

仿生咀嚼装置设计与试验\*

孙钟雷<sup>1,2</sup> 孙永海<sup>1</sup> 万鹏<sup>3</sup> 李君兴<sup>4</sup>

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 长江师范学院生命科学与技术学院, 重庆 408100;  
3. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 4. 吉林省农业机械研究院, 长春 130025)

【摘要】 模仿人类咀嚼系统,利用仿生技术设计了一种用于粉碎食物的仿生咀嚼装置。采用逆向工程方法设计制作了仿生牙齿、仿生颞下颌关节等零部件,并组装成咀嚼装置,实现了三维咀嚼运动,确定了运动参数。咀嚼功能测试结果表明,本装置的咬合力可达到咀嚼食物的力量,并且可根据食物的不同而改变;本装置的咀嚼效率和受试者无显著差异,最大值可达92.3%;重复试验无显著差异,本装置稳定可靠。

关键词: 仿生学 咀嚼模拟 咬合力 咀嚼效率

中图分类号: Q811.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)08-0214-05

Design and Experiment on Bionic Chewing Equipment

Sun Zhonglei<sup>1,2</sup> Sun Yonghai<sup>1</sup> Wan Peng<sup>3</sup> Li Junxing<sup>4</sup>

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China  
2. Department of Life Science and Technology, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China  
3. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China  
4. Jilin Provincial Academy of Agricultural Machinery, Changchun 130025, China)

Abstract

A bionic chewing equipment was developed for food breakdown by simulating the masticatory system and using the bionic technology. Some parts were designed and assembled by reverse engineering method, like bionic teeth and temporomandibular joints. The equipment could realize 3-D chewing motion, the movement parameters were determined. Test of occlusive force showed that chewing force of equipment could break food and change with food. Masticatory experiment showed that masticatory efficiency of the equipment had no significant difference with subjects and its maximum value was 92.3%. The bionic chewing equipment was stable and reliable.

Key words Biomimetic, Chewing simulation, Occlusive force, Masticatory efficiency

引言

为了研究咀嚼系统,近年来,人们研制了多种咀嚼模拟器。Christian M 等<sup>[1]</sup>研制的双轴咀嚼模拟机,能实现垂直、水平方向加载,用于牙体材料的摩擦试验。Xu W L 等<sup>[2]</sup>研制的6RSS并联机构咀嚼机器人,能模拟人的咀嚼动作粉碎食物。Salles C 等<sup>[3]</sup>研制的咀嚼模拟装置,可通过减速电动机、人造上下颌牙齿的旋转、挤压运动磨碎食物,通过气味

收集器分析食物团挥发出的气味。Woda A 等<sup>[4]</sup>模拟咀嚼运动,利用两个带凸台的金属圆盘相互旋转挤压磨碎食物,并可分析物料破碎度。Pauline P 等<sup>[5]</sup>研制了由密闭容器、齿形活塞、可变速电动机等组成的咀嚼模拟器,通过压碎面包,分析面包释放的香气。这些咀嚼模拟器在咀嚼部件上,大多是圆盘、齿形活塞等,没有真正模仿牙齿、牙列形态结构;虽然有的模拟器使用了牙齿模型或人颌骨,但是这些模型或标本机械性能差,能承受的咀嚼力小。在

收稿日期: 2011-03-15 修回日期: 2011-04-17

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA100802)

作者简介: 孙钟雷,博士生,长江师范学院讲师,主要从事农产品智能检测与评价研究,E-mail:jlu.sz@163.com

通讯作者: 孙永海,教授,博士生导师,主要从事农产品智能检测与评价研究,E-mail:sunyh@jlu.edu.cn

运动形式上,多采用垂直压碎、旋转挤碎等,这与人类咀嚼运动差别较大,对食物粉碎不利。

目前,仿生技术已广泛用于人类器官的模拟设计制作。本文使用仿生技术和逆向工程手段设计仿生咀嚼装置,并进行咀嚼运动分析和咀嚼功能试验,提供一种粉碎食物、形成食物团的机械装置。

