doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2024.04.011

# 基于曲率特征分析的小儿颅骨畸形重建技术①

刘云峰 $^{2***}$  徐略乾 $^{***}$  游 嘉 $^{***}$  张琦昱 $^{***}$  姜献峰 $^{***}$  王 宁 $^{3***}$ 

(\*浙江工业大学机械工程学院 杭州 310023)

(\*\*特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室 杭州 310023)

(\*\*\* 浙江大学医学院附属儿童医院神经外科 杭州 310057)

**摘 要**小儿颅骨畸形影响患者容貌和发育,并会导致局部触痛、易怒、不安等症状,需要 通过手术重建出规则的颅骨形状。但目前手术方案设计多依据医生的经验,缺乏标准的 目标形状作指导,手术时间长,重建效果需要提升。针对这一问题,利用曲面的主曲率和 高斯曲率分布为依据,对正常的颅骨形状特征进行曲率分析,获得了分区域的曲率值分布 范围;通过有限元及实体仿真实验,研究了不同接触结构及不同骨瓣参数对重建模型力学 性能的影响;针对具体病例,基于计算机断层扫描(CT)图像重建颅骨三维模型,并进行曲 率分析,与正常颅骨曲率分布进行比较,制订出重建修复方案,并设计和打印手术切割模 板,临床手术时在模板引导下完成重建手术。实际应用表明,术前额骨部位高斯曲率极值 为-0.05200和0.00023,术后降低至正常范围,颅骨重建的效率和形状恢复效果得到了 显著提高。

关键词 颅骨畸形重建;曲率分布;有限元分析;手术导板

根据每年8296万左右临床新生儿计算,颅骨畸形的患儿每年大约有4.96万人。颅骨畸形总体分3大类:因颅缝早闭等引起的狭颅症,脑积水等原因引起颅内压力增高导致的巨颅症,以及因为颅骨肿瘤、颅脑外伤等原因引起的颅骨缺损<sup>[1-2]</sup>。

狭颅症作为颅骨畸形的一种,是一条或多条颅 缝过早闭合而引起的,临床上表现出头颅畸形、颅内 压异常增加、智力发育受限等一系列症状<sup>[3]</sup>。颅骨 由额骨、顶骨、颞骨、枕骨、蝶骨等多块骨骼构成,每 块颅骨在婴儿刚出生时都是分离的,骨与骨之间存 在纤维连合,称为骨缝<sup>[46]</sup>。在颅骨生长发育期间, 各个骨瓣之间既要相互连接,又要分离生长<sup>[78]</sup>,两 者和谐平衡发展,使得颅脑体积基本固定。随着小 儿生长发育,颅骨骨缝逐渐骨化,实现骨瓣连结,直 到2岁以后颅缝才完全骨化<sup>[9-11]</sup>。在颅骨生长过程 中,若颅缝骨化进程受到影响,即可发生病变<sup>[12-14]</sup>。 某一条颅缝或多条颅缝过早融合会影响颅骨的生长 与颅腔的发育,而脑组织却仍然会继续发育长大,导 致颅骨发生代偿性增大,形成各种头颅畸形<sup>[15]</sup>。

颅骨畸形通常需要通过手术进行重建,以帮助 构建出正常颅骨形状,为脑组织发育提供良好空 间<sup>[16]</sup>。在颅骨形状设计研究方面,Khechoyan 等 人<sup>[17]</sup>利用三维模型事先设计出重建的眼眶形状,在 手术中切割下眼眶骨瓣修正成需要的形状。Zakhary 等人<sup>[18]</sup>采用骨瓣和桶形切口进行整形治疗。 Robertson 等人<sup>[19]</sup>利用与正常颅骨的距离,制作云图 用来指导小儿颅骨畸形的重建。上述研究切割颅骨 的预定路径设计多依据医生的经验,没有较为标准 的形状目标作为理论依据。在颅骨形状维持研究方 面,Laure 等人<sup>[20]</sup>使用一种新型的简化拼接模板,一

