

电磁跟踪定位器用于产程监测的可行性

欧伟光¹, 刘高超², 陆尧胜², 韩玉琪³

1. 暨南大学附属第一医院, 广东 广州 510632; 2. 暨南大学电子工程系, 广东 广州 510632; 3. 广东邮电职业技术学院, 广东 广州 510630

【摘要】目的:研究电磁跟踪定位器应用于产程监测的技术可行性分析。**方法:**研究分娩参数特性和产道结构特点, 对比分析主流的5种空间定位技术, 并模拟产房环境实验检验电磁跟踪定位器的测量精度。**结果:**电磁跟踪定位器无视线遮挡限制、传感器尺寸小, 在产程监测中优于其它空间定位技术; 在其工作范围内, 测量精度达毫米级, 可满足产程中多目标、多参数同步测量的要求。**结论:**电磁跟踪定位器工作范围、精度、准确度和易操作性可胜任产程监测和分娩监护, 使用安全、可靠、方便。

【关键词】电磁跟踪定位器; 产程监测; 分娩参数; 产道

【中图分类号】R312; R714

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2016)06-0619-07

Feasibility of electromagnetic tracking locator for labor monitoring

OU Wei-guang¹, LIU Gao-chao², LU Yao-sheng², HAN Yu-qi³

1. First Hospital Affiliated to Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Department of Electronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3. Guangdong Vocational College of Post and Telecom, Guangzhou 510630, China

Abstract: Objective To study on the technical feasibility of electromagnetic tracking locator for labor monitoring. **Methods** The delivery parameter characteristics and birth canal structural features were studied. Five major space positioning technologies were compared and analyzed, and the measurement accuracy of electromagnetic tracking locator in a simulation delivery room was tested. **Results** Without sight limitation, electromagnetic tracking locator had small sensor size, better than other spatial positioning technologies in labor monitoring. Within the operating range, measurement accuracy of electromagnetic tracking locator reached to millimeter level, meeting the requirements of multi-target, multi-parameter synchronous measurement. **Conclusion** Electromagnetic tracking locator is safe, reliable and convenient. And the proposed electromagnetic tracking locator is competent for labor monitoring with its working range, precision, accuracy and ease of operation.

Key words: electromagnetic locator; labor monitoring; delivery parameter; birth canal

前言

我国人口数量众多, 围生期是影响新生儿人口质量同时也是导致出生缺陷高发的主要原因, 其中分娩过程(产程)最为关键^[1]。应用科学实用的分娩监护手段对降低出生缺陷率、降低母胎死亡率、促进自

然分娩非常必要。分娩学中, 产程图是描述分娩过程的直观依据, 宫颈扩张、骨盆尺寸、胎头位置和方向等分娩参数是决定分娩方式、控制分娩进程的主要依据, 但一直以来没有切实可行的测算方法^[2]。比如胎头下沉和宫颈扩张参数, 长久以来一直由助产士或产科医生经阴道指检法估测, 准确性差、主观性强。

本文首先研究分析女性生殖道解剖结构的特点、分娩机制和分娩监测方法, 对比研究目前流行的5种空间定位技术: 机械式、电磁式、光学式、声纳式以及惯性式, 根据产道解剖结构的特点和产程监测的特殊要求, 优选出电磁式跟踪定位方法应用于产程监测, 并进行技术可行性论证研究。

【收稿日期】2016-03-31

【基金项目】国家国际合作专项(2015DFI12970); 广东省科技计划应用型科技研发专项资金(2015B020233010); 广州市科技计划产学研协同创新重大专项(201508030008)

【作者简介】欧伟光(1975-), 硕士, 工程师, 主要研究方向: 医疗设备研制、管理, Tel: 13392692113, E-mail: OUWG3105@126.com

【通信作者】陆尧胜, E-mail: tlays@jnu.edu.cn

1 女性产道结构特点

女性产道是胎儿娩出的通道,分为两个部分:其一是骨产道;其二是软产道。骨产道即为产妇的骨盆,骨盆大小和形状都与分娩有着密切的关系,但在分娩过程中,其变化较小。软产道为一弯曲管道,组成部分包括子宫下段、宫颈、阴道及骨盆底软组织。

1.1 骨盆的解剖学结构

女性的骨盆主要由髋骨、骶骨、尾骨组成,是胎儿

娩出必经的骨性产道。骨盆前部的两耻骨间的联合,由纤维软骨构成。骨盆可分为真骨盆和假骨盆,以骶岬上缘、髂耻缘及耻骨联合上缘构成的连线为界线:分界线之下为真骨盆,是胎儿娩出的通道;分界线之上为假骨盆,与产道并无太大关系。