## 1 仿生咀嚼装置的设计

### 1.1 主体结构及工作原理

人类咀嚼系统主要包括牙齿、牙周组织、颞下颌关节、颌骨、咀嚼肌等。本文采用激光扫描、断层扫描等方法获取咀嚼器官的形态数据,利用逆向工程软件建立模型、优化结构,然后使用 CAD/CAM 系统加工制作,最后将零部件组装、调试,构建仿生咀嚼装置。主要包括仿生咀嚼器、动力系统、装卸料系统、支撑系统等,主体结构如图 1 所示。仿生咀嚼器包括仿生牙齿、仿生牙周膜、仿生颞下颌关节、仿生颌骨、仿咀嚼肌弹簧、防压柱等。动力系统包括可调速电动机、联轴器、传动轴、偏心轮、圆柱凸轮、凸轮从动件、压板、喂料板刷等。装卸料系统包括丝杠、丝母、舌形送料板、收集管等。支撑系统包括立柱、底板、固定板等。此外,还制作模仿牙龈的橡胶带、模仿脸颊的橡胶皮、自控温电热带、唾液管、微型水泵等。

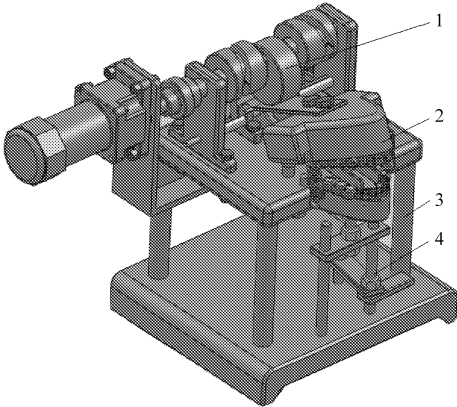


图 1 仿生咀嚼装置结构图

Fig. 1 Structure of bionic chewing equipment

1. 动力系统 2. 仿生咀嚼器 3. 支撑系统 4. 装卸料系统

本装置采用仿生上颌下压、仿生下颌咀嚼食物,采用间歇性送料方式。固体食物块由装卸料系统从仿生下颌底部送入,电动机驱动偏心轮使仿生上颌张开,与此同时圆柱凸轮带动喂料板刷将食物送到后牙齿面上,人造唾液由唾液管流入,仿咀嚼肌弹簧收缩拉动仿生上颌闭颌咀嚼。咀嚼完成后,唾液管中喷出清洗液,喂料板刷清洁仿生牙齿,装卸料系统收集食物残渣。

### 1.2 仿生牙齿的优化设计

牙齿是最直接的咀嚼部件,直接影响咀嚼效果。使用 LSV50 型三维激光扫描系统<sup>[6]</sup>采集亚洲人正常恒牙模型(吉林大学口腔医学院提供)点云数据。结合牙齿形态数据,使用 EDS Imageware 12 软件进行点云数据处理、曲面构建。将牙齿模型曲面文件存成 iges 格式,导入 Unigraphics 6.0 中,采用默认公差缝合,生成实体模型。保留实体模型的牙冠形态结构,将多个牙根结构设计成单个椭圆锥台。利用 ANSYS 10.0 软件对改进前后实体模型进行应力分析,参照牙齿受力设置仿真参数<sup>[7]</sup>。牙齿模型和改进后仿生牙齿模型应力云图如图 2、3 所示。