③ 通信作者, E-mail: wang\_ning@zju.edu.cn。 (收稿日期:2022-10-26)

① 国家自然科学基金面上项目(52175280,51775506)和浙江省自然科学基金重大项目(LD22E050013)资助。

② 男,1976年生,博士,教授;研究方向:数字化医学技术;E-mail: liuyf76@126.com。

定程度上方便了拼接,但需要在颅骨长好后进行二次手术拆除,对小儿造成二次伤害。Yamaguchi等人<sup>[21]</sup>使用可伸缩的牵引工具和螺钉固定住松散的骨瓣,用来达到锁合分散骨瓣的目的,但是存在大脑不能撑开颅骨继续发育的风险,可能会造成再次的畸形。上述研究缺乏对颅骨形状维持的优劣进行评估的方法。

本文以一名矢状缝早闭患儿颅骨畸形为例,通 过高斯曲率及特征权值分析颅骨的畸形程度,制定 重建方案,并从力学角度出发,提出一种既可以保持 生理结构的形状又能保持需要的颅缝空隙的拼接设 计方法,为小儿颅骨畸形重建手术在临床上提供新 的设计方法。

# 基于高斯曲率和主曲率的小儿颅骨 曲面特征分析

人体颅骨呈现明显的曲面特征,正常颅骨与畸 形颅骨的曲面特征会有明显不同。曲面的高斯曲率 和主曲率是曲面特征分析的主要依据。

## 1.1 曲面的高斯曲率和主曲率

从平面区域 D 到空间 R3 的曲面定义为

S(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v)) (1) 式中,  $(u,v) \in D$ 是曲面的参数; x(u, v), y(u, v), z(u, v) 是参数方程,不同的曲面表达其参数向量和 参数方程不同<sup>[22]</sup>。

曲面上曲率的定义如图 1 所示,曲面 *S* 上点 *P* 处的法曲率是关于切方向的 2 个最大和最小值,分别称为曲面 *S* 在点 *P* 处的主曲率;使得法曲率达到极值的 2 个切方向分别称为曲面 *S* 在点 *P* 处的主方向。



高斯曲率定义为:对于正则曲面S,其在点P处的2个主曲率 $k_1$ 、 $k_2$ 的乘积K,称为其在点P处的高斯曲率,记为

$$K = k_1 k_2 \tag{2}$$

高斯曲率反映了曲面的一般弯曲程度,又称总 曲率。利用高斯曲率分析颅骨的凹凸程度,最大最 小主曲率方向描述弯曲的方向,利用生理上的骨缝 作为颅骨曲面划分的边界,可以实现颅骨分区,为制 订畸形修复的方案提供数据支持。

### 1.2 正常颅骨的曲率特征分析

小儿颅骨结构包括顶骨、额骨、枕骨(含后囟), 其边界可以用来分割颅骨曲面,边界的提取通过 Rhino v6.0 软件的边界提取功能实现,提取效果如 图 2 所示。根据分割的结果来分块描述颅骨曲面特 征,高斯曲率均值后的云图结合分割区域如图 3 所 示。

额结节位于额骨上红色区域,在颅骨中红色区域 高斯曲率的计算值分布范围为 0.004 305 ~ 0.000 525, 均值为 0.000 096,高斯曲率大于 0,为凸的形状。 为了描述这个区域的弯曲方向,最大主曲率的方向 如图 4 所示呈旋涡状类球面,经分析可以确定该区 域为近似椭圆面。





图 4 额结节主方向趋势

额骨上除额结节的红色区域外,还有蓝色区域, 如图5所示,将额骨部分按照颜色分布分为4个 区域,蓝色区域的高斯曲率范围为-0.004740~ -0.000110,绿色区域的高斯曲率范围为0.000145 ~0.000189。经分析,蓝色第1区域的形状为椭圆 形,蓝色第2区域为较为平坦的曲面或者为双曲面 的形状,可以都近似看做较平坦的部位。根据最大 主曲率方向和截平面截得的形状,第3区域为类椭 圆。可以看到,采用高斯曲率均值和主方向的均值 (图 6)可以很好地描述小儿颅骨的形状。



