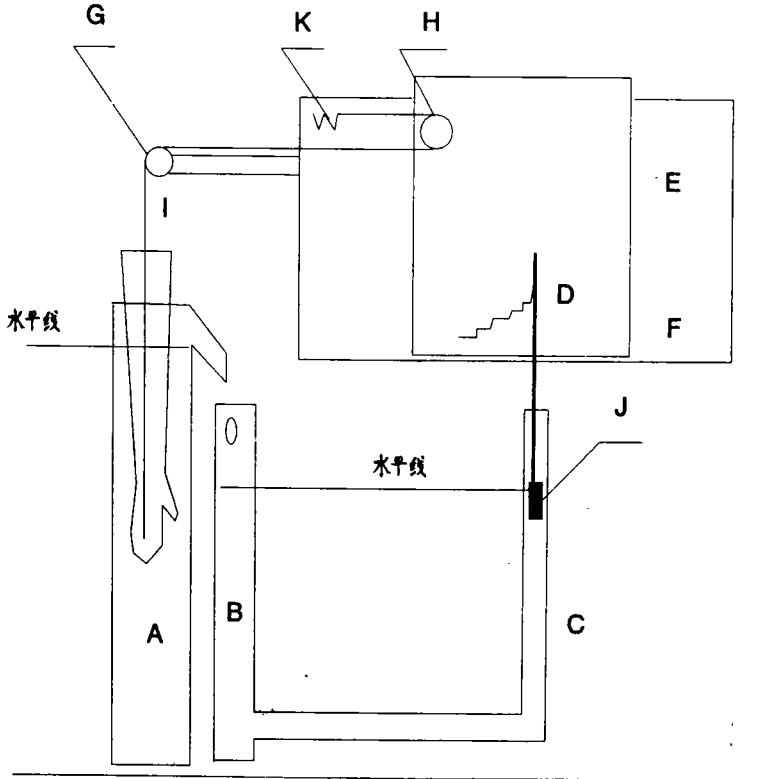


图 1 体积分布的测量装置

Apparatus for measuring the volume distribution

由于手的体积过小，上述装置的精度不足以准确记录其体积分布。因此，用一个有机玻璃盒及一个小量筒来测量手的体积分布。用一个较大的容器用来测量小腿（替代筒 A），大腿的测量则采用 Weinback (1938) 的方法，由于技术限制，足部未列入测量项目。

计算质心或重心（沿肢体长轴）的公式为：

$$CG = \frac{\sum_{i=1}^n z_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

这里， Z_i 为一个垂直于长轴的假想肢段切片 i 到该肢段远端的距离； V_i 为该切片的体积。 n 为切片的数量。实际测量中， n 的值一般为 8—12。上式所得实际上为体积中心而非重心。但根据 Bernstein (1931) 的假设，体积中心与重心重合。

一个细小物体的转动惯量为：

$$d(MI) = \rho^2 dm$$

这里， $d(MI)$ 为一具有质量 dm 的细小物体的转动惯量， ρ 为该物体到转动轴的距离。如此，一个半径为 r ，厚度为 $\delta_i = dz$ 的垂直于 OZ 轴的圆盘关于 OX 轴的转动惯量为：

$$MI_i = 4\delta_i \int_0^{\sqrt{r^2-y^2}} \int_0^r (z^2+y^2) D_i dydx = \pi\delta_i (\frac{1}{4} r_i^4 + r_i^2 y_i^2) D_i$$

这里, D_i 为质量密度。如果肢体的一个垂直于其长轴的切片被认为一个圆片 (据 Chandler *et al.* 1975, 这一假设与实际情况极为接近), 则该肢段关于质心的转动惯量为:

$$PMI = \pi \sum_{i=1}^n (\frac{1}{4} r_i^4 + r_i^2 z_i^2) \delta_i D_i - CG^2 M$$