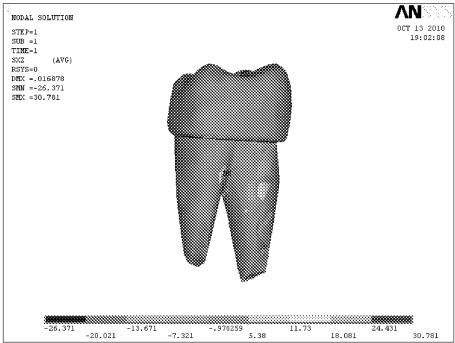


图 2 牙齿模型应力分布

Fig. 2 Stress contour of tooth model

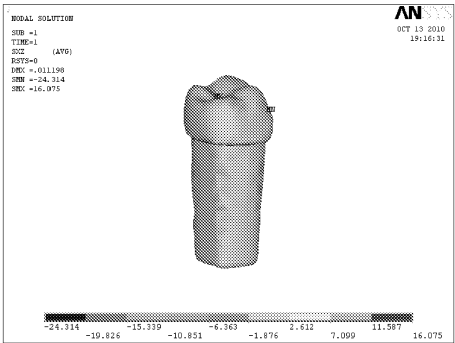


图 3 改进后仿生牙齿模型应力分布

Fig. 3 Stress contour of improved tooth model

从应力云图可见,改进后牙体最大应力值由 30.781 MPa 减小为 24.314 MPa,且应力分布均匀,根部没有出现应力集中。改进后的仿生牙齿避免了根部应力集中,利于加工安装,优于原模型。将改进后模型输入到 CAD/CAM 系统中加工制作,共制作一套 28 颗。采用 Black Delrin 工程塑料,该材料机械强度高、耐压、耐磨,生理惰性,适宜与食物接触。

### 1.3 仿生颞下颌关节的优化设计

颞下颌关节是决定咀嚼运动的主要部件。使用螺旋 CT 扫描仪对成年人颅骨标本进行横断面轴扫,以 Dicom 格式输出断层图像,导入 Mimics 8.1 软件,建立颞下颌关节模型。由于髁突、关节窝形状不规则,而且颞下颌关节不断改建,完全模仿设计并不

合理,结合髁突在关节窝中运动数据,将颞下颌关节模型导入 SolidWorks 2008 软件中优化设计。将仿生髁突简化为圆球和圆柱相冠,圆球为髁突,圆柱为下颌升支,如图 4a 所示,将关节窝简化为球槽,如图 4b 所示。将其配合后模拟运动,可实现仿生髁突的滑动和转动。将优化后模型输入到数控铣床中,制作出双侧仿生颞下颌关节,如图 4c 所示。

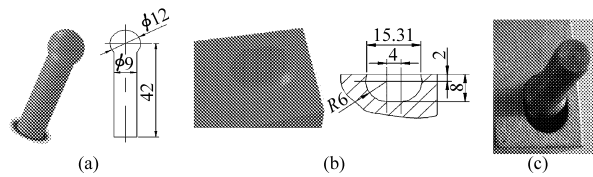


图 4 仿生颞下颌关节

Fig. 4 Bionic temporomandibular joint

(a) 仿生髁突模型 (b) 仿生关节窝模型 (c) 样件

2 咀嚼运动分析

咀嚼运动是下颌运动的一部分,是开闭、前后、侧向运动的综合。本装置的开颌运动是以仿生髁突为支点,通过偏心轮下压仿生上颌来实现的,小开颌运动时,仿生关节窝绕仿生髁突转动;大开颌运动时,仿生关节窝斜向下滑动。闭颌运动通过安置于仿生颌外侧的两根仿咀嚼肌弹簧收缩,拉动仿生上颌实现。前后运动是在开闭颌时,两侧仿生关节窝在仿生髁突上对称滑动实现。侧向运动是一种不对称的运动,当单侧咀嚼时,两侧仿咀嚼肌弹簧拉力不平衡,使得一侧仿生关节窝在仿生髁突上转动,另一侧滑动,从而实现侧向偏移。咀嚼运动如图 5 所示。

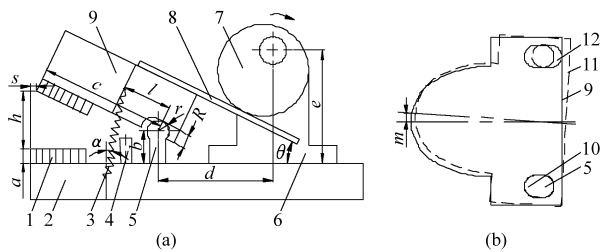


图 5 咀嚼运动示意图

Fig. 5 Sketch map of mastication

(a) 开闭运动和前后运动 (b) 侧向运动

1. 仿生牙齿 2. 仿生下颌 3. 仿咀嚼肌弹簧 4. 防压柱 5. 仿生髁突 6. 支撑板 7. 偏心轮 8. 压板 9. 仿生上颌 10. 仿生关节窝(转动) 11. 仿生上颌(滑移后) 12. 仿生关节窝(滑动)