图 5 额骨分区

图6 额骨主方向均值

类似额结节的描述方法,顶结节大概在顶骨的 中间部位,如图7所示,该红色区域的高斯曲率计算 值范围为 0.003 808~0.000 531, 看作额结节, 均值 为0.000660,高斯曲率大于0,为凸的形状。最大 主曲率的方向如图 8 所示也呈旋涡状的形式,在此 区域的中间结构点做一个切平面,并向下移动截到



图 8 顶结节主方向趋势

相应的图形,可以得出这个区域也是近似椭圆面的 区域。

顶骨颜色分区分为上部、中部、下部,位置如图 9 所示,顶骨上除了顶结节的红色区域,还有一部分绿 色和蓝色区域,绿色区域集中在顶骨的上半部分,蓝 色区域集中在中间部分,顶骨的下半部分靠近颞骨, 因此该部位会有一定的凸起,表现为高斯曲率值较 大。图 10 中的圆圈部位表示顶结节区域,这里虽然 不是红色区域,但是仍然是该部位高斯曲率值最高 的部位,因此可以认为该区域为顶结节。绿色区域的 高斯曲率范围在 - 0.000 145 ~ 0.000 189,蓝色区域的 高斯曲率范围在 - 0.004 740 ~ - 0.000 110。在 3 个区域的中间结构点做切平面,并向下移动截到相 应的图形可以得出上部绿色区域为近似圆柱面或者 椭圆面,向下弯曲,中部蓝色区域较为平坦,近似平 面,绿色部位近似椭圆面。





图 10 顶骨上部主方向趋势

枕骨有一个后囟区域,该区域为绿色区域,最大 主曲率方向走向如图 11 所示,结合切平面截得图形 可得该区域近似球面。其他区域如图 12 所示,有部

— 432 —

分小区域为红色,该部分不作为颅骨形状特征因此 可以忽略,由理论分析可知该部位中间近似平面,两 侧近似椭球面。





经过分区域的高斯曲率分布范围的分析和主曲 率特征分析,可以获得整个颅骨瓣的曲面特征,其主 要由平面、球面、双曲面、椭球面等二次曲面组成, 表1总结列出了颅骨具体的分区特征值分布范围和 二次曲面特征。

#### 1.3 畸形程度评估及分类

根据上述形状分析,手术中会经常用到一些评价畸形的颅骨特征,对这些特征进行一个量化的评估等级,并且通过公式计算可以评估出小儿颅骨畸形的程度。本文考虑每一个特征对其他形状特征的影响和本身形状特征的高斯曲率,高斯曲率越大的不管是凸型还是凹型的颅骨骨瓣,都会有较大的整形难度,对于其他形状特征的影响也可以看出此结构特征的重要性,权值为影响其他特征:位置、形状0.5,本身权值1,高斯曲率的均值的4次方。

表2设计的计算公式是通过对颅骨形状畸形的 部位的权值相加计算得到一个值来评估畸形的程 度,本文将畸形程度分为3类,表3为权值计算结 果。

颅骨区域	区域高斯曲率范围	区域特点
额结节	0.004 305 ~ 0.000 525,均值为 0.000 960	最大主曲率的方向呈旋涡状类似球面
额骨	蓝色区域的高斯曲率范围 – 0.004 740 ~ – 0.000 110, 绿色区域的高斯曲率范围 0.000 145 ~ 0.000 189	蓝色1区域为椭圆形,蓝色2区域近似平面或为 双曲面的形状,3区域为类椭圆
顶结节	0.003808~0.000531,均值为0.000660	最大主曲率的方向呈旋涡状的形式,椭圆面
顶骨	0.003 808 ~ 0.000 531,均值为 0.000 660	上部绿色区域为近似圆柱面或椭圆面,向下弯曲,中部蓝色区域近似平面是较为平坦的曲面, 绿色部位近似椭圆面
后囟	绿色区域的高斯曲率范围 0.000 145~0.000 189	近似球面
枕骨	红色区域 0.004 305 ~ 0.000 525,均值为 0.000 960, 蓝色区域的高斯曲率范围 - 0.004 740 ~ - 0.000 110, 绿色区域的高斯曲率范围 0.000 145 ~ 0.000 189	有部分小区域为红色,该部位中间近似平面,两 侧近似椭球面

