



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101890523 B

(45) 授权公告日 2012. 08. 29

(21) 申请号 201010182847. 8

(22) 申请日 2010. 05. 19

(30) 优先权数据

12/468, 655 2009. 05. 19 US

(73) 专利权人 三菱电机株式会社

地址 日本东京都

(72) 发明人 莎拉·F·福斯肯 罗纳德·N·佩里

阿兰·苏利文

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司

公司 11127

代理人 党晓林

(51) Int. Cl.

B23C 3/00 (2006. 01)

G05B 19/4069 (2006. 01)

(56) 对比文件

US 6483518 B1, 2002. 11. 19,

CN 101062526 A, 2007. 10. 31,

EP 1244061 A2, 2002. 09. 25,

CN 1562542 A, 2005. 01. 12,

US 5710709 A, 1998. 01. 20,

审查员 吴绍群

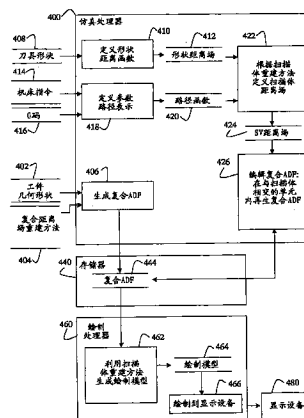
权利要求书 3 页 说明书 12 页 附图 8 页

(54) 发明名称

利用自适应采样距离场仿真数控铣削的方法

(57) 摘要

本发明提供了一种利用自适应采样距离场模拟数控铣削的方法。该方法在处理器上执行,以通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削。生成复合自适应采样距离场(ADF)来表示所述物体,其中所述复合 ADF 包括一组单元。所述复合 ADF 中的每个单元均包括一组距离场和用于在所述单元内重建所述物体的程序重建方法。所述形状由形状距离场表示。所述路径由参数函数表示。根据扫描体重建方法以连续方式定义扫描体距离场以表示通过沿着路径移动形状生成的扫描体,所述扫描体重建方法在采样点重建所述扫描体距离场。编辑所述复合 ADF 以将所述扫描体距离场结合到该复合 ADF 内来模拟所述铣削。



1. 一种通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的方法,所述物体包括一组几何要素,所述方法的步骤通过处理器来执行,所述方法包括以下步骤:

用相应的一组几何要素距离场来表示所述一组几何要素;

生成复合自适应采样距离场即 ADF 来表示所述物体,所述复合 ADF 包括一组单元,每个单元包括:

所述一组几何要素距离场的子集;和

程序重建方法,该程序重建方法将所述几何要素距离场的所述子集合成以重建所述物体的由所述单元表示的部分的复合距离场;

通过形状距离场表示所述形状;

通过参数函数表示所述路径;

定义扫描体距离场,以表示通过沿所述路径移动所述形状生成的扫描体,该扫描体距离场是根据在采样点重建所述扫描体距离场的扫描体重建方法以连续方式定义的,所述扫描体重建方法还包括以下步骤:

以连续方式确定所述参数函数的一组最优参数,所述一组最优参数定义所述形状沿所述路径的最优配置,其中确定所述参数函数的一组最优参数还包括以下步骤:选择所述参数函数的、与所述形状沿所述路径的特定配置对应的特定一组参数;转换所述形状距离场以将所述形状置于所述特定配置;根据转换后的所述形状距离场确定所述采样点的距离数据;以及利用所述距离数据以迭代方式修改所述特定一组参数,直到确定了所述一组最优参数为止;

将所述形状距离场转换为所述最优配置以产生转换后的形状距离场;和

在所述采样点处根据所述转换后的形状距离场确定所述采样点的距离数据以在该采样点重建所述扫描体距离场;以及

编辑所述复合 ADF 以将所述扫描体距离场结合到该复合 ADF 内,所述编辑还包括以下步骤:

根据所述扫描体确定所述复合 ADF 的一组编辑单元;和

在所述一组编辑单元内再生所述复合 ADF,所述再生将所述扫描体距离场结合到所述复合 ADF 的所述一组编辑单元中,以通过沿所述路径移动所述形状来仿真所述物体的铣削。

2. 根据权利要求 1 所述的通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的方法,该方法还包括:

在显示设备上绘制所述复合 ADF。

3. 根据权利要求 1 所述的通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的方法,该方法还包括:

测量所述复合 ADF 和基准物体的表示之间的差以检验所述物体的铣削。

4. 根据权利要求 3 所述的通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的方法,其中,所述基准物体的表示是基准距离场,并且所述差的测量还包括以下步骤:

根据所述复合 ADF 确定在特定采样点的仿真距离数据;

根据所述基准距离场确定在所述特定采样点的基准距离数据;以及

比较所述仿真距离数据和所述基准距离数据以测量在所述特定采样点处所述复合 ADF

和所述基准物体之间的所述差。

5. 根据权利要求 1 所述的通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的方法,其中,所述路径被规定为一组数控机床指令。

6. 根据权利要求 1 所述的通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的方法,其中,所述路径用数控编程语言来规定。

7. 根据权利要求 1 所述的通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的方法,该方法还包括以下步骤:

定义一组距离场标识符;

将唯一标识符分别分配给所述复合 ADF 中的每个距离场;

根据所述复合 ADF 确定包括一组绘制要素的绘制模型,其中,确定每个特定绘制要素还包括以下步骤:

根据所述复合 ADF 的所述距离场的子集确定所述特定绘制要素;

将分配到所述距离场的子集中的每个距离场的所述唯一标识符与所述特定绘制要素相关联;和

根据相关联的所述唯一标识符将一组绘制属性分配给所述特定绘制要素;以及

在显示设备上绘制所述绘制模型。

8. 根据权利要求 7 所述的通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的方法,其中,与所述扫描体距离场相关联的所述唯一标识符标识出所述路径。

9. 根据权利要求 7 所述的通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的方法,其中,所述一组绘制属性包括颜色、不透明度或布尔值,其中所述布尔值确定是否绘制特定绘制要素。

10. 根据权利要求 7 所述的通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的方法,该方法还包括以下步骤:

利用用户界面选择所述显示设备上的图像点;