进行运动分析及力矩平衡计算可知,要使仿生关节窝在仿生髁突上转动,只需选择合适的电动机扭矩或调整仿咀嚼肌弹簧系数;而使仿生关节窝滑动的必要条件是

$$\frac{[d\cos\theta + (b - e)\sin\theta]\tan\alpha}{d\cos\theta + (b - e)\sin\theta + 2l} \geq \mu \quad (1)$$

式中  $b$ ——仿生髁突的安装高度  
 $d$ ——偏心轮轴心与仿生髁突中心间距  
 $e$ ——偏心轮安装高度  
 $l$ ——仿咀嚼肌弹簧安装位置与仿生髁突中心间距  
 $\alpha$ ——仿咀嚼肌弹簧转角  
 $\theta$ ——仿生上颌转角  $\mu$ ——摩擦因数

将装置零部件尺寸、安装位置尺寸以及摩擦因数代入式(1),计算结果满足条件。

开口度  $h$  是指大张口时,上下颌中切牙近中切角间的垂直距离,是开闭运动的重要参数,咀嚼时约 40 mm<sup>[8]</sup>。本装置计算得

$$h = b + c\sin\theta - (R - r)\cos\theta - a(1 + \cos\theta) \quad (2)$$

式中  $c$ ——仿生关节窝中心到仿生上颌前边缘的距离

$R$ ——仿生关节窝深度  
 $r$ ——仿生髁突半径  
 $a$ ——仿生牙齿高度

其中仿生颞下颌关节、仿生牙齿的尺寸在仿生设计时都已确定,因此开口度只与转角有关,根据安装位置及动力系统设计要求,将  $\theta$  设计为 0°~35°,可实现最大开口度为 40 mm。前后伸缩距离  $s$  在咀嚼时约为 2 mm<sup>[8]</sup>,本装置  $s$  计算得 4 mm。侧向偏移距离  $m$  咀嚼时为 2~4 mm<sup>[8]</sup>,本装置可实现最大偏移距离为 4 mm。

3 咀嚼功能试验与分析

3.1 咬合力测试

咬合力是指咀嚼时,咀嚼肌收缩产生的力,是衡量咀嚼功能的重要指标。本装置的咬合力主要靠仿咀嚼肌弹簧收缩实现的,可使用应变电阻式殆力计<sup>[8]</sup>进行测定。仿生咀嚼装置测试条件:仿生口腔温度 37 ℃,人造唾液流速 3 mL/min,电动机转速 68 r/min(相当于人平均咀嚼速度 68 次/min),仿咀嚼肌弹簧弹性系数 40 N/mm。将殆力计咬头置于仿生牙齿间,进行咬合测试,重复测定 3 次,记录最大值。依次测定同侧仿生第二磨牙、第一磨牙、第二前磨牙、第一前磨牙,再测定对侧对应仿生牙齿,结果见表 1。

表 1 仿生咀嚼装置咬合力测试结果

| Tab. 1 Occlusive force of bionic chewing equipment |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| N                                                  |       |       |       |       |
| 位置                                                 | 第二磨牙  | 第一磨牙  | 第二前磨牙 | 第一前磨牙 |
| 左侧                                                 | 381.4 | 324.6 | 280.1 | 236.5 |
| 右侧                                                 | 378.9 | 321.2 | 278.5 | 235.2 |

从表 1 可见,本装置左右两侧对应仿生牙齿咬合力相近,在同侧牙齿中第二磨牙、第一磨牙、第二前磨牙、第一前磨牙咬合力依次减小,与人类牙齿咬合力分布规律相仿。最大咬合力为 381.4 N,超过正常咀嚼咬合力 30 ~ 300 N 范围<sup>[8]</sup>,可达到咀嚼食物力量。本装置设计外径 8 mm、极限拉力 1 000 N、弹性系数 10 ~ 60 N/mm 的弹簧,满足不同食物咬合力的要求。

3.2 咀嚼效率测试

咀嚼效率是衡量咀嚼功能的重要指标,采用筛分称重法测定<sup>[9]</sup>。称取花生粒 3 g(含水率 5%)、胡萝卜丁 4 g(Φ20 mm × 10 mm,含水率 85%)分别咀嚼一定循环后,将咀嚼后的食物团干燥,过筛(孔径 2.4 mm),称量后计算咀嚼效率,计算时乘以干燥系数。对受试者和仿生咀嚼装置同时进行测试。