表1 颅骨瓣的曲面特征

表 2	特征权值计	算

特征名称	特征权值计算
额结节	1+头矢状弧形状0.5+高斯曲率均值9.6
顶结节	1+头矢状弧形状0.5+高斯平均曲率6.6
额宽	1 + 额结节位置 0.5 + 高斯曲率均值 - 0.8
头矢状弧	1 + 整体长度 1 + 头冠状弧位置 0.5 + 额结节位置 0.5 + 顶结 节位置 0.5 + 额骨高斯曲率均值 - 0.8
头冠状弧	1 + 整体宽度 1 + 额结节位置 0.5 + 额结节和顶结节高斯曲率 平均(9.6 + 6.6)/2
颏顶围	1+整体长度1+顶结节位置0.5
头水平围	1 + 整体长度 1 + 整体宽度 1 + 顶结节位置 0.5 + 额结节位置 0.5 + 额结节高斯曲率均值 9.6 + 额骨高斯平均曲率 - 0.8

表3 权值

特征名称	额结节	顶结节	额宽	头矢状弧	头冠状弧	颏顶围	头水平围
权值	8.1或28.1	11.1或31.1	0.7	2.7	10.6	2.5	12.5

顶结节或额结节与其他特征结合时权值扩大 20,于是得到骨瓣畸形的分类:1类计算值小于等于 12;2类计算值小于 20 大于 12;3 类计算值大于等 于 20。

根据高斯曲率从低到高的部分取均值与正常的 比较,可以分析结节是否缺失,平坦部分是否凸起或 凹陷,球形椭球型部分是否变平坦。正常小儿颅骨 形状的定义为高斯曲率值和主方向接近标准小儿颅 骨。高斯曲率值不在正常形状范围内和主方向偏移 较大的修正方法有:(1)高斯曲率尽量寻找符合正 常范围的骨瓣替代;(2)主方向偏移可以分割骨瓣 实现。 2 小儿颅骨畸形重建的骨瓣拼接结构 仿真分析及实验测试

骨瓣不同接触结构对于不同方向移动的限制能 力存在差异,通过有限元仿真分析及实体仿真模型, 研究不同接触结构及不同骨瓣参数对重建模型力学 性能的影响。

#### 2.1 颅骨拼接结构的力学仿真分析

接触部位需要抵抗水平、垂直方向的移动和转动,不同的重建设计方案,接触部位的力学需求不同,可能需要抵抗其中的一种或者多种,因此需要对

不同的拼接结构分析其限制不同方向移动的能力。

为了限制骨瓣的移动,除了手术线的固定,还需 要拼接结构来限制骨瓣的移动。由于术后小儿颅骨 的受力情况较复杂,骨瓣可能会产生某个方向的直 线移动或者是转动。受限于小儿颅骨本身的形状和 材料属性及手术操作难度,接触结构不适合设计过 于复杂的结构,因此经常选取梯形齿和燕尾形的接 触结构。本文先讨论常用的梯形齿,对其进行有限 元仿真,分析2种形式的梯形齿以及不同形式会不 会有较大的应力区别;并且分析不同弹性模量的齿 在相同的接触条件下会不会有较大的应力区别,此 分析模拟的是手术中可能会有骨量不足的骨瓣做锯 齿时的情形。ABAQUS的分析模型如图 13 所示,有限元模型的尺寸为梯形齿的上底为 1 mm、下底为 3 mm,设计了 3 个梯形齿做接触,接触模型的整体宽度为 5 mm,模型的厚度为 3 mm。参考成人颅骨弹性模量,将模型分为 3 个部分分别设置其弹性模量为 10 000 MPa、5 000 MPa 和 2 500 MPa。大梯形齿的梯形,上底 16 mm、下底 24 mm、高度 6 mm,模型厚度 3 mm,设置弹性模量 10 000 MPa。泊松比都设置为 0.3,边界条件设置为在上部梯形齿右端加 0.2 mm 的位移,下部梯形齿下端设置全约束,接触条件设置通用接触。