确定所述绘制模型的与所述图像点对应的一组绘制要素;以及

根据与所述一组绘制要素中的绘制要素相关联的所述距离场标识符确定一组选定的距离场。

11. 根据权利要求 10 所述的通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的方法,该方法还包括以下步骤:

修改所述物体的与所述一组选定的距离场中的特定几何要素距离场对应的特定几何要素;

确定所述复合 ADF 的受所述修改影响的一组修改的单元;以及

在所述一组修改的单元内再生所述复合 ADF。

12. 根据权利要求 1 所述的通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的方法,其中,编辑所述复合 ADF 还包括以下步骤:

确定相交距离场以表示通过铣削所述物体而从该物体移除的材料,所述确定包括:

使所述复合 ADF 和所述扫描体距离场相交以确定所述相交距离场;

根据所述相交距离场测量物理性质,所述测量包括以下步骤:

根据所述相交距离场确定距离数据;和

根据所述距离数据确定所述物理性质。

13. 根据权利要求 12 所述的通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的方法,其中,所述物理性质包括材料体积、表面积、材料质量或者转动惯量。

利用自适应采样距离场仿真数控铣削的方法

技术领域

[0001] 本发明总体上涉及仿真数控 (NC) 铣削, 并且更具体而言涉及利用自适应采样距离场仿真 NC 铣削。

背景技术

[0002] NC 铣削

[0003] 仿真数控 (NC) 铣削的过程在计算机辅助设计 (CAD) 和计算机辅助制造 (CAM) 中是至关重要的。在仿真期间, 用 NC 铣刀的计算机表示和一组 NC 铣刀运动来编辑工件的计算机模型, 以模拟铣削过程。

[0004] 在模拟期间可以显现工件模型和刀具表示, 以检测零件 (诸如工件和刀架) 之间的潜在碰撞, 并且在模拟之后检验工件的最终形状。

[0005] 工件的最终形状受所选刀具和刀具运动的影响。通常根据工件的希望的最终形状的图形表示利用计算机辅助制造系统来产生用于控制这些运动的指令。通常利用数控程序语言 (也被称为预备代码或 G 码, 见以下标准 RS274D 和 DIN66025/ISO6983) 来实现该运动。

[0006] 由计算机辅助制造系统产生的 G 码可能不会产生希望形状的精确复制。另外, NC 刀具的移动受 NC 铣床的马达控制, NC 铣床的马达的速度、运动范围以及加速和减速的能力有限, 使得刀具的实际运动可能不会精确地遵循 NC 机床的指令。

[0007] 工件的实际最终形状和工件的希望形状之间的差异可能非常小。在一些情况下, 这些差异会导致在工件的最终形状的表面中产生不合要求的沟或刻痕, 该沟或刻痕的深度和宽度尺寸为大约几微米, 并且长度为几十微米。

[0008] 通常, 一组 NC 机床指令通过在铣削希望的零件之前铣削由较软的、不太昂贵的材料制成的测试工件来测试。假如测试工件的肉眼检查找出该测试工件中的不合要求的差异, 则可以据此修改 NC 机床指令。

[0009] 该人工测试费时且昂贵。用于加工单个测试工件的时间可能大约数小时, 并且在得到容许的一组 NC 机床指令之前, 可能需要若干次反复。因而, 希望利用基于计算机的模拟和绘制 (rendering) 对这些差异进行测试。然而, 为了检测对于工件来说大约几微米的尺寸的差异, 需要非常精确的计算机模型, 其中该工件可以具有大约 1 米的尺寸。本发明的目的在于提供一种用于表示和绘制这种用于铣削模拟的高精度模型的节省空间和时间的办法。

[0010] 扫描体

[0011] 在铣削期间, 刀具根据在本文中称为刀具路径的指定刀具运动相对于工件移动, 该刀具路径可以包含关于刀具相对于工件的相对位置、方位以及其他形状数据的信息。

[0012] 当刀具沿刀具路径移动时, 刀具雕刻出“扫描体 (扫略体)”。在铣削期间, 当刀具沿刀具路径移动时, 工件与扫描体相交的部分被移除。该材料移除可以作为构造实体几何 (CSG) 差分运算在计算机中模拟, 其中利用从工件减去扫描体的 CSG 减法运算从工件上移除工件的所述部分。

[0013] 为了提供高精度的铣削模拟,必须具有扫描体的精确表示。因而,本发明的一个目的在于提供一种用于表示和绘制扫描体的高精度模型的节省空间和时间的办法。

[0014] 虽然在本文中以 NC 铣削模拟作为一个示例,但是扫描体在科学、工程、娱乐以及计算机图形学等许多领域都有应用。一些具体应用包括例如计算机辅助设计、自由设计、计算机辅助制图、动画制作、实体造型、机器人技术、制造自动化以及可视化。以下描述适用于需要或希望精确表示扫描体的所有领域。

[0015] 虽然这里我们集中在三维坐标系,但是术语“扫描体”一般地说可以延及到 N 维坐标系。特别是,以下讨论也适用于由沿二维空间中的路径移动的一维或二维形状扫描(扫描)出的区域,或者适用于由在高维空间中的路径或表面上移动的形状扫描出的超体积。

[0016] 我们首先回顾本发明的技术领域中的现有技术。扫描体研究中的重要性和挑战的综述存在于“Swept Volumes: Foundations, Perspectives, and Applications”, International Journal of Shape Modeling, 2006, Abdel-Malek, Blackmore and Joy (Abdel-Malek, Blackmore 以及 Joy, 2006, 形状建模的国际期刊,“扫描体:基础、前景以及应用”)。他们断定本领域的研究受到难以在计算机软件中执行复杂的扫描数学表达式的限制,并且计算扫描体的边界遗留了需要更好的可视化工具和更精确的方法的挑战性问题。

[0017] 有时可以以分析法表示沿简单路径移动的简单形状的扫描体,如美国专利 No. 4, 833, 617 所述。然而,那些方法不能推广到复杂形状和复杂刀具路径。

[0018] 若干方法逼近多边形的扫描体。可以在空间层级中对多边形的模型进行编码,如在“Interactive CSG”Proceedings, Technical Sketches, SIGGRAPH, 1999, Butcher (Butcher, 1999, (美国计算机协会)计算机绘图专业组,技术概略,“交互式 CSG”,学报)中用于借助于 CSG 运算有效编辑,或者如在美国专利 No. 6, 099, 573 中用于有效碰撞检测。