请 30 位咀嚼功能正常、无任何口腔疾病的志愿者进行咀嚼效率测定,其中,男、女各 15 人,平均年龄 21.5 岁。首先进行咀嚼和吞咽训练,测得花生咀嚼 28 ± 4.2 次可吞咽,胡萝卜 32 ± 8.6 次。然后咀嚼 10、20、28 或 32 个循环,进行咀嚼效率测试。每种样品重复 3 次。

仿生咀嚼装置测试条件:仿生口腔温度 37℃,

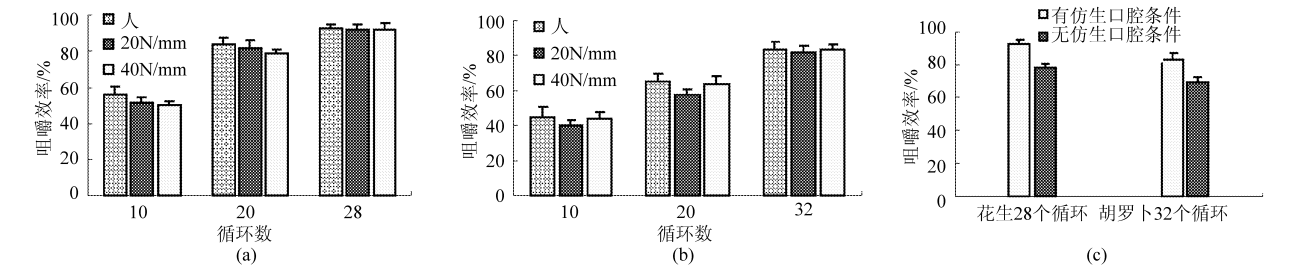


图 6 咀嚼效率分析

Fig. 6 Analysis of masticatory efficiency

(a) 对花生的咀嚼效率 (b) 对胡萝卜的咀嚼效率 (c) 有无仿生口腔环境条件的对比

4 结论

(1)模拟咀嚼系统制作仿生咀嚼装置可行,本装置可以粉碎食物、形成食物团。

(2)仿生优化设计咀嚼器件提高了装置性能;实现了三维咀嚼运动,开口度为 40 mm、前后距离为 4 mm、偏移距离为 4 mm。

人造唾液流速 3 mL/min,电动机转速 68 r/min。咀嚼循环 10、20、28 或 32;咬合力以仿咀嚼肌弹簧弹性系数 20、40 N/mm 计。每种样品重复 10 次。另外,做有、无仿生口腔环境条件的对比试验。

将受试者和仿生咀嚼装置的咀嚼效率数据作图,如图 6 所示。使用 SPSS 软件进行显著性检验,  $P < 0.05$  为显著差异,分析在食物、咀嚼循环次数、咀嚼力等因素影响下,仿生咀嚼装置和受试者咀嚼效率的差异。

在图 6a 中,仿生咀嚼装置咬合力为 20 N/mm 时,咀嚼效率和受试者相近,在图 6b 中,仿生咀嚼装置咬合力为 40 N/mm 时,咀嚼效率和受试者相近。对此 6 组再进行重复试验,并分别对其显著性检验,  $P$  值在 0.16 ~ 0.65 之间,仿生咀嚼装置和受试者咀嚼效率无显著差异。在咀嚼 32 个循环时,本装置的咀嚼效率为 92.3%,受试者的平均咀嚼效率为 92.7%。在图 6c 中,有无口腔温度和唾液对咀嚼效率影响显著,  $P < 0.05$ 。对于仿生咀嚼装置,随着咀嚼次数的增加,咀嚼效率在增大,但增速在减小;咬合力对咀嚼效率影响不显著;食物对咀嚼效率影响显著。重复试验无显著差异,仿生咀嚼装置稳定可靠。

(3)咬合力测试表明,本装置可达到正常咬合力范围,满足不同食物咬合力的要求。

(4)咀嚼效率测试表明,本装置的咀嚼效率和受试者的无显著差异,最大咀嚼效率为 92.3%,受试者的平均咀嚼效率为 92.7%。食物、咀嚼循环、温湿环境对咀嚼效率影响显著。重复试验无显著差异,仿生咀嚼装置稳定可靠。

参 考 文 献

1 Christian M, Soeren S, Klaus L, et al. Wear of composite resin veneering materials and enamel in a chewing simulator[J]. Dental Materials, 2007, 23(11): 1 382 ~ 1 389.