骨产道是一个左右对称的不规则通道。根据骨盆的形状,将其分为3个平面:骨盆入口平面、中骨盆平面以及骨盆出口平面^[3-4](图1)。

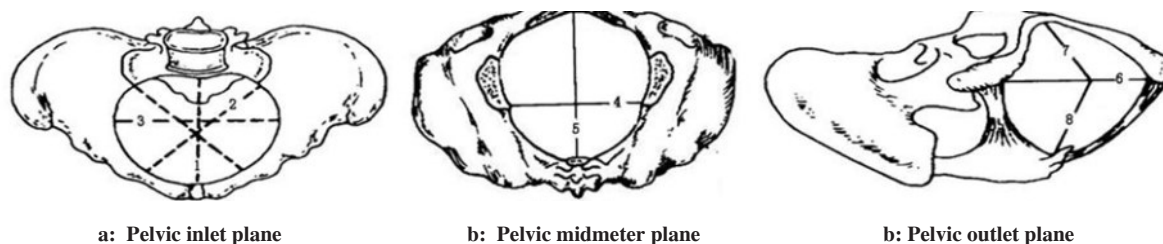


图1 骨盆及骨盆平面图

Fig.1 Pelvis and pelvic floor plan

1. anteroposterior diameter; 2. oblique diameter; 3. transverse diameter; 4. transverse diameter; 5. anteroposterior diameter; 6. transverse diameter; 7. anterior sagittal diameter; 8. posterior sagittal diameter

骨盆轴为一条假想的曲线,由骨盆各平面的中点连接一起得到,胎儿娩出时将沿着骨盆轴完成分娩过程。因为分娩时骨盆的变化非常小,只有尾椎有大约几厘米的活动,因此基本可以忽略骨盆变化对胎儿分娩进程的影响。

详细的骨盆测量数据对于分娩前期预测头盆不称和分娩过程判断胎头下沉位置、胎头旋转方位等具有准确的判断与决策作用,对于临床上决定分娩方式和判决分娩进程有着重要意义。目前,临床上女性骨盆测量方法主要采用测量尺和阴道指检。

1.2 软产道

软产道为一弯曲管道,组成部分包括子宫下段、宫颈、阴道及骨盆底软组织。未孕时,宫颈是一个长2.5~3.0 cm的管形构造物,孕期宫颈闭合,有保护胎儿生长发育的作用。到了孕末期,宫颈逐渐消失、展平,称为宫颈成熟。临产开始到第一产程宫口全开,与扩展的子宫下段形成筒状,容胎儿通过的软产道。

宫颈管在宫缩逐渐增强及频率增加的情况下,将逐渐缩短直至消失,同时宫口逐渐扩张。不同时期宫口扩张速度有所区别,活跃期内宫口扩张速度快于潜伏期内的宫口扩张速度。宫口边缘消失发生于宫口开全(大约10 cm)时,此时将形成由阴道及子宫下段构成的宽阔筒腔。因此,临床上对分娩过程中的宫颈扩张参数以及宫颈管消失的程度等软产道参数进行测量。由于宫颈位置的特殊性,目前临床

上仍然采用医生阴道指检的方法进行估测。

2 分娩参数和监测技术

2.1 分娩参数

分娩期是极为重要、不能忽视的关键时刻,虽然时间十分短暂,短则数十分钟乃至数分钟,长则若干小时,但孩子出生后的健康状况和智力水平却受这段时间的影响^[5]。产程图包括胎头位置和宫颈扩张两个重要参数,但可行的自动测量方法尚未发现。

宫颈扩张(又称宫口扩张),宫口扩张程度可由阴道检查或肛诊来确定,宫口扩张在潜伏期内的速度慢于活跃期后的扩张速度。非理想状态下,胎位异常、头盆不称、宫缩乏力等因素往往导致宫口不能如期扩张。宫口边缘消失发生于宫口开全(大约10 cm)时,此时将形成由阴道及子宫下段构成的宽阔筒腔。其扩张过程如图2所示^[2,6]。