转动惯量的量纲为长度的 5 次方。为了方便表示, 本文用旋转半径表示肢体的转动特征。旋转半径与主转动惯量的关系为:

$$RG = \sqrt{\frac{PMI}{M}}$$

为了表示清晰, 质心位置及旋转半径均以其实际测量值和其全长的比值来表示。根据 Dempster (1955) 的研究, 人体全身的比重取均值为 1, 各肢段的比重则参考 Drillis *et al.* (1966), 取手为 1.144; 前臂 1.122; 上臂 1.081; 小腿 1.095; 大腿 1.069。

用全微分方法估算随机误差对质心测量的影响, 可以证明这种影响并不严重 (Li *et al.*, 1993)。转动惯量的测量精度用重复测量的相关系数检验, 其值为: 手 0.98 (n=7); 前臂与手 0.98 (n=7); 前臂 0.98 (n=16); 全上肢 0.99 (n=7)。这一结果与 Stijnen *et al.* (1983) 的类似测量非常接近。

人体肢段的准确定义是十分困难的。大多数以人体工程学研究为目的的工作将肢段的边界定义于关节的转动中心。本文未采用这个定义, 因为本文的主要着眼点为肢体的生长发育, 并不特别需要前述定义的生物力学意义。由于在活体测量中, 肢段的边界要有明显的体表标志或易于通过触摸定位。因此, 这里用常规人体测量学中肢长的边界定义各肢段。大腿例外。由于测量技术的限制, 大腿被定义为两个水平面之间的身体部分, 这两个水平面是: 1) 与左右下肢在正中矢状面相交处等高; 2) 穿过胫骨点(ti)。小腿、上臂、前臂、手参照《人体测量方法》(吴汝康等, 1984) 的肢长测量。

在本文中, 外胚型 (Ectomorphy) 的计算参照 MacDougall *et al.* (1982) 的方法。

在这里值得一提的是, 重心实际上为肢段质量沿长轴分布的均值, 如肢段细长, 则转动半径为其质量沿长轴分布的标准差。所以, 这两个物理量可以与质量分布的统计量统一起来。

2 结 果

1) 质心位置: 单一肢段的质心位置既无性别间差异又无年龄间差异。每一性别一年龄组内的变异亦很小。对于多段肢体来说, 不同年龄及性别均导致质心位置的变化。例如, 女性的前臂如手的质心位置在除 8 岁以外的所有的年龄组中均比男性靠近肘端。这种两性差异在全上肢则更为明显, 女性的质心在所有年龄组均更近肩端。从年龄变化来看, 高年龄组儿童的质心更靠近上肢的近端。尽管这种趋势并不特别明显, 但它可能反映了儿童上肢的近端的横截面较远端有更多的生长。

2) 主转动惯量 (表内未直接列出, 其值为转动半径的平方乘以质量): 男童手的主转动惯量在所有年龄组均比女童高, 但这一点在女性青春生长期的年龄段不十分明显。

3) 旋转半径: 旋转半径不随年龄变化。类似于质心位置, 两性差异也仅见于“复合”肢段。男童的前臂-手较女童有较大的旋转半径。全上肢亦有类似的趋势。

4) 肢体体积及其与全身体积的比例: 除了 13 岁组外, 男童手的体积值均比女童高。在这个年龄分布的两端, 两性差异的水平均较高 (8 岁, $P < 0.1$; 9 岁, $P < 0.01$; 15 岁, $P < 0.001$)。这种差异既存在于手体积的绝对值, 又存在于与全身体积的比值。前臂体积的两性差异则更显见于该体积与全身体积的比值。在各个年龄组, 男性均有较高的数值。随着年龄的增长, 男、女性的手, 前臂的体积指数均减小, 尤以女性手体积指数的变化为甚。这种相对体积随年龄减小的现象不见于上臂。