2 Xu W L, Bronlund J E, Pogietr J, et al. Review of the human masticatory system and masticator roboicst[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(11): 1 353 ~ 1 375.

3 Salles C, Tarrega A, Mielle P, et al. Development of a chewing simulator for food breakdown and the analysis of in vitro flavor compound release in a mouth environment[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(2): 189 ~ 198.

4

Woda A , Dutour A M , Batier O , et al. Development and validation of a mastication simulator[J] . Journal of Biomechanics , 2010,43(9) : 1 667 ~ 1 673.

5

Pauline P ,Gaele A , Joele G P ,et al. Use of an artificial mouth to study bread aroma[J] . Food Research International ,2009 , 42( 5 ~ 6 ) : 717 ~ 726.

6

吴娜. 面向仿生应用的金龟子外型测量及量化分析[D]. 长春:吉林大学,2006.  
Wu Na. Measurements and quantitative analysis of geometrical configurations of beetles facing biomimetic applications[D]. Changchun:Jilin University , 2006. ( in Chinese )

7

吴艳玲,鲁成林,张东升,等. 下颌第一磨牙全瓷冠三维有限元建模及力学分析[J]. 口腔颌面修复学杂志,2009 , 10( 2 ) :98 ~ 100.  
Wu Yanling , Lu Chenglin , Zhang Dongsheng , et al. Three-dimensional finite element modeling and mechanical analysis of all-ceramic crowns for the first mandibular molar[J] . Chinese Journal of Prosthodontics , 2009 , 10( 2 ) :98 ~ 100. ( in Chinese )

8

皮昕,李春芳. 口腔解剖生理学[M]. 北京:人民卫生出版社,2007.

9

韩建勋,马楚凡,王美青,等. 三种咀嚼效率测定方法及其影响因素的比较研究[J]. 口腔医学纵横杂志,1997,13( 2 ) : 94 ~ 96.  
Han Jianxun , Ma Chufan , Wang Meiqing , et al. Comparative research on three measuring methods and influential of mastlcatory efficiency[J] . Journal of Comprehensive Stomatology , 1997,13( 2 ) :94 ~ 96. ( in Chinese )

(上接第 213 页)

2

戴旭东,赵三星,袁小阳,等. 内燃机系统动力学与油膜动力学润滑的耦合分析[J]. 西安交通大学学报,2003,37(1) : 56 ~ 59.  
Dai Xudong , Zhao Sanxing , Yuan Xiaoyang , et al. Study on coupling system dynamical behavior to hydrodynamic lubrication in internal combustion engine[J] . Journal of Xi'an Jiaotong University , 2003 ,37( 1 ) :56 ~ 59. ( in Chinese )

3

李震. 内燃机曲轴-轴承系统摩擦学动力学耦合研究 [D]. 合肥:合肥工业大学,2005.  
Li Zhen. Coupling researches on tribological and dynamical behaviors of the crankshaft-bearing system of internal combustion engines[D] . Hefei: Hefei University of Technology , 2005. ( in Chinese )

4

Craig R R , Bampton M C C . Coupling of substructures for dynamic analyses[J] . AIAA Journal , 1968 , 6( 7 ) :1 313 ~ 1 319.

5

Omidreza Ebrat , Zissimos P Mourelatos , Hu Kexin , et al. An elastohydrodynamic coupling of a rotating crankshaft and a flexible engine block[J] . Journal of Tribology , 2004 , 126( 2 ) :233 ~ 241.

6

Mourelatos Z P . A crankshaft system model for structural dynamic analysis of internal combustion engines[J] . Computers and Structures , 2001 , 79( 20 ~ 21 ) :2 009 ~ 2 027.

7

AVL Workspace. Excite-release notes[M]. AVL User Manuals , 2003.

8

Greenwood J A , Williamson J B P . Contact of nominally flat surfaces[J] . Proceedings of the Royal Society of London , Series A: Methemathical and Physical Sciences , 1996 , 295( 1442 ) : 300 ~ 319.