图 13 ABAQUS 分析模型

梯形齿的有限元分析结果如图 14 所示,按照左侧应力表获得的曲线图如图 15 所示,各模型的最大最小应力如表4 所示。可见3 个齿用不同的弹性模

量不会特别影响梯形齿的应力大小,但是中间齿的 弹性模量较大时整个接触的最大应力较小。调整不 同齿的弹性模量会对应力的分布有较大的影响,应





表 4 最大最小应力

有限元模型	最小应力/MPa	最大应力/MPa
梯形齿中间齿弹性模量较大	$1.340 \times 10^{-7}$	$6.299 \times 10^{3}$
梯形齿最外齿弹性模量较大	$2.475 \times 10^{-7}$	$2.088 \times 10^{3}$
大梯形齿	9. 521 × 10 <sup>-7</sup>	$2.797\times10^2$

力大的地方主要集中在弹性模量较大的齿上。对于 矩形齿类似于一个小梯形齿的接触结构,应力会比 3个梯形齿接触的应力大。因此多个梯形齿有分担 应力的能力,但是多个齿会增加重建手术的难度。 在重建手术过程中对于齿形的选择可以根据可能的 受力多少选择接触结构。

齿形接触结构的有限元分析结果如下:(1)对 于梯形齿结构,弹性模量大的部位受力较大,但是弹 性模量较大的齿在侧边时应力会较小;(2)对于大 梯形齿形接触结构,受力情况只与接触部位的位置 情况有关,离接触部位远的地方应力较小。

# 2.2 颅骨拼接结构的实体仿真模型实验

本研究搭建骨瓣拼接实验平台,如图 16 所示。 该平台主要由平台主体、小儿颅骨软胶模型、磁力表 座、弹力皮筋、一块 500 mm × 500 mm × 3 mm 不锈钢 板构成。不锈钢板用于固定磁力表座和放置小儿颅 骨软胶模型,磁力表座用于固定弹力皮筋模拟头皮 张力加载,弹力皮筋用于模拟头皮张力。



图 16 实验台

模拟骨瓣的成型选择选择性激光烧结(selective laser sintering, SLS)成型。SLS又称激光选区烧结, 它是采用二氧化碳激光器作为热源来烧结粉末材 料,并以逐层堆积方式成型三维零件的一种快速成 型技术。成型所用尼龙材料属性如表5所示。

表 5 材料属性表

一般物性	XF 1200PA 尼龙 12 粉末	
粉末松装密度	0.49 g $\cdot$ cm <sup>-3</sup>	
密度	0.98 g $\cdot$ cm <sup>-3</sup>	
颜色	白色	
拉伸强度 GB/T 1040.2-2006	45.0 MPa	
拉伸模量 GB/T 1040.2-2006	1 600. 0 MPa	
弯曲强度 GB/T 9341-2008	46.1 MPa	

本文验证了几种拼接结构对不同方向位移的锁 合能力,设计的结构有锯齿形、燕尾形、2个燕尾形, 并讨论锯齿形及燕尾形结构限制旋转和平移的能 力。设计好骨瓣后用 SLS 打印的方式制作出骨瓣。