表 2 各测量项目的统计结果

Statistics of the Measurements

年龄*		重 心				旋 转 半 径				体 积				体 积 指 数			
		男		女		男		女		男		女		男		女	
		\bar{X}	S	\bar{X}	S	\bar{X}	S	\bar{X}	S	\bar{X}	S	\bar{X}	S	\bar{X}	S	\bar{X}	S
手	A	66.0	1.12	65.8	1.18	24.0	0.53	24.0	0.58	189.5	29.17	175.4	26.06	66.2	7.53	37.1	50.37
	B	66.3	1.14	66.5	0.92	24.1	0.45	23.9	0.46	240.6	44.42	235.0	35.78	60.1	5.78	54.4	7.42
	C	66.4	0.82	66.7	0.83	24.1	0.37	24.0	0.41	313.5	53.33	252.1	38.98	59.8	6.75	48.8	6.19
前臂	A	57.8	2.12	57.5	2.11	28.7	1.15	28.7	1.18	436.3	79.09	427.9	95.41	1.5	0.20	1.5	0.20
	B	58.6	2.48	58.2	1.91	28.7	1.31	29.0	1.24	568.6	132.02	594.9	123.30	1.4	0.09	1.4	0.12
	C	58.9	1.41	58.5	2.63	28.3	0.68	29.0	1.72	771.5	138.01	707.5	155.92	1.5	0.17	1.3	0.16
上臂	A	54.9	1.85	55.0	2.10	30.5	0.88	30.4	0.93	760.9	184.99	773.1	197.26	2.6	0.34	2.7	0.30
	B	55.5	1.46	54.8	1.88	30.4	0.70	30.2	0.91	1066.2	284.22	1133.7	259.88	2.6	0.24	2.6	0.28
	C	56.1	2.08	56.3	1.87	30.5	1.06	30.2	0.77	1386.4	260.59	1350.6	309.74	2.6	0.40	2.6	0.13
小腿	A	58.9	2.54	58.3	1.17	27.4	1.25	27.3	0.87	1278.0	239.68	1268.5	292.60	4.6	0.76	4.6	0.64
	B	59.2	1.61	59.7	1.55	27.2	0.94	27.1	0.77	1824.8	442.27	1931.7	431.04	4.4	0.49	4.4	0.31
	C	58.8	1.84	59.7	1.37	27.1	1.11	27.0	0.85	2421.8	464.48	2258.5	519.84	4.6	0.33	4.4	0.43
前臂 及手	A	61.5	1.12	61.9	1.32	26.4	0.53	26.2	0.48								
	B	61.9	1.31	62.5	1.37	26.5	0.46	26.2	0.52								
	C	62.1	1.29	63.4	1.23	26.4	0.66	26.0	0.88								
上臂 及 前臂	A	57.6	1.50	57.9	1.76	28.2	0.68	28.2	0.72								
	B	58.6	1.40	58.9	1.51	28.0	0.73	27.9	0.59								
	C	59.4	1.38	59.3	1.44	28.0	0.60	28.1	0.71								
全上肢	A	61.3	1.41	61.9	1.58	26.5	0.52	26.2	0.55								
	B	62.3	1.29	63.0	1.53	26.3	0.50	25.9	0.56								
	C	62.8	1.56	63.7	1.27	26.3	0.68	25.9	0.56								
大腿	A	61.2	1.37	61.9	1.55	26.5	0.50	26.2	0.52								
	B	62.4	1.25	62.9	1.55	26.3	0.50	25.9	0.60								

* 年龄组 A: 7.5—10.4999 岁; B: 10.5—13.4999 岁; C: 13.5—16.4999 岁

3 讨 论

由本文结果可见, 质心及转动半径在各个年龄-性别组中的数值均十分相近。Jensen (1986) 注意到这些变量没有儿童与成人间的差别。Bernstein *et al.* (1931) 也没有发现质心在不同年龄中的差异。但是, 本文结果显示, 尽管差异很小, 年龄仍对一些项目有显著的影响, 尤其是肢段体积与全身体积的比值。

手的重心大约位于距中指尖三分之二手长的位置。在男性, 此项目不随年龄而变化; 但是, 女性年长组比年轻组质心位置偏于手的近端 ($p < 0.01$)。这表明女性手掌比手指生长更多。