[0019] 在“Computing Swept Volumes”, Journal of Visualization and Animation, 2000, Abrams and Allen (Abrams 和 Allen, 2000, 可视化和动画期刊,“计算扫描体”)中描述了用于逼近多边形物体的扫描体的方法。

[0020] 美国专利 No. 6, 862, 560 描述了用于模拟加工的方法,该方法利用了扫描体的多边形模型上的 CSG 运算。在该方法中,工件的边界被装入一组单元中,每个单元均包含对与单元相交的扫描体多边形的参考。特定单元内的工件和扫描体多边形之间的相交点可以应要求而被处理以在小的感兴趣区中产生铣削表面的高精度绘制。然而,以高精度显现全模型非常慢。另外,没有描述扫描体的产生和相交点的处理。

[0021] 美国专利 No. 6, 993, 461 描述了将物体表示为多面体。利用一系列转换以离散时间步长沿路径放置物体。在每个时间步长确定落在扫描体的边界上的多面体表示的边缘和表面,并且连接该边缘和表面以产生扫描体的多面体逼近。

[0022] 这些多边形法中的每一个的精确度都受到对象模型的多边形表示的限制。可能需要数十亿的多边形来精确地表示复杂刀具的曲面,尤其是假如曲率半径小。因而,那些方法具有有限的精确度或者为了产生扫描体的高精度模型而需要非常高的处理时间和内存需求,或者两者都具有。另外,以一系列离散时间步长逼近扫描体的方法在时间步长之间具有有限的精度,并且受赝样锯齿影响 (aliasing artifacts)。

[0023] 用于铣削模拟的另一种普通表示法被称为 Z 缓冲方法或 Dixel 方法。在“Real-time Shaded NC Milling Display”, Proceedings, SIGGRAPH 1986, van Hook (van Hook, 1986, 计算机绘图专业组, “实时修色 NC 铣削显示” 学报) 中描述了该方法。美国专利 No. 7, 149, 668 描述了类似方法, 其中工件由都沿 z 向的直线的网格来建模, 并且通过在网格上移动刀具模型并且修改表示与刀具相交的工件的线的高度来执行铣削模拟。

[0024] Dixel 方法通常受到有限的分辨率的影响, 尤其是受到沿不与 z 轴对准的方向的有限分辨率的影响, 并且不适合产生扫描体的高精度模型。

[0025] Dixel 表示与基于体素的表示有关。“Volume Visualization”, IEEE Computer Society Press, 1991, Kaufman (Kaufman, 1991, 电气和电子工程师协会计算机协会出版社, “体可视化”) 描述了基于体素的表示法以及用于绘制和处理基于体素的表示法的方法。“Sculpting: an Interactive Volumetric Modeling Technique, Proceedings, SIGGRAPH 1991, Galyean and Hughes (Galyean 和 Hughes, 计算机绘图专业组 1991, “造型: 交互式体积模型技术”, 学报), 和 “Volume Sculpting, Proceedings, SIGGRAPH 1995, Wang and Kaufman (Wang 和 Kaufman, 计算机绘图专业组 1995, 体造型, 学报) 都利用与物体的基于体素的表示相关的 CSG 运算模拟造型 (sculpting)。

[0026] 使用二元体素来表示扫描体的方法包括美国专利 No. 6, 044, 306 和 “Method and Apparatus for Shaping Geometric Shapes” and “Octree-based Boundary Evaluation for General Sweeps”, Proceedings, TMCE, 2008 Erdim and Ilies (Erdim 和 Ilies, 2008, TMCE, “用于成形几何形状的方法和设备” 和 “用于一般扫描的基于八叉树的边界计算”, 学报)。这些方法的精确度都受到用于表示扫描体的最小体素的尺寸的限制。

[0027] 距离场

[0028] 距离场是用于绘制和编辑形状的有效表示法, 如美国专利 No. 6, 396, 492、6, 724, 393、6, 826, 024 以及 7, 042, 458 所述。

[0029] 距离场是一种隐函数的形式, 该距离场已经用来表示和绘制扫描体。“Sweeping of Three Dimensional Objects”, Computer Aided Design, 20(4), 1990, Martin and Stephenson (Martin 和 Stephenson, 计算机辅助设计, 20(4), 1990, “三维物体的扫描”) 描述了用于根据隐函数定义扫描体的包络面的理论基础。在 “Function Representation for Sweeping by a Moving Solid”, Proceedings, Solid Modeling, 1995, Sourin and Pasko (Sourin 和 Pasko, 实体造型, 1995, “通过移动实体进行扫描的函数表示法”, 学报) 中表示利用隐式曲面的扫描体。然而, 隐式曲面可能难以绘制, 并且难以定义用于任意复杂刀具形状的适当的隐式表示。

[0030] 自适应采样距离场 (ADFs) 使用细部定向 (detail-directed) 采样以提供距离场的在空间和时间上都有效的表示法。ADFs 将距离场存储在单元的空间层级中。每个单元均包含距离数据和用于重建与单元相关联的距离场的一部分的重建法。距离数据可以包括距离场的值, 以及距离场的梯度和偏导数。仅当需要保存记忆和计算时, 才可以重建单元内的距离场。

[0031] ADFs 可以用来利用 CSG 运算来模拟编辑。待编辑的模型和编辑工具可以表示为距离函数、规则采样距离场或 ADFs。编辑处理例如通过修改模型的 ADF 可以明确地生成被编辑形状的 ADF。另选的是, 被编辑的形状可以被隐含地表示为复合 ADF。该复合 ADF 存储模

型的距离场和编辑工具、与距离场相对应的算子（诸如用于编辑工具的 CSG 减法算子）、以及距离场重建法，该距离重建法在绘制或其他处理期间按照需要合成存储的距离场。

[0032] 美国专利 No. 6, 724, 393 描述了一种利用在刀具沿曲线路径移动时与刀具的几何形状相对应的扫描体来编辑 ADF 的方法。该方法确定从采样点到路径的距离，并且然后利用刀具几何形状来确定到刀具表面的距离。然而，该方法没有提供用于非球形对称的形狀的距离场的精确表示，并且该方法不适合高精度建模。