对于锯齿形接触结构的部位,在该部位设计保 留了1 cm 左右的骨缝,在骨瓣两端施加模拟的头皮 张力使该部位有较大的受力,拼接情况如图 17(a) 所示。该部位对于分离移动没有太好的限制,但是 对于垂直齿方向的移动会有较好的限制。

对于燕尾形接触结构的部位,在骨瓣两端施加 模拟的头皮张力使该部位有较大的受力,拼接情况 如图 17(b)所示。该部位有较好的限制分离移动的 能力,锁合能力较好,但是在手术实施上会有较大的 难度,限制移动的接触不易实现。



3 基于曲率特征的颅骨畸形精确重建

利用颅骨分块的曲面特征分布,可以针对具体的病例畸形,进行高斯曲率分析,并将其与标准颅骨的曲率分布进行对比,得出畸形整复的目标形状,并

制订出合理的畸形重建方案,设计用于颅骨瓣切割 的个性化手术模板并结合 3D 打印,获得用于引导 手术操作的模板,实现精准的临床手术操作。

### 3.1 颅骨三维模型重建及畸形分析

项目团队近10余年来,基于颅骨曲率特征分析 方法,结合小儿颅骨重建设计流程,在浙江大学医学 院附属儿童医院神经外科已经完成了 30 余例的颅 骨畸形精确重建手术,均取得了较好的临床效果。 图 18 病例照片是一例于 2017 年 3 月在浙江大学医 学院附属儿童医院就诊的男性患儿,首次就诊年龄 为11个月,患儿矢状缝早闭,额骨、枕骨凸出,颅骨 前后径较长。



图 18 病例患者颅骨顶部

对患者进行计算机断层(computed tomography, CT) 扫描,并将 DICOM 格式图像导入 Mimics 软件中; 调整图像亮度,在阈值选择骨骼灰度值范围,牛成蒙 版;利用"区域增长",建立相应的三维模型,将获得的 三维模型保存成 STL 格式。将 STL 格式三维模型导 入 Rhino 软件中,如图 19 所示,分析颅骨畸形信息, 帮助医生初步拟定颅骨重建的手术路线。



图 19 手术前三维模型

#### 3.2 颅骨重建方案规划

在 Rhino 中进一步进行曲面特征分析, 生成的 高斯曲率图如图 20 所示。可以看到,额骨部位红 色、绿色区域较大,存在额结节,但顶结节部位缺失, 顶骨、枕骨部位高斯曲率分布正常。根据正常颅骨 曲面曲率分布的特点,可以初步确定额骨部位高斯 曲率较大,经分析其高斯曲率极值为-0.05200和 0.00023,即内凹和外凸幅度均超出正常范围,需在 该部位矫正为较平坦的骨瓣:顶骨部位的顶结节区 域可以找到,可以将该骨瓣替换到枕骨前面的正常 位置,并将畸形的骨瓣移至他处,拼接位置可选择骨 瓣较厚的骨缝处。基于此初步方案,与医生讨论后 确定合适的最终手术方案,模拟的手术方案如图21



图 20 畸形颅骨高斯曲率图



(a) 前顶视图

图 21 畸形颅骨模拟重建方案

所示,在 Magics 中切割出需要的骨瓣并且设计出相 应的手术导板,并用医用 PLA 材料 3D 打印出手术 导板。

## 3.3 基于模板的临床手术及效果

利用 3D 打印的手术模板,可以实施精准的手 术操作,将电脑中虚拟的三维手术方案在临床中精 准实现。手术时,在小儿颅骨头皮划线后切开用雷 尼夹夹住头皮,将手术模板与颅骨进行贴合匹配后

划线,并用颅骨铣刀切开颅骨。切开一定长度后先 让部分颅骨与硬脑膜分离,方便之后的切割;沿着所 有的切割路线切割好后将颅骨与硬脑膜分离,分离 后根据需要在模板引导下进行颅骨片的形状修整; 然后将修整后的颅骨骨瓣放在预先设计的位置并固 定,最后缝合头皮,图22 为重建手术方案精准实施 情况。图 23 为术后恢复情况,术后颅骨与手术刚结 束后的形状接近,可见实施颅骨精准重建后可以较 好保持术后形状。对术后 CT 影像进行重建分析,得到 其高斯曲率值范围为 -0.000 70 ~0.000 09,在整体 额骨区域正常高斯曲率 -0.004 740 ~0.0000 189 范围内。