上臂重心有向近端移动的趋势, 这一点在男性更明显 ($p < 0.01$)。本研究不能确切指出什么组织造成这种变化。但以往的研究 (Tanner, 1962, 1965; Johnston *et al.*, 1966; Malina *et al.*, 1967) 显示在生长过程中, 上臂肌肉横截面有相当程度的增加。本文作者推测, 肩关节周围肌肉的增加 (如三角肌) 导致上臂近端截面相对加大, 使得上臂重心向肩部移动。在以往的诸多研究中, 最具可比性的是 Drillis *et al.* (1966) 的样本。他们的被测年龄比本文稍高, 上臂重心位置为 57.7%, 比本文样本最高年龄组的平均值亦略高。

前臂加手的质心位置则略有不同: 女性具有年龄差异而男性没有。在女性, 年龄长者较年龄轻者的质心位置靠近肩部 ($p < 0.01$)。两性比较, 女性的质心位置更高。

一般说来, 转动半径的变异很小, 各个年龄组取值基本相同。全上肢例外。对于这个项目, 女性取值随着年龄增加稍有减小; 男性则在各个年龄组中普遍显示比女性取值高。一个类比可以解释这个现象: 哑铃比一个与其长度, 直径相似的铁棒有较大的转动半径。与女性比较, 男性的上肢具有类似“哑铃”的特征, 在上肢两端, 有发达的肩部及粗大的手部, 导致较大的转动半径。

男性的上肢体积与全身体积的比值较女性高。这主要是由于手及前臂相对体积之故, 上臂则不显两性差异。上肢各段相对体积的年龄间差异亦只发生于手及前臂, 其相对体积在儿童生长过程中趋向变得较小, 这一点在女性更为明显。这一结果暗示着另一现象, 即女性在生长中, 较男性具较多的“形状”变化。这一点, Li (1991) 已在经典的人体测量学指标上做了分析并得到了女性有较高异速生长 (Allometry) 水平的结论。

Jensen (1986) 的研究显示在 4—15 岁年龄段内, 男性的上、下肢的体积指数 (肢段体积与全身体积之比) 均有所增加。Jensen 用回归斜率证明他的论点, 但是并没有任何统计学检验支持他的论证。他的图示看起来显示手及前臂在整个生长阶段维持不变的相对体积 (但在没有任何数字支持的情况下, 他认为该二项目随年龄而增加), 而上臂的相对体积增加。如前所述, 本文的结果显示了不同的结论。如此两研究之相悖不是 Jensen 的样本或测量误差所致 (本文作者认为这是最可能的原因), 取样方法便值得推敲。Jensen 的样本是一个主观选择的小样本, 而本研究则使用了一个较大的随机样本。群体也许是另外一个原因 (尽管可能性不大)。Yokoi *et al.* (1985) 的日本样本显示, 大腿及小腿均随年龄而增加相对体积。但是, Zook (1932) 则在美国儿童中得出相反的结论: 这两个项目或保持为常数, 或随年龄增长而递减。

尽管本文作者对 Jensen 的某些结果持有保留, 但认为他对于人体生物力学参数在人体生长的研究的认识颇为独到。Jensen (1987) 认为, 高维参数, 包括形状、体积、质量以及转动惯量应用来为 (人类) 生长描绘更细致的图示。实际上, 人类学研究者一直在不停地创造不同于传统测量的、非线性的参数, 以求达到更好地描述人体形态的效果。无量纲的各种指数即为一例。另外一个尝试便是体型分类, 最新如 Heath-Carter 修订的三胚层法。惯性、惯量特征只是这诸多高维人体测量方法之一。指数是两个线性测量的商, 简单易得, 历史也最久。但近来有人对指数的使用提出质疑 (Atchley, 1976)。虽然 Atchley 的观点被认为不乏偏颇之处 (Hills, 1978; Dodson, 1978), 但也确实对指数的