[0033] 用来重建每个 ADF 单元内的距离场的重建法可以在每个单元基础上来规定并且专用于单元内的表面特征（诸如锐边和角）。专用的重建法可以用来提高这种特征附近的 ADF 表示的精确度。

[0034] 在“Feature sensitive surface extraction from volume data”, Proceedings, SIGGRAPH 2001, Kobbelt, Botsch, Schwanke, and Seidel (Kobbelt, Botsch, Schwanke 以及 Seidel, 计算机绘图专业组 2001, “从体数据提取的特征敏感表面”, 学报) 中描述了提高传统采样距离场表示的精确度的替换方法。在该方法中，到形状边界与相应的正 x、y 以及 z 方向中的采样网格之间的最接近的相交点的 x、y 以及 z 的距离被存储在每个采样点处。该方法可以用来利用移动立方体法的修改版本根据采样数据重建更精确的曲面模型。

[0035] 在“Complete Distance Field Representation”, Proceedings, IEEE Visualization, 2001, Huang, Li, Crawfis, and Lu (Huang, Li, Crawfis, 以及 Lu, 2001, 电气和电子工程师协会可视化, “完全距离场表示”, 学报) 中增加了传统采样距离场表示以能够更精确地重建物体边界以及物体的偏移表面。可以使用规则或自适应采样距离场。对可以影响物体边界或内部偏移表面的多边形的参考存储在每个单元内，从而可以精确地计算到多边形表面模型的距离。然而，利用点模型来重建和绘制该绘制表面，并且点模型中的点位于包含绘制表面的单元的中心。因而，最终表面的精确度受边界单元的分辨率限制。

[0036] 距离场已经用来表示扫描体。美国专利 No. 5542036 将刀具形状和扫描体都表示为规则采样距离场。通过将刀具的规则采样距离场转换成沿刀具路径的一组离散位置来构造扫描体。针对每个刀具位置在扫描体的每个采样点处重建刀具的距离场，并且在每个采样点处执行重建距离的 CSG 合并。利用移动立方体法重建扫描体的表面的三角形模型，Lorenson and Cline, “Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm”, Computer Graphics, Vol. 21, Nr. 4, July 1987 (Lorenson 和 Cline, “移动立方体法：高分辨率 3D 表面构造算法”，计算机图形学，21 卷，4 期，1987 年 7 月)。扫描体的精确度受刀具和扫描体的规则采样距离场的分辨率以及刀具路径的离散采样的限制。

[0037] 在“Fast Swept Volume Approximation of Complex Polyhedral Models”, Proceedings, Shape Modeling, 2003, Kim, Varadhan, Lin, and Manocha (Kim, Varadhan, Lin, 以及 Manocha, 形状建模, 2003, “复杂多面体模型的扫描体快速造型”, 学报) 中描述了用于逼近复杂物体的扫描体的方法。在该方法中，用多边形逼近来逼近复杂物体。到逼近中的多边形的无号距离在规则网格中被计算，并且然后被后处理以确定有号距离。采样距离场的等值面被重建以确定扫描体的边界。在该方法中，精确度受表面图元的多边形逼近和距离网格的分辨率限制。

[0038] 上述方法中没有一个是可以提供表示任意形状的高精度扫描体所需的分辨率。那些方法受形状和扫描体的表示的空间分辨率以及为逼近刀具运动对刀具路径进行的离散采

样的限制。

[0039] 在“Function Representation for Sweeping by a Moving Solid”, Proceedings, Solid Modeling, 1995, Sourin and Pasko (Sourin 和 Pasko, 1995, 实体造型, “通过移动实体进行扫描的函数表示”, 学报) 中使用刀具和扫描体的隐式表示以提供曲面的精确表示并且试图减少由对刀具路径进行采样引起的伪像。扫描体的隐式表示被定义为刀具的隐式表示的 CSG 合并, 该刀具被转换成与沿路径的一组离散的 N 个采样时间 t_0 、 t_1 、... t_{N-1} 对应的沿刀具路径的一组离散的点。

[0040] 在该方法中, 以“离散方式”逼近扫描体的隐函数在采样点处的值。首先, 将刀具的隐式表示转换成与沿路径的 N 个采样时间 t_0 、 t_1 、... t_{N-1} 相对应的一组位置, 并且在采样点计算该刀具的隐式表示, 以确定每一个位置的采样值。当刀具最接近于采样点时, 确定包括沿刀具路径的最优时间的一对采样时间 t_i 和 t_{i+1} , 并且 1) 与采样时间 t_i 和 t_{i+1} 相对应的一对采样值被混合在一起, 或者 2) 采样时间 t_i 和 t_{i+1} 被混合以计算最优时间 t 的近似值, 将刀具的隐式表示转化成与 t 相对应的沿刀具路径的点, 并且在采样点计算刀具的转换后的隐式表示。

[0041] 在该方法中的大部分计算被花费在计算沿路径的用于每个时间的转换的隐函数中。因为以离散方式计算在每个采样点处的隐函数的值, 所以扫描体的精确逼近要求 N 非常大。因而, 对于每个采样点必须多次计算刀具的转换隐式表示。虽然该方法可以提供扫描体的高精度模型, 但是它非常慢并且通常不会在实践中采用。

[0042] 因而, 需要一种生成扫描体的高精度表示的在空间和时间上有效的方法, 该扫描体通过沿任意路径移动任意形状而生成, 其精度不受形状表示或刀具路径的离散采样限制。此外, 需要在空间和时间上都有效的 NC 铣削模拟系统, 该系统可以表示在尺寸为大约一米的工件中尺寸为大约几微米的不合要求的特征。

发明内容

[0043] 本发明提供了一种通过沿与物体相交的路径移动形状来模拟该物体的铣削的在处理器上执行的方法, 其中该物体包括一组几何要素。该一组几何要素用相应的一组几何要素距离场来表示。

[0044] 生成复合自适应采样距离场 (ADF) 来表示所述物体, 其中所述复合 ADF 包括一组单元。所述复合 ADF 中的每个单元均包括所述一组几何要素距离场的子集和程序重建方法 (procedural reconstruction method), 所述程序重建方法用于合成所述几何要素距离场的子集以重建所述物体的由所述单元表示的部分的复合距离场。