胎头下降程度通过胎头颅骨最低点与坐骨棘平面构成的平面关系表征,是胎儿能否经阴道分娩的

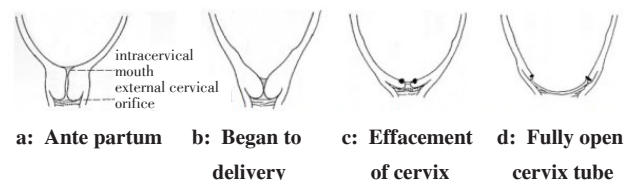


图2 宫颈扩张示意图

Fig.2 Cervical dilation schematic diagram

重要参数。坐骨棘平面作为标志平面,当胎头颅骨最低点与坐骨棘相平时,此时位置记作“0”;“-1”位置表示坐骨棘平面上1 cm;“+1”位置表示坐骨棘平面下1 cm。胎头位置描述的是坐骨棘平面与胎头先露的关系^[2,6](图3)。

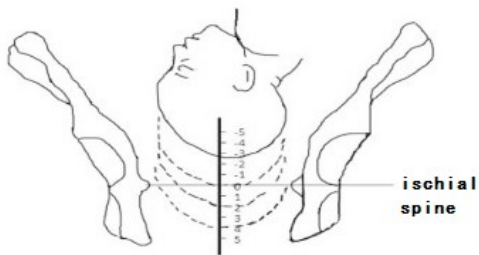


图3 胎头位置

Fig.3 Fetal head position

2.2 分娩参数监测技术和要求

实际临床操作中,助产士或产科医生对宫颈扩张和薄化度、胎头位置、胎位等指标的估测往往依靠阴道指检法。宫颈扩张和胎头位置由于测量时的特殊要求及其特殊的解剖位置,在临床上一直没有切实可行的自动测量方法。

围绕产程监测,对于宫颈扩张、胎头位置参数的测量,国内外的学者都有相关研究。比如,李刚等^[7]利用霍尔传感器和电位器钳式传感器测量子宫颈口来研究测量宫颈扩张的方法,但胎头位置无法测量,而且不具备临床实用性。国外学者 Yahuda Sharf 研究基于超声测距技术的计算机辅助产程监护系统,属于超声声纳式的分娩监护测量方法。但其检测结果会由于数据采集的更新率较低而出现较为严重的延迟,而且其测量的工作范围和精度会受到超声波信号在传播中的衰减、传输介质干扰、瞄准线问题的限制^[5]。此外,许多孕产妇难以接受声纳式测量方法所带来的创伤和临床实用性差的缺点,因此难以推广应用^[8]。

目前,电子胎儿监护技术已广泛应用于产前诊断,相比之下,电子监护技术在产程中的应用几乎空白。因此,对比已有产程监测方法,具有实际临床实用价值的测量分娩进程参数的分娩监护方法和技术需准确、客观及易于临床实际操作。

磁场跟踪定位技术是一种基于法拉第电磁感应定律的非侵入式的定位技术,基于发射器磁场的局部值磁场强度测量接收器相对于发射器的位置和方向,早已广泛应用于远程机器人控制、图形平台下的实时全三维控制和虚拟现实技术中的头部及全身跟踪等领域^[9-10]。鉴于产程中多目标、多参数同步测量

的要求和女性生殖系统构造特点,电磁跟踪定位技术是产程监测和分娩监护理想的选择。

3 电磁跟踪定位技术

3.1 常用的几种定位跟踪技术和比较

按照定位的实现方法,可将当下较流行的定位器分为以下5种:电磁式、声纳式、光学式、机械式和惯性式。(1)电磁式定位器,优点:无视线遮挡限制,传感器尺寸小,测量准确度良好,系统成本相对较低;缺点:工作范围有限制,测量准确度随距离增加下降,易受电磁、金属等环境因素干扰^[8]。(2)超声式定位器,优点:超声在临床上应用广泛,多普勒测距定位原理简单、结构简单、容易制造;缺点:易受环境影响,测量准确度随距离增加下降,传感器尺寸太大、结构复杂,实用性不理想。(3)光电式定位器,优点:速度快,实时性强,无须配置复杂的机械运动结构,定位结果精确;缺点:受视线遮挡的限制,易受光源强度和光学传感器敏感影响,价格较昂。(4)机械式定位器,优点:简单易用,无视线遮挡限制,不受环境电磁及金属物等干扰,测量准确度较稳定;缺点:系统笨重,受机械连接限制。(5)惯性式定位器,优点:无源操作,理论上工作范围可无限大,抗干扰性好、可无线化;缺点:累计误差导致结果偏差严重,定位结果偏差自身难以有效克服。