滥用提出了警告。体型分类的应用亦很广泛,尤其在体育研究领域。但严格说来,Heath-Carter (Carter, 1975) 的方法亦只是若干线性变量的组合,只适用于全身,且无其本身抽象的三维空间以外的其他度量意义。惯性、惯量特征则不同,这些参数既可以描述全身,又可以描述肢段。如前所述,质心是质量分布的均值,旋转半径则为标准差。除此数学意义外,这些参数更有其众所周知的力学定义和意义。但惯性、惯量特征作为生长指标也有其不利之处,如肢段不易定义及测量,测量值往往不直观等等。这也许是限制这类研究的最主要的因素。本文作者认为,人体质心,转动惯量等生物力学参数的测量及研究仍有很长的路要走。第一,从意义上讲,除了作为形态学指标外,这些测量结果将可直接应用于体育、人体工程学等领域;第二,从发展阶段看,到目前为止,这类工作在上进行得还很少,被研究的儿童群体只涉及加拿大、澳大利亚、日本以及本文讨论的英国,成人的研究则集中于德国、美国及前苏联;第三,许多新技术的普及(如核磁共振、激光以及其他各种三维成象及图形处理技术),将使这方面的研究更加易行和精确。

鸣谢:本研究受中国科学院奖学金资助。研究过程中,作者一直得到吴汝康、吴新智两位教授的鼓励和支持。学报的编辑、编委曾对本文的内容及文字提出宝贵的修改意见。在此,作者表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 吴汝康,吴新智,张振标. 1984. 人体测量方法. 北京: 科学出版社.
- Ackland T R, Blanksby B A, Bloomfield J. 1988. Inertial characteristics of adolescent male segments. *J Biomech.* 21:319-327.
- Atchley W R, Gaskins C T, Anderson D. 1976. Statistical properties of ratios I, Empirical results. *Syst Zool.* 25:137-148.
- Atchley W R. 1978. Ratios and the statistical analysis of biological data. *Syst Zool.* 27:71-78.
- Bernstein N, Salzgeber O A, Pavlenko P P *et al.* 1931. Determination of Location of the Centers of Gravity and Mass of the Links of Living Human Body (in Russian). Moscow: All-Union Institute of Experimental Medicine.
- Bernstein N. 1967. *The Co-ordination and Regulation of Movements.* Pergamon Press.
- Braune W, and Fischer O. 1889. Über den Schwerpunkt des menschlichen Körpers mit Rücksicht auf die Ausrüstung des deutschen Infanteristen. *Abh. d. math.-phys. cl. d. K. Sachs. Gesselsch. der Wiss.*, 26, 561-672. In:Korgman W M, Johnston F E eds. *Human Mechanics — Four Monographs Abridged.* Ohio: Wright-Patterson Air Force Base, 1963 (AMRL-TDR-63-123).
- Brooks C M. 1973. Validation of the gamma mass scanner for determination of center of gravity and moment of inertia of biological tissue. Master's thesis, The Pennsylvania State University.
- Carter J E L. 1975. *The Heath-Carter Somatotype Method.* Revised, San Diego: San Diego State University.
- Chandler R F, Clauser E C, McConville H M *et al.* 1975. Investigation of inertial properties of the human body. Aerospace Medical Research Laboratory. AMRL-TR 74-137.
- Clauser C E, McConville J T, Young J W. 1969. Weight, Volume and Centre of Mass of Segments of the Human