[0045] 通过形状距离场表示所述形状。通过参数函数表示所述路径。定义扫描体距离场来表示通过沿所述路径移动所述形状而生成的扫描体, 其中根据扫描体重建方法以连续方式定义所述扫描体距离场。

[0046] 所述扫描体重建方法在采样点重建所述扫描体距离场。以连续方式确定所述参数函数的一组最优参数, 其中确定所述参数函数的一组最优参数还包括以下步骤: 选择所述参数函数的、与所述形状沿所述路径的特定配置对应的特定一组参数; 转换所述形状距离场以将所述形状置于所述特定配置; 根据转换后的所述形状距离场确定所述采样点的距离数据; 以及利用所述距离数据以迭代方式修改所述特定一组参数, 直到确定了所述一组最

优参数为止。其中所述一组最优参数定义所述形状沿所述路径的最优配置。将所述形状距离场转换成所述最优配置以生成转换后的形状距离场。在所述采样点根据转换后的所述形状距离场确定距离数据以在该采样点重建所述扫描体距离场。

[0047] 编辑所述复合 ADF 以将所述扫描体距离场结合到该复合 ADF 中。根据所述扫描体确定所述复合 ADF 的一组编辑单元,并且在所述一组编辑单元内重建所述复合 ADF,其中所述再生将所述扫描体距离场结合到所述复合 ADF 的所述一组编辑单元内,以通过沿所述路径移动所述形状来模拟所述物体的铣削。

附图说明

[0048] 图 1 是根据本发明的实施方式的 NC 铣床和用于模拟 NC 铣削的系统和方法的流程图;

[0049] 图 2A 是用于铣削的典型刀具以及通过沿路径移动这种刀具在工件上进行的典型编辑的图;

[0050] 图 2B 是通过沿曲线路径扫描 2D 形状而确定的扫描体的示意图;

[0051] 图 3A 是刀具的直线路径的示意图,图 3B 是刀具的弧形路径的图,其中刀具轴线沿路径改变;

[0052] 图 3C 是刀具的曲线路径的示意图;

[0053] 图 4 是根据本发明实施方式的利用一组 G 码或 NC 机床指令模拟用刀具形状来铣削工件的方法的流程图;

[0054] 图 5 是在采样点重建形状扫描体的距离场的方法的框图;

[0055] 图 6A 是以离散方式逼近扫描体的现有技术方法的图;

[0056] 图 6B 和 6C 是根据本发明实施方式的以连续方式确定扫描体的距离场的方法的图;

[0057] 图 7A、7B 以及 7C 是用于铣削的一组典型的圆柱形对称刀具、它们的二维横截面、以及它们的横截面的二维距离场的图;

[0058] 图 8A 是沿用参数 t 表示的路径移动的圆柱对称刀具的图;以及

[0059] 图 8B 是根据本发明实施方式的以参数 t 表示的曲线的图,该曲线将采样点映射到圆柱对称刀具的横截面的二维距离场上。

具体实施方式

[0060] 系统和方法综述

[0061] 图 1 示出了 NC 铣削系统 100 和数控 (NC) 铣削模拟系统 150。在 NC 铣削系统 100 中,将计算机辅助设计 (CAD) 模型 102 输入到计算机辅助制造 (CAM) 系统 104,该 CAM 系统 104 产生用于控制 NC 铣床的 G 码 106。在 NC 铣削期间,将 G 码输入到 NC 铣削控制台 108,该 NC 铣削控制台 108 处理每个 G 码以产生相应的一组 NC 机床指令 110。将 NC 机床指令 110 输入到 NC 控制器 112,该 NC 控制器 112 产生一组马达控制信号 114 以相对于工件 118 移动刀具 116,以便铣削该工件。

[0062] 模拟系统 150 可以将由计算机辅助制造系统 104 产生的 G 码 106 或由 NC 控制台 108 产生的 NC 机床指令 110 作为输入。模拟系统的该输入由计算机处理器 152 读取,该计

计算机处理器 152 模拟工件的加工,并且输出模拟模型 154,该模拟模型 154 可以存储在计算机存储器 156 中。处理器 152 可以绘制存储的模拟模型 154 以产生可以被输出到显示设备 160 的绘制图像 158。显示出的图像 162 可以与计算机辅助设计模型 102 相比较,以在执行工件的实际 NC 铣削之前检验 G 码 106 或 NC 机床指令 110。

[0063] 刀具

[0064] 图 2A 示出用于 NC 铣削的一组典型的刀具形状 202、204、206 以及 208。当相对于工件 210 移动刀具时,刀具将材料从工件切除。这里,刀具 202、204、206 以及 208 从工件移除与表面 212、214、216 以及 218 对应的材料。由每个刀具移除的材料的形状由刀具形状和刀具相对于工件的路径来确定。移除的材料的形状是当刀具沿该路径移动时工件和刀具的扫描体之间的相交点。

[0065] 虽然我们这里集中在 NC 铣削模拟,但是扫描体在科学、工程以及计算机图形学等许多领域,包括计算机辅助设计、自由设计、实体造型、机器人技术、制造自动化以及可视化中都有应用。

[0066] 扫描体

[0067] 图 2B 示出了沿路径 252 移动的 shape 250 的扫描体 260。路径 252 将 shape 250 的特定位置表示为时间函数。该路径可以将 shape 的方位 256、257 以及 258 表示为时间函数。该路径也可以将 shape 的比例或 shape 的任意转换表示为时间函数。在图 2B 中,当 shape 250 沿路径移动时,shape 250 的原始位置、方位以及几何 shape 被转换成 shape 254 的最终位置、方位以及几何 shape。