综合以上因素,根据产道解剖结构特点和产程监测的特殊要求,最终优选出电磁跟踪定位技术应用于分娩监测。

3.2 电磁定位器的工作原理

电磁定位跟踪技术是一种非侵入式的基于法拉第电磁感应定律的三维测量技术,通过发射器磁场的局部值(磁场强度)测量接收器相对于发射器的位置和方向。由发射器、接收器、驱动电路和计算机组成,通过测量电磁场的强度和方向来确定测量点的位置与方向^[11-12]。发射器和接收器均包含3个相互独立并垂直正交的线圈(图4)。

发射器不工作时,接收器感应环境磁场强度,产生背景磁场强度的数据。当发射器的某个线圈发射磁场时,接收器的3个线圈同时感应到3个不同的磁场强度,分别是磁场向量在该位置点的3个相互垂直的磁场分量。3个线圈依次发射磁场,接收器相应获得9个磁场强度数据。根据发射器发射磁场强度和9个接收磁场强度数据,减去作为背景的环境磁场强度,即可获得该接收器所在位置的3个空间位置数据和姿态数据。其应用与产程监测时的原理框图(图5)。

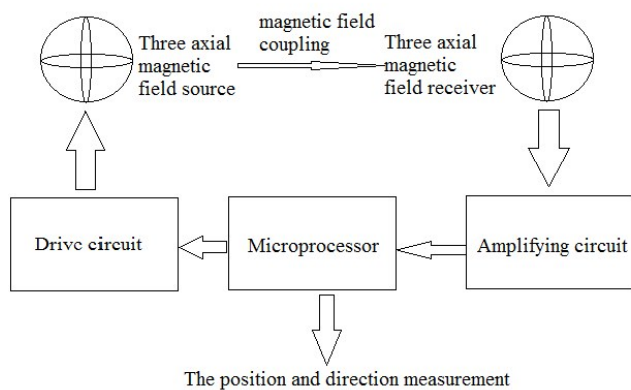


图4 电磁定位发射器及控制器示意图

Fig.4 Electromagnetic transmitters and control structure

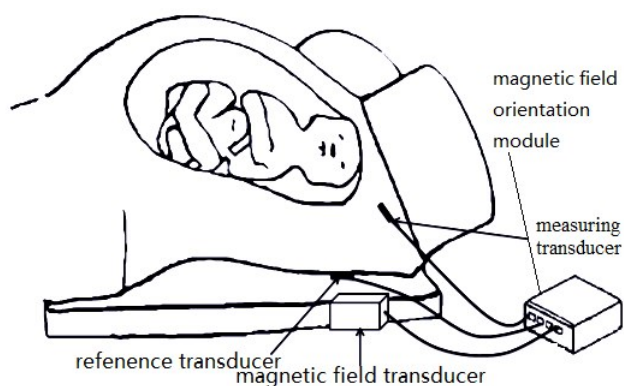


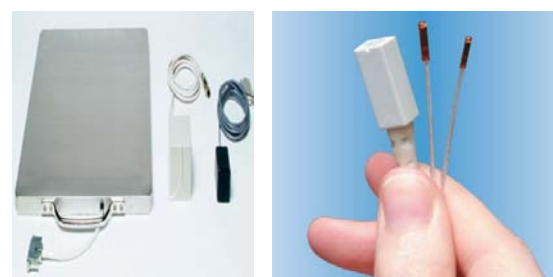
图5 电磁定位器测量原理框图

Fig.5 Measurement schematic diagram of electromagnetic locator

3.3 电磁跟踪定位器的安全性评价

鉴于胎头和宫颈在测量时的特殊要求及其解剖位置的特殊性,同时应用在医疗领域中,采用Ascension公司的medSAFE电磁定位跟踪器,它具有平板式发射器以及微型传感器(图6)。通过medSAFE定位器对分娩监测中宫颈扩张和胎头位置参数进行研究测量。定位成功与否很大程度上取决于电磁定位跟踪技术的参数,一般参数包括工作范围、尺寸大小以及延迟等。在本文中,电磁定位跟踪器的位置坐

标数据是主要考虑的因素。medSAFE产品的技术参数如表1所示。本文将通过一系列后续实验对定位器的静态位置精度这一物理技术参数进行探讨,从而进一步验证电磁跟踪定位器的性能指标。



a: Emitter

b: Sensor



c: Ascension

图6 medSAFE直流式电磁定位器

Fig.6 medSAFE direct current electromagnetic locator

一般永磁铁附近的磁感应强度是0.40~0.70 T,地磁场大约只有0.05 T。本研究所用的medSAFE直流式电磁定位器的磁场强度小于地磁强度的1/6,因此其磁场本身对人体的影响非常有限,不存在安全顾虑。