- Body. Ohio: AMRL Technical Report 69-70, Wright-Patterson Air Force Base.
- Dempster W T. 1955. Space Requirements of the Seated Operator. Ohio: WADC Technical Report 55-159, Wright-Patterson Air Force Base.
- Dodson P. 1978. On the use of ratios in growth studies. *Syst Zool*, 27: 62-67.
- Drillis R, Contini R. 1966. Body Segment Parameters. Report No. 1163-03, New York: Office of Vocational Rehabilitation, Department Health, Education and Welfare.
- Fisher O. 1906. The oretische Grundlagen für eine Mechanik der Lebenden Körper mit Speziellen Anwendungen auf den Menschen sowie auf einige Bewegungsvorgänge an Maschinar. Leipzig: Teubner.
- Hanaven E P. 1964. A Mathematical Model of the Human Body. AMRL Technical Report 64-102. Ohio: Wright-Patterson Air Force Base.
- Harless E. 1860. The Static Moments of the Component Masses of the Human Body. Ohio: Wright-Patterson Air Force Base, 1962 (FTD- TT-61-295).
- Hills M. 1978. On ratio - a response to Atchley, Gaskins, and Anderson. *Syst Zool*, 27: 61-62.
- Jensen R K. 1978. Estimation of the biomechanical properties of three body types using a photogrammetric method. *J Biomech*, 11:349-358.
- Jensen R K. 1981. Age and body type comparisons of the mass distributions of children. *Growth*, 45:239-251.
- Jensen R K. 1986. Body segment mass, radius and radius of gyration proportion of children. *J Biomech*, 19:359-368.
- Jensen R K. 1987. Growth of estimated segment masses between four and sixteen years. *Hum Biol*, 59:173-189.
- Johnston F E, Malina R M. 1966. Age changes in the composition of the upper arm in Philadelphia children. *Hum Biol*, 38:1-21.
- Li Y. 1991. Ontogeny of Children's Limb-with Particular Reference to Inertial Characteristics. Ph. D thesis, The University of Liverpool.
- Li Y, Dangefield P H. 1993. Inertial characteristics of children and their application to growth study. *Ann Hum Biol*, 20:433-454.
- MacDougall J D, Wenger H A. 1982. Physiological Testing of the Elite Athlete. Canadian Association of Sport Sciences, Sport Medicine of Canada Mutual Press.
- Malina R M, Johnston F E. 1967. Relation between bone, muscle and fat widths in the upper arms and calves of boys and girls studied cross-sectionally at ages 6 to 16 years. *Hum Biol*, 39:211-223.
- Meeh C. 1895. Volummessungen des menschlichen Körpers und seiner einzelnen Theile in den verschiedenen Altersstufen. *Z Biol*, 31:125-147.
- Stijnen V V, Wilems E J, Spaepen A J *et al*. 1983. A modified release method for measuring the moment of inertia of the limbs. In: Matsui H, Kobayashi K eds. International Congress of Biomechanics VIII-B. Illinois: Human Kinetics Publishers, Champaign. 1138-1143.
- Tanner J M. 1962. Growth at Adolescence. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Tanner J M. 1965. Radiographic studies of body composition in children and adults. In: Brozek J eds. Human Body Comparison VII. Oxford: Pergamon Press, 211-236.
- Weinbach A P. 1938. Contour maps, centre of gravity, moment of inertia and surface area of the human body. *Hum Biol*, 10:356-371.
- Yokoi T K, Shibukawa M, Ae M *et al*. 1985. Body-segment parameters of Japanese children. In: Winter D A eds.

Biomechanics IX-B. Illinois: Human Kinetics Publishers, Champaign.

Zook D E. 1932. A study by means of water displacement. Am J Dis Ch, 43:1347-1432.

CHILDREN'S INERTIAL PROPERTIES AND THEIR GROWTH

Li Yu

(*Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Academia Sinica, Beijing 100044*)

(*Department of Human Anatomy and Cell Biology, Liverpool University, Liverpool. UK L67 3BX*)

Abstract

Water displacement method has been used to obtain the volume distribution functions of children's limb segments, on a sample of British children aged from 8 to 16. Based on the volume distribution data and certain hypothesis about the relation of volume and mass, the inertial characteristics, including the position of centre of gravity, the moment of inertia, and the radius of gyration, have been calculated. The data obtained were compared with the previous ones and their significance in growth studies were discussed. The author believes that besides their biomechanical background, these inertial characteristics have also their potential as growth indications.

Key words Children growth, Biomechanical characteristics, Mass centre, Moment of inertia