(a) 3D打印的手术模板

(b) 基于模板进行颅骨切割

图 22 基于模板的颅骨精准重建手术



图 23 手术后患者情况

# 4 结论

针对小儿颅骨畸形整复,提出了一种利用颅骨 曲面分块进行高斯曲率分布和曲面特征构建的精确 重建方法,获得了正常颅骨分块的曲率分布范围和 二次曲面特征类型。针对具体病例,将其曲率分布 特征与正常颅骨特征进行比较,获得重建正常颅骨 的目标形状并拟定畸形整复的三维重建方案;并设 计用于引导实施临床手术的个性化手术模板,术中 利用 3D 打印的手术模板引导进行颅骨切割和固 定,将设计的理想手术方案在临床中精准实现。临 床应用表明,基于颅骨曲面曲率特征分析制订的个 性化手术方案,通过数字化设计和 3D 打印的个性 化手术模板可以在临床中精准实现,保证较好的术 后重建效果。

#### 参考文献

- [1] 吴颖之, 彭美芳, 穆雄铮. 先天性颅缝早闭症的遗传 学研究进展[J]. 中华整形外科杂志, 2021,37(2): 241-246.
- [2]周红建,王雄伟.颅缝早闭诊治的研究进展[J]. 实用 医学杂志,2010,26(23):4280-4282.
- [3] POGGI J, CHEN W S, TAYLORH O, et al. Revisiting the resolution of Chiari malformation in nonsyndromic craniosynostosis: a case of posterior cranial vault reconstruction in secondary pan-suture synostosis[J]. World Neurosurgery, 2020,143(1):158-162.
- [4] 沈志鹏. 计算机辅助设计在小儿颅骨畸形治疗中的临床应用[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- [5] CHO D Y, BIRGFELD C B, LEE A, et al. A comparison of subgaleal versus subperiosteal dissection in open cranial vault expansion for sagittal craniosynostosis [J]. World Neurosurgery, 2020,143(1):108-113.
- [ 6] AMENT C, HOFER E P. A fuzzy logic model of fracture healing[J]. Journal of Biomechanics, 2000,33(8):961-968.
- [7] BRESSAN S, MARCHETTO L, LYONS T W, et al. A systematic review and meta-analysis of the management and outcomes of isolated skull fractures in children [J]. Annals of Emergency Medicine, 2018,71(6):714-724.
- [8] XIA T, BAIRD C, JALLO G, et al. An integrated system for planning, navigation and robotic assistance for skull base surgery [J]. The International Journal of Medical Robotics Computer Assisted Surgery, 2010,4(4):321-330.
- [9] LI X, ZHU W, HE J, et al. Application of computer assisted three-dimensional simulation operation and biomechanics analysis in the treatment of sagittal craniosynosto-

sis[J]. Journal of Clinical Neuroscience, 2017, 4(4): 323-329.