4 电磁跟踪定位器的测量精度试验研究

电磁跟踪定位技术虽然已经较为成熟地应用在虚拟现实领域中,但是在医院产科医疗环境下,金属医疗器械的大量存在会导致环境电磁、金属等干扰影响,故而使其产生磁畸变,从而影响测量精度^[13-15]。

本文实验测试环境存在有少量的铝质、不锈钢质等金属用品,一定量的电源、电线以及CRT显示器,基于实验室条件下进行。室内电源与定位器间

表1 medSAFE产品技术指标参数

Tab.1 medSAFE product specification parameters

Project	Index
Degree of freedom	6 (X, Y, Z, attitude angle, direction angle, rolling angle)
Measuring space	X, Y, Z direction: 46 cm
Measuring angle space	Attitude angle: $\pm 180^\circ$; direction angle, rolling angle: $\pm 90^\circ$
Static accuracy	Positional accuracy: 1.4 mm (RMS); angle accuracy: 0.5° (RMS)
Static resolution sensor size	Position resolution: 0.5 mm@30.5 cm; angular resolution: 0.1° @30.5 cm 8 mm (800 type); 2 mm (180 type); 1.5 mm (130 type)

RMS: Root mean square

距为 1.5 m, 频率则为 50 Hz, 类似于分娩过程中的真实产房环境。对于正常测试环境和干扰条件下 medSAFE 电磁定位器(微型传感器直径为 1.5 mm)的有效工作范围、准确度、精度和磁场畸变程度, 本文分别采用不同测量方法, 每次实验开始前在平板式发射器上确定电磁定位跟踪器的坐标原点。

4.1 静态精度测量试验

(1) 实验一: 正常条件下电磁定位器的静态精度测试。测试参考用具采用高 3 cm 带槽塑料支架和 60 cm 塑料刻度尺, 将刻度尺插入放置于平板发射器上的带塑料支架槽内。从距发射器 50 mm 的位置开始, 每次测量接收器均在刻度尺上沿固定间隔的刻度移动 50 mm 的间隔。设计测试实验: 每次记录数据点 $X=10$ 个且接收器保持不动, 计算该次测量接收器记录点位置的均方根误差(单位 mm)。

(2) 实验二: CRT 显示器作为干扰源。本实验研究 medSAFE 电磁定位器与易于产生环境电磁干扰的电子设备的最低安全距离。实验过程中产生环境电磁干扰源的电子设备采用 CRT 显示器, 发射器和接收器之间的距离 $dtr=200$ mm 保持不变, 从距电磁定位器 30 mm 的位置开始, 每次测量 CRT 显示器均移动 100 mm 的间隔。每次测量记录数据点 $X=10$ 个且发射器和接收器距离保持不变, 计算该次测量接收器记录点位置的均方根误差(单位 mm)。

(3) 实验三: 金属块作为干扰源。本实验研究医疗环境中常见的不锈钢金属作为金属干扰源时, 对 medSAFE 电磁定位器精度的影响。实验中金属干扰源采用 $35\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的不锈钢 304 金属块, 发射器和接收器之间的距离 $dtr=200$ mm 保持不变。由于金属干扰产生的精度误差与金属、发射器的距离 dtm 和金属与接收器的距离 dmr 的乘积相关, 因此在发射器和接收器的连线方向上移动不锈钢 304 金属块。设计实验: 从距发射器 50 mm 的位置开始, 每次测量均以 100 mm 的间隔在接收器和发射器连线方向上移动, 每次测量记录数据点 $X=10$ 个且发射器和接收器距离保持不变, 计算该次测量接收器记录点位置的均方根误差(单位 mm)。

实验结果如下:

(1) 如图 7a 所示, 横轴 dtr (单位 mm) 是发射器和接收器之间的距离, 纵轴 RMS error(单位 mm) 是每次对应于 dtr 测量的接收器记录点位置的均方根误差。medSAFE 定位器静态精度误差为 0.26 mm, 其精度在 dtr 小于 400 mm 的工作范围内保持相对较高。

(2) 如图 7b 所示, 横轴 dce (单位 mm) 是 CRT 显示器和电磁定位器间的距离, 纵轴 RMS error(单位

mm) 是每次对应于 dce 测量的接收器记录点位置的均方根误差。从图中可得, medSAFE 定位器使用时, 显示器和定位器的距离应大于 330 mm。当 CRT 和定位器的距离超过 330 mm 时, 基本可以忽略其对定位器精度产生的干扰影响。