[0068] 刀具路径

[0069] 可以以多种形式表示刀具相对于工件的路径。

[0070] 图 3A 示出直线路径,其中刀具 302 沿直线 304 移动。

[0071] 图 3B 示出圆弧路径,其中刀具 302 的尖端 310 沿圆弧 312 移动,并且刀具的初始轴向 314 在路径的末端转换成最终轴向 316。

[0072] 图 3C 示出曲线路径,其中刀具 302 的尖端 310 沿曲线 320 移动。

[0073] 其他可能的路径形式包括例如将刀具定位在一点,沿被称为折线的一系列线移动刀具,沿螺线或螺旋曲线移动刀具,沿多项式曲线(诸如二次贝塞尔曲线或三次贝塞尔曲线,或被称为分段多项式曲线的一系列多项式曲线)移动刀具。可以考虑可以被模拟的任何一种路径形式,包括由程序定义的路径(诸如受工件的形状或材料成分影响的路径)。

[0074] 铣削模拟

[0075] 图 4 示出了利用刀具形状模拟工件铣削的方法,该方法利用模拟处理器 400,将铣过的工件的表示存储在存储器 440 中,并且利用绘制处理器 460 将铣过的工件的表示绘制到显示设备 480。

[0076] 使用工件形状和由一组距离场 404 重建复合距离场的方法来产生可以存储在存储器 440 中的复合 ADF 444。工件形状用包括一组几何要素的工件几何形状 402 来表示。

[0077] 将工件几何形状的每个几何要素都转变成距离场表示,该距离场表示规定一组几何要素距离场。每个几何要素距离场均可以被表示为例如解析距离函数、隐含距离函数、规则采样的距离场、ADF、距离函数组合或程序中的一个。

[0078] 在铣削模拟的一个优选实施方式中,将复合 ADF 作为八叉树存储在存储器中,该

复合 ADF 是以封闭工件形状的包围盒的根单元为起点以自顶向下的方式生成的。工件几何形状 402 中的每个特定几何要素的距离场表示都被添加到复合 ADF 的叶单元,该复合 ADF 的距离场受特定几何要素的影响。在绘制和处理期间,通过利用复合距离场重建方法 404 合成叶单元内的距离场,可以在采样点处重建特定叶单元的距离场。

[0079] 现有技术中公知的各种合成方法都是可以的。在优选实施方式中,该合成使用布尔减法算子来基于由刀具扫描的扫描体模拟从工件移除的材料。

[0080] 在 ADF 生成期间,包含多于规定最大数量距离场的叶单元被细分以限制每个叶单元内的距离场的复杂性。因而,复合 ADFs 被细部定向 (detail directed),在受较少距离场影响的工件的区域中出现较大单元,在受许多距离场影响的工件的区域中出现较小单元。

[0081] 假如将新距离场添加到复合 ADF 使叶单元中的距离场不相关,则将不相关的距离场从叶单元中移除。例如,假如刀具运动从叶单元中移除所有的材料,则叶单元中所有的距离场可以变得不相关,并且从叶单元中清除距离场,且将叶单元标为外部单元。

[0082] 因而,新刀具运动的模拟可以减少叶单元中距离场的现存数量,并且叶单元的同胞 (siblings) 在规定的最大数量以下。在该情况下,叶单元及其同胞的距离场被放置在它们的共享母单元中,并且叶单元及其同胞被从复合 ADF 中删除。

[0083] 铣削模拟方法根据刀具形状 408 定义形状距离场 412 (410),形状距离场 412 可以是例如解析距离函数、隐含距离函数、规则采样距离场、ADF、距离函数组合或程序中的一个。

[0084] NC 机床指令 414 (或者可另选的是 G 码 416) 可以用来定义与刀具运动对应的参数路径函数 420。对于每个刀具运动,都使用形状距离场 412 和参数路径函数 420 来定义扫描体距离场 424 (422),该扫描体距离场 424 表示与刀具运动对应的刀具扫描体。

[0085] 用扫描体距离场 424 编辑复合 ADF 444 以模拟通过刀具运动铣削工件 (426)。在编辑期间,将扫描体距离场添加到与刀具扫描体相交的复合 ADF 的单元,导致在相交的单元内 ADF 的再生。

[0086] 复合 ADF 可以用来产生 (462) 由绘制模型要素组成的绘制模型 464,并且将复合 ADF 绘制 (466) 到显示设备 480。现有技术已知的绘制方法 (诸如点绘制、三角形绘制以及光线跟踪) 可以用来产生和绘制该绘制模型 464。

[0087] 在铣削模拟的另选实施方式中,与每个 NC 机床指令 414 或 G 码 416 对应的每个形状距离场和与工件几何形状 402 的每个几何要素对应的每个距离场都被赋予用于相应的 NC 机床指令、G 码或者几何要素的唯一标识符。

[0088] 在绘制模型生成期间 (462),用有助于特定绘制模型要素的距离场的唯一标识符注释绘制模型 464 的每个特定要素。通过使一组绘制属性与每个唯一标识符相关联,绘制模型 464 可对有助于工件的每个部分的几何要素和刀具路径进行编码。例如,通过使独特的颜色与特定 G 码的形状距离场的标识符相关联,可使受特定 G 码影响的工件的区域容易地显现在显示设备 480 上。

[0089] 作为一个另选方案,可以将不透明度与复合 ADF 中的特定距离场的标识符相关联。例如,可以将与对应于特定刀具运动的特定距离场相关联的绘制要素绘制为透明的。另选的是,可以使唯一标识符与布尔算子相关联,该布尔算子指示相应的绘制要素是否应绘制。其他绘制属性可以用来产生附加效果以有助于铣削工件的可视化。

[0090] 距离场在物理模拟中具有众多优点。铣削模拟的另选实施方式使用距离场来检验 NC 铣削过程。例如,由铣削模拟器 400 生成的复合 ADF 444 可以与计算机辅助设计模型 102 的距离场表示比较。通过利用显示设备 480 的视觉检查可以进行该比较。

[0091] 另选的是,可以通过在多个采样点处对复合 ADF 444 和计算机辅助设计模型 102 的距离场进行采样,并且在采样点比较距离数据,来进行该比较。另选的是,可以通过产生差距离场并且使该差距离场可视化进行该比较,其中通过从复合 ADF 444 和计算机辅助设计模型 102 的距离场中的另一个减去其中的一个来产生上述差距离场。

[0092] 距离场也可以用来测量由每次刀具运动移除的材料的物理性质。例如,对于特定的刀具运动,可以生成相交距离场,该相交距离场表示工件和与特定刀具运动相对应的扫描体的相交点。然后可以对该相交距离场进行处理以确定由特定刀具运动移除的材料的各种性质,例如包括移除材料的质量、体积或者转动惯量。