- [10] CLAES L E, HEIGELE C A. Magnitudes of local stress and strain along bony surfaces predict the course and type of fracture healing[J]. Journal of Biomechanics, 1999, 31(3):255-266.
- [11] RODRIGUEZ-FLOREZ N, IBRAHIM A, HUTCHINSON J C, et al. Cranial bone structure in children with sagittal craniosynostosis: relationship with surgical outcomes[J]. Journal of Plastic Reconstructive & Aesthetic Surgery, 2017,70(11):1589-1597.
- [12] SUGAWARA Y, UDA H, SARUKAWA S, et al. Multidirectional cranial distraction osteogenesis for the treatment of craniosynostosis [J]. Plastic & Reconstructive Surgery, 2010,126(5):1691-1698.
- [13] ANDERSON P J, NETHERWAY D J, MCGLAUGHLIN K, et al. Intracranial volume measurement of sagittal craniosynostosis [J]. Journal of Clinical Neuroscience, 2007, 14(5):455-458.
- [14] RODRIGUEZ-FLOREZ N, FLOREZ-TAPIA A, JEELANI N, et al. Investigating the cause of late deformity following fronto-orbital remodelling for metopic synostosis using 3D CT imaging [J]. Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, 2018,47(1):170-178.
- [15] RIORDAN C P, ZURAKOWSKI D, MEIER P M, et al. Minimally invasive endoscopic surgery for infantile craniosynostosis: a longitudinal cohort study[J]. The Journal of Pediatrics, 2020,216(3):142-149.

- [16] LU S, LUO Y, ZHENG W, et al. Simulation method of skull remodelling surgery for infant with craniosynostosis
   [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2021, 38(5): 932-939.
- [17] KHECHOYAN D Y, SABER N R, BURGE J, et al. Surgical outcomes in craniosynostosis reconstruction: the use of prefabricated templates in cranial vault remodelling
  [J]. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery, 2014,67(1):9-16.
- [18] ZAKHARY GM, MONTES D M, WOERNER J E, et al. Surgical correction of craniosynostosis. a review of 100 cases[J]. Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, 2014, 42(8):1684-1691.
- [19] ROBERTSON E, KWAN P, LOUIE G, et al. Test-retest validation of a cranial deformity index in unilateral coronal craniosynostosis[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2020,23(15):1-14.
- [20] LAURE B, LOUISY A, JOLYA, et al. Virtual 3D planning of osteotomies for craniosynostoses and complex craniofacial malformations [J]. Neurochirurgie, 2019,65 (5):269-278.
- [21] YAMAGUCHI K, IMAI K, FUJIMOTOT, et al. Cranial distraction osteogenesis for syndromic craniosynostosis: long-term follow-up and effect on postoperative cranial growth[J]. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery, 2014,67(2):35-41.
- [22] 王国瑾, 汪国昭, 郑建民. 计算机辅助几何设计[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.

# Pediatric craniosynostosis reconstruction using surface curvature feature analysis

LIU Yunfeng\*\*\*, XU Lueqian\*\*\*, YOU Jia\*\*\*, ZHANG Qiyu\*\*\*, JIANG Xianfeng\*\*\*, WANG Ning\*\*\*

(\*School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

(\*\* Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education

and Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou  $310023\,)$ 

(\*\*\*\* Neurosurgery Department, Affiliated Children Hospital of School

of Medicine, Zhejiang University, Hangzhou  $310057\,)$ 

## Abstract

Pediatric craniosynostosis affects the appearance and growth of the child, and leads to contacting pains, easy angry and anxiety, so surgical treatment of skull reconstruction is required for this disease. At present, because of lacking of objective shape of a standard head, the reconstruction planning mainly depends on the surgeon's experience, which usually takes long surgical time and gets low quality reconstruction outcomes. Aiming at this problem, utilizing the principle curvature and Gauss curvature distributions as feature parameters, shape feature analysis of normal skull surface is conducted, and curvature value distribution extents of different surface regions are acquired. The effects of different contact structures and bone flap parameters on the mechanical properties of the reconstructed model are studied through finite element and physical simulation tests. For specific case, the 3D model of the skull is reconstructed based on the CT images, and the curvature analysis is performed by making a comparison with the distribution of the normal skull curvature. After designing and printing out the surgical templates, the reconstruction surgeries are conducted efficiently with the guiding of 3D printed templates. The results show that the ultra-Gaussian curvature of the frontal bone is -0.05200 and 0.00023 before the operation, and it is reduced to normal after the operation. The efficiency of skull reconstruction and the effect of shape recovery have been significantly improved.

Key words: craniosynostosis reconstruction, curvature distribution, finite element analysis, surgical template