(3) 如图 7c 所示, 横轴 $dtm\times dmr$ (单位 cm^2) 是金属与发射器距离和金属与接收器距离的乘积, 纵轴 RMS error(单位 mm) 是每次对应于 dtm 与 dmr 乘积测量的接收器记录点位置的均方根误差。 $35\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的不锈钢 304 金属块的最大精度误差为 1.21 mm, 出现在金属块距发射器 150 mm、距接收器 15 mm 位置处。在平板发射器上方 50~450 mm 内, 其对电磁定位器的测量精度并无显著影响。金属干扰对 medSAFE 定位器静态精度的影响在金属块距离发射器/接收器大于 250 mm 时和正常条件下测量精度误差趋于一致。由此说明在具有一定金属医疗器械的产房环境下, medSAFE 电磁定位器因其抗金属干扰性能良好仍然能够应用。

4.2 静态准确度测试实验

实验测试参考用具采用高 3 cm 带槽塑料支架和 $20\text{ cm}\times 60\text{ cm}$ 带坐标纸塑料板。设计实验: 将带坐标纸塑料板 20 cm 的一边插入带槽塑料支架内, 然后按平板发射器的 y 轴方向放置。沿着发射器 y 轴方向, 在坐标纸上取 100 mm 作为绝对距离 D' 。从距发射器 50 mm 位置处开始, 每次测量增大发射器和接收器的间距 $dtr=50$ mm。然后按固定间隔的网格点, 在塑料板上移动接收器, 则相对距离和绝对距离的 RMS 即为定位器的静态准确度。

如图 7d 所示, 横轴 dtr (单位 mm) 是发射器和接收器的间距, 纵轴 RMS(单位 mm) 是每次对应于 dtr 测量的接收器记录点的真实距离和相对距离的误差均值。medSAFE 定位器的静态准确度受发射器和接收器的间距 dtr 影响, 当间距 $100\text{ mm}<dtr<400\text{ mm}$ 时, 其静态准确度相对较高, 静态准确度误差均值为 2.3 mm。

4.3 磁畸变测试实验

本实验测试 medSAFE 定位器的磁畸变程度, 实验环境模拟真实产房环境。采用 $350\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 坐标纸的塑料板, 设计实验: 沿着坐标纸上固定的网格点, 按 50 mm 距离的间隔绘制 8×8 个网格点, 形成一个矩形网格测试平面, 接收器分别测得网格测试平面上 8×8 个网格点的坐标。测量环境条件下电磁定位器的磁场畸变程度可通过 8×8 个网格点的 X、Y、Z 轴的测量位置坐标与真实位置坐标的误差反映。

实验结果如图 8 所示。横轴是网格点各方向轴的真实位置坐标(单位 cm), 纵轴是各方向轴真实位置坐

标与电磁定位器测得的网格点各轴位置坐标的误差均值(单位mm)。X轴方向,测量值在发射器坐标原点前部(+)比实际值小,在坐标原点后部(-)则比实际值大;Y轴方向,测量值在发射器坐标原点右侧(+)比实际值

小,在坐标原点左侧(-)则比实际值大;Z轴方向,测量值在平板发射器边缘处受磁场畸变影响较为显著,在发射器前部边缘比实际值大,在后部边缘则比实际值小。三者误差均值均在 ± 5 mm内。