[0093] 重建扫描体的距离场

[0094] 图 5 示出了利用处理器 500 在采样点重建扫描体的距离场的方法。形状距离场 504 和参数路径函数 506 规定如上所述的刀具和刀具运动。给定采样点 502,扫描体重建方法 510 确定采样点 502 处的距离数据以在该采样点重建距离场。该方法以“连续方式”确定刀具沿路径的最优配置 (512)。

[0095] 在确定最优的一组参数期间 (512),选择定义刀具形状沿路径的初始配置的一组初始参数。在一优选实施方式中,路径用单个参数 t 表示,该单个参数 t 与由刀具沿路径走过的时间相对应。并且选择 t 的初始值 (514)。转换形状距离场以在该时间 t 沿路径放置刀具的形状 (516),并且在采样点 502 重建形状距离场 (518)。

[0096] 在采样点重建的距离数据可以包括例如从采样点到转换的形狀的距离、距离场的梯度以及距离场的偏导数。

[0097] 重建的距离数据用来以迭代方式修改参数值 t 以沿路径将形状移到更靠近采样点的配置 (520)。该修改以连续方式进行,即通过在改善沿路径的形狀的位置的方向中的任意量,而不是通过从预先确定的一组离散值中选择 t ,来以迭代方式修改参数 t 。反复修改直到已经确定了最优 t ,直到迭代之间的 t 的变化低于 t 的某一最小变化,或者直到已经达到了迭代的最大次数。一旦已经确定了最优 t ,则将形状转换到相应的最优配置 (530),并且从转换的形狀重建距离数据 (540) 以确定在采样点 502 的距离数据 (510)。

[0098] 图 6A 示出了以离散方式在采样点 601 重建扫描体的距离场的现有技术方法。将刀具形状 602 放置在与一组离散时间 t_0 606、 t_1 608、... t_{N-1} 610 对应的沿刀具路径 604 的一组离散配置。

[0099] 对于每个采样时间,确定相应的从 P601 到刀具形状的采样距离。在该图中,离散时间 t_i 612 和 t_{i+1} 614 包括最优时间。现有技术方法使从 P601 到扫描体的距离逼近为以下距离中的一个:1) 对于 t_i 和 t_{i+1} 确定的距离的最小值,2) 对于 t_i 和 t_{i+1} 确定的距离的平均值或混合 (blending),或者 3) 当形状被放置在时间 t^* 时到形状的距离,其中 t^* 被确定为 t_i 和 t_{i+1} 的加权平均值。

[0100] 图 6B 示出了本发明的优选实施方式。最初沿路径 604 将刀具形状 602 放置在与参数 t 对应的配置。在采样点 P601 处来自刀具形状 602 的距离场的距离数据 622 用来沿路径以连续方式在由最优参数 t^* 626 定义的最优配置的方向上将形状移动至点 $t + \Delta t$ 624。

[0101] 在优选实施方式中,使用采样点处的距离场的梯度来修改参数 t 。该修改沿路径在与距离场的面向外的梯度向量一致的方向上移动该形状。通过采用路径在 t 处的切矢量和面向外的梯度向量的点积来确定此距离。如果点积是正的则增大参数 t ,如果点积是负的则减小参数 t 。点积的大小为 t 的变化提供了比例。如果点积接近于零,则形状局部地与距离场正交,从而表明已经确定了 t 的最优值。

[0102] 如果路径用一个以上参数来表示,则可以使用相对于每个路径参数的偏导数来修改 t 。

[0103] 连续最优化中最大的挑战之一是局部最优值的存在使得难以保证连续最优化问题的输出是全局最优值。如果刀具形状和刀具路径相对复杂,则可以有若干个局部最优值。在另选实施方式中,对上述方法使用两次修改来处理这一问题。

[0104] 在第一修改中,以相对较少数量的采样时间来对 t 进行采样,并且在每个采样时间都重建距离数据。从采样时间当中选择形状最接近采样点的时间 t 来在最有可能收敛于全局最优值的点处开始最优化问题。如果有希望的采样时间为一个以上,则可以在每个有希望的采样时间开始该方法以找到全局最优值。

[0105] 图 6c 中示出了第二修改。在该修改中,初始化被确定为包括最优 t 626 的开始时间 tS 630 和结束时间 tE 634。如果修改 t 的方法使两个 t 值朝向彼此移动,则两个值 tS 630 和 tE 634 包括最优 t 值。在修改的每次重复中,确定在采样点 P 601 处分别与 tS 630 和 tE 634 对应的距离数据 632 和 636,并且使 tS 和 tE 中的一个或两个朝向另一个移动,直到确定 tS 630 和 tE 634 之间的最优 t 值。

[0106] 上述优选实施方式以及第一和第二修改有各种另选方式。本领域技术人员应该理解,可以从熟悉连续最优化领域的技术人员所公知的技术获得以连续方式修改参数 t 的其他另选方法。

[0107] 计算在多个采样点处的距离场

[0108] 某些处理(诸如绘制复合 ADF 或者使用复合 ADF 来检测物体之间的碰撞)要求在多个采样点处重建 ADF 的距离场。

[0109] 例如,复合 ADF 可以被转换成点模型并且通过点绘制被绘制到显示设备。点模型包括被称为点的一组几何图元,其中每个点均与空间中的位置和一组绘制属性相关联。在绘制期间,点被映射到图像位置并且通过利用绘制属性被绘制成图像。绘制属性的一些示例包括例如点颜色、不透明度、大小、反射特性以及法向矢量。

[0110] 可以通过以下步骤利用复合 ADF 生成该一组点中的每个点。首先,将点的位置初始化到复合 ADF 的单元内的位置。其次,在该点的位置处重建距离场,并且利用距离场的大小和梯度向量朝向复合 ADF 的表面移动点。重复第二步骤直到重建的距离场表明点位于复合 ADF 的表面上。最后,重建距离场并且利用该距离场来为点分配绘制属性。例如,可以将一颜色分配给点,该颜色基于影响点的位置的距离场的唯一标识符。作为第二个示例,可以将基于复合 ADF 的局部梯度的法向矢量分配给点。