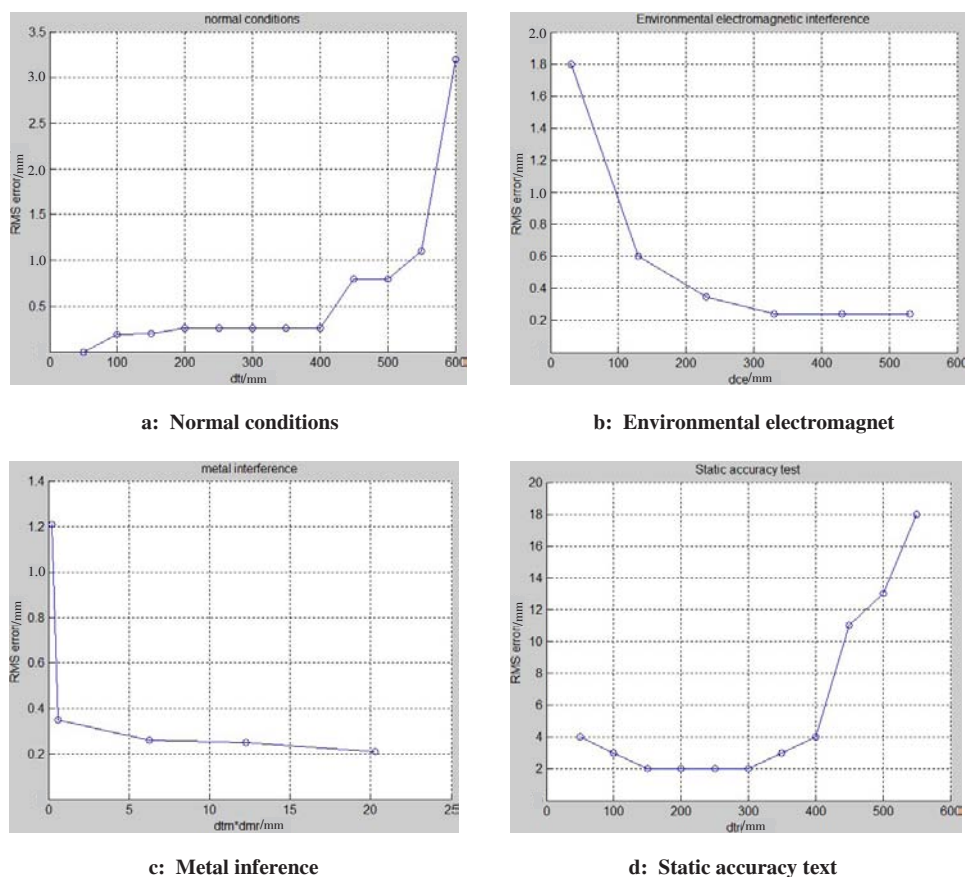


图7 实验结果图
Fig.7 Experimental result

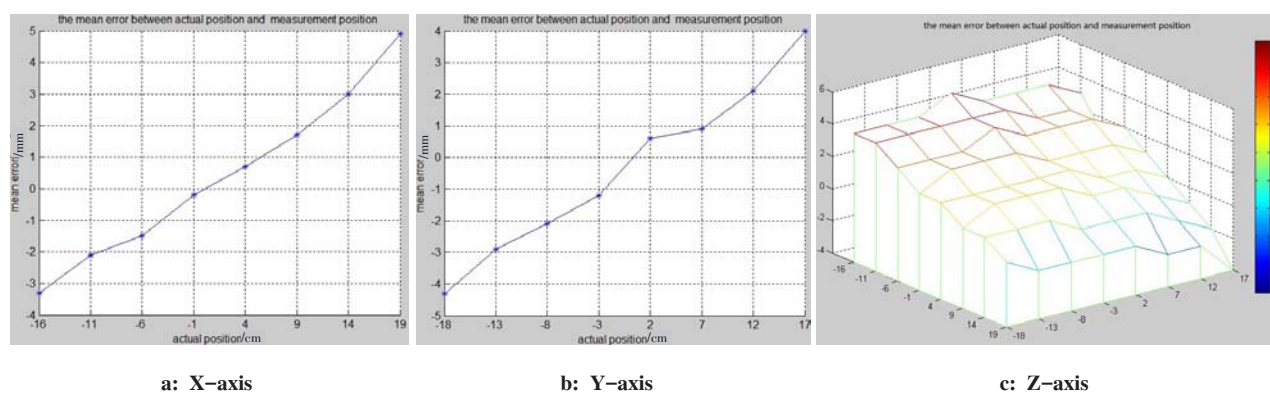


图8 X、Y、Z轴方向磁场畸变测试结果
Fig.8 Magnetic field distortion test results in X, Y, Z-axis directions

5 电磁定位器的便利性和实用性

目前,产科临床上主要采用测量尺、阴道指检对骨盆、胎儿特征参数进行测量。由于女性生殖道解剖结构的特殊性和胎头的特殊位置,这些测量方法

主观性较高,测量结果误差也较大。而且对产程监护主要集中在对骨盆和胎儿特征参数进行单独的测量,对两者之间关系的测量则显得力不从心。而骨盆与胎儿在分娩过程中如果不能相互适应,即使骨

盆或胎儿正常,也可能出现头盆不称导致难产。虽然临床医生可以借助于B超检查以及经验在脑子里重构出骨盆与胎头的三维空间关系,但主观性太强,不能得出头盆关系的定量结果。而电磁跟踪定位技术的引入不仅简化原先的操作流程,而且避免反复阴道指检带来的痛苦,加快产程参数测量进度,从而进一步提高病人的满意度。

6 结 论

在正常实验环境条件测试下,采用medSAFE定位器进行实验测量,若其发射器和接收器的间距保持在 $100\text{ mm}<\text{dtr}<400\text{ mm}$ 时,x轴坐标为 $[-11\sim14]\text{ cm}$ 、y轴坐标为 $[-13\sim12]\text{ cm}$,则其测量值和真实值之间的误差较小,受磁场畸变干扰影响不显著。当实验环境条件类似于医院真实产房环境时,有金属干扰源和电磁环境干扰源时,只需保持电磁环境干扰源和定位器的间距在测量过程中始终大于 330 mm ,保证在测量过程中金属物质不存在于发射器和接收器之间,则可忽略不计电磁环境干扰与金属干扰对测量结果造成的误差。因此,在产房环境下,medSAFE电磁跟踪定位器具有较为良好的性能,其工作范围、精度、准确度和易操作性可胜任产程监测和分娩监护,使用安全、可靠、方便。

【参考文献】

- [1] YOUNG D. What is normal childbirth and do we need more statements about it?[J]. Birth, 2009, 36(1):1-3.
- [2] BRUBAKER S J, DILLAWAY H E. Medicalization, natural childbirth and birthing experiences[J]. Sociology Compass, 2009, 3(1): 31-48.
- [3] VAN BOGAERT L J. The partogram[J]. S Afr Med J, 2003, 93(11): 830-833.
- [4] 陆尧胜,林启涛,沈以鸿. 胎头位置和宫颈扩张监测方法的研究[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(1): 152-156.
LU Y S, LIN Q T, SHEN Y H. Method to detecting fetal head station and cervical dilation[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(1): 152-156.
- [5] 陆尧胜, PALTIELI Y. 分娩监测技术及其临床应用[J]. 中华产科急救电子杂志, 2013, 2(4): 45-49.
LU Y S, PALTIELI Y. Childbirth monitoring technology and its clinical application[J]. Chinese Journal of Obstetric Emergency (Electronic Edition), 2013, 2(4): 45-49.
- [6] 张敏,尹爱兰,钟梅,等. 空间定位系统与传统阴道指检监测宫颈扩张及胎头下降相关性研究[J]. 中国实用妇科与产科杂志, 2015, 31(2): 160-164.
ZHANG M, YIN A L, ZHONG M, et al. The correlation study of spatial positioning system and traditional vaginal examination for cervical dilation and fetal head descent[J]. Chinese Journal of Practical Gynecology Gynecology and Obstetrics, 2015, 31(2): 160-164.
- [7] 李刚,邵蔚,姜苇,等. 产科宫颈扩张监测系统的研制[J]. 中国生物医学工程学报, 2003, 22(4): 377-381.
LI G, SHAO W, JIANG W, et al. Development of obstetrics cervical dilation monitoring system[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering 2003, 22(4): 377-381.
- [8] 童军. 基于VR的三维人体坐标跟踪系统研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2005.
TONG J. The study about the system of the 3D human motion tracking based on VR[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2005.
- [9] TSAI M C, YANG C H. A flux-density-based electromagnetic servo system for real-time magnetic servoing/tracking[J]. IEEE/ASME Trans Mech, 2008, 13(2): 249-256.
- [10] YABUKAMI S, KIKUCHI H, YAMAGUCHI M, et al. Motion capture system of magnetic markers using three-axial magnetic field sensor[J]. IEEE Trans Magn, 2000, 36(5): 3646-3648.
- [11] GOWRI V, JAIN R, RIZVI S. Magnetic resonance pelvimetry for trial of labour after a previous caesarean section[J]. Sultan Qaboos Univ Med J, 2010, 10(2): 210.
- [12] KINDDRATENKO V V, SHERMAN W R. Neural network-based calibration of electromagnetic tracking systems[J]. Virtual Real, 2005, 9(1): 70-78.
- [13] SCHUCK P W. Tracking magnetic footpoints with the magnetic induction equation[J]. Astrophys J, 2006, 646(2): 1358.
- [14] SCHUCK P W. Local correlation tracking and the magnetic induction equation[J]. Astrophys J lett, 2005, 632(1): L53-L56.
- [15] NIXON M A, MCCALLUM B C, FRIGHTW R, et al. The effects of metals and interfering fields on electromagnetic trackers[J]. Presence, 1992, 7(2): 204-218.

(编辑:陈丽霞)