[0111] 另选的是,可以利用光线投射或光线追踪将复合 ADF 转换成图像,并且将 ADF 作为图像绘制到显示设备。在光线投射期间,将一组光线投射到用于图像中的每个像素的复合 ADF。与复合 ADF 的表面相交的每条光线均根据在相交点处从复合 ADF 重建的距离数据而分配一组绘制属性。将每组光线的绘制属性合成以确定图像中每个相应像素的颜色。

[0112] 通过沿光线在各种采样点处从复合 ADF 重建距离数据来确定光线与复合 ADF 之间的相交点的位置。类似于上述用于重建扫描体的距离场的方法,可以以离散方式或连续方式确定相交点的位置。假如以离散方式确定相交点的位置,则可以利用最接近于表面的采样点的混合来逼近相交点。如果以连续方式确定相交点的位置,则利用连续最优化方法来确定相交点。

[0113] 检测两个物体之间的碰撞也要求在多个采样点处从复合 ADF 重建距离数据。可以以若干方式从重建的距离数据中检测两个物体之间的碰撞。例如,可以将其中一个物体的距离数据重建为位于另一物体上的一组表面点,以确定第二个物体与第一个物体的逼近程度。如果逼近数据表明两个物体比某一最小阈值距离更接近,则检测到两个物体之间的碰撞。

[0114] 所确定的逼近数据可以用于一些应用(诸如 NC 铣削模拟、机器人路径规划以及制造业)以修改其中一个物体的形状或者以修改其中一个物体的路径,例如以防止碰撞。

[0115] 圆柱对称刀具

[0116] 如上所述,某些应用(诸如绘制复合 ADF 或者利用复合 ADF 检测物体之间的碰撞)要求在多个采样点处重建复合 ADF。为提高重建方法的效率,可以针对圆柱对称刀具形状修改上述优选实施方式。

[0117] 对于沿路径移动的圆柱对称刀具,刀具表面上最接近于采样点的点始终位于包含采样点和用于刀具沿路径的所有配置的刀具轴线的平面。通过刀具轴线的平面限定刀具的横截面。因为刀具是圆柱对称的,所以刀具的横截面对于通过刀具轴线的平面是相同的。

[0118] 图 7A 示出用于 NC 铣削的一组典型的圆柱形刀具 702、703、704 以及 705。

[0119] 图 7B 分别示出刀具 702、703、704 以及 705 中的每一个的二维横截面 712、713、714 以及 715。

[0120] 图 7C 示出了分别表示二维横截面 712、713、714 以及 715 的二维距离场 722、723、724 以及 725。

[0121] 当横截面位于包含采样点平面中时,从采样点到沿路径移动的圆柱对称刀具形状的距离等于从采样点到刀具的横截面的边缘的距离。

[0122] 因而,本发明的另选实施方式通过将采样点映射到刀具形状的横截面的二维坐标内,并且根据表示该刀具形状的二维横截面的二维距离场计算距离数据,来确定距离数据。

[0123] 图 8A 示出沿路径 810 从开始时间 t_S 804 经过任意时间 t 806 移动到结束时间 t_E 808 的刀具 802。根据本发明的优选实施方式可以以连续方式在采样点 P 803 处重建距离数据。

[0124] 在另选实施方式中,如图 8B 所示,对于沿路径的每个时间,点 P 806 被映射到刀具的横截面的二维坐标系内,该二维坐标系被表示为二维距离场 820。例如,采样点 P 806 是与刀具在时间 t_S 沿着路径的配置对应的映射采样点 $P'(t_S)$,与刀具在时间 t_E 沿着路径的配置对应的映射采样点 $P'(t_E)$,以及刀具在时间 t 沿着路径配置对应的映射采样点 $P'(t)$ 。

[0125] 如图 8B 所示,该组映射采样点在刀具的横截面的二维坐标空间中限定映射路径 814。因而,在另选实施方式中,通过以连续方式搜索映射路径来确定刀具形状最接近于物体的点。

[0126] 如果要计算许多采样点,则可以以许多方式来进一步提高另选实施方式的效率。例如,可以将映射路径分割成多个区间,每个区间通过刀具横截面二维距离场的局部平滑的区域。换句话说,可以在路径与距离场的不连续点相交的点处分割路径,使得距离场在某一路径区间内至少是 C1 连续的。如本文所定义的, C1 连续意味着距离场的一阶导数沿路径部分是连续的。另选的是,可以将路径分割成这样,即所述距离场使现有技术公知的特性沿着路径区间至多以二次多项式形式变化,以提高连续最优方法的可靠性的效率。

[0127] 操作环境

[0128] 本发明可以在各种通用或专用的计算系统环境或结构下操作。适合于与本发明一起使用的众所周知的计算系统、环境和 / 或结构的示例包括但不限于个人电脑、服务器计算机、掌上或膝上型设备、多处理器或多核系统、图形处理单元 (GPUs)、专用集成电路 (ASICs)、现场可编程门阵列 (FPGAs)、基于微控制器的系统、网络 PCs、大型计算机、包括上述系统或设备中的任何一个的分布式计算环境 (即通用处理器) 等等。将监视器或其他类型的显示设备 160 与上述系统中的任何一个相连接以使本发明能够可视化 (162)。

[0129] 相关专利申请

[0130] 以下专利申请全部相关、共同提交并且彼此相结合 :MERL-2172, Frisken 等在 2009 年 5 月 19 日提交的 US 非临时专利申请 12/XXX, XXX, “A Method for Reconstructing a Distance Field of a Swept Volume at a Sample Point, (在采样点重建扫描体的距离场的方法)” ;和 MERL-2173, Frisken 等在 2009 年 5 月 19 日提交的 US 非临时专利申请 12/XXX, XXX, “A Method for Simulating Numerically Controlled Milling using Adaptively Sampled Distance Fields, (利用自适应采样距离场模拟数控铣削的方法)”。

[0131] 虽然已经以优选实施方式为例描述了本发明,但是应当理解在本发明的精神和范围内可以进行各种其他改写和修改。因此,所附权利要求的目的在于覆盖如在本发明的真实精神和范围内的所有这种变型和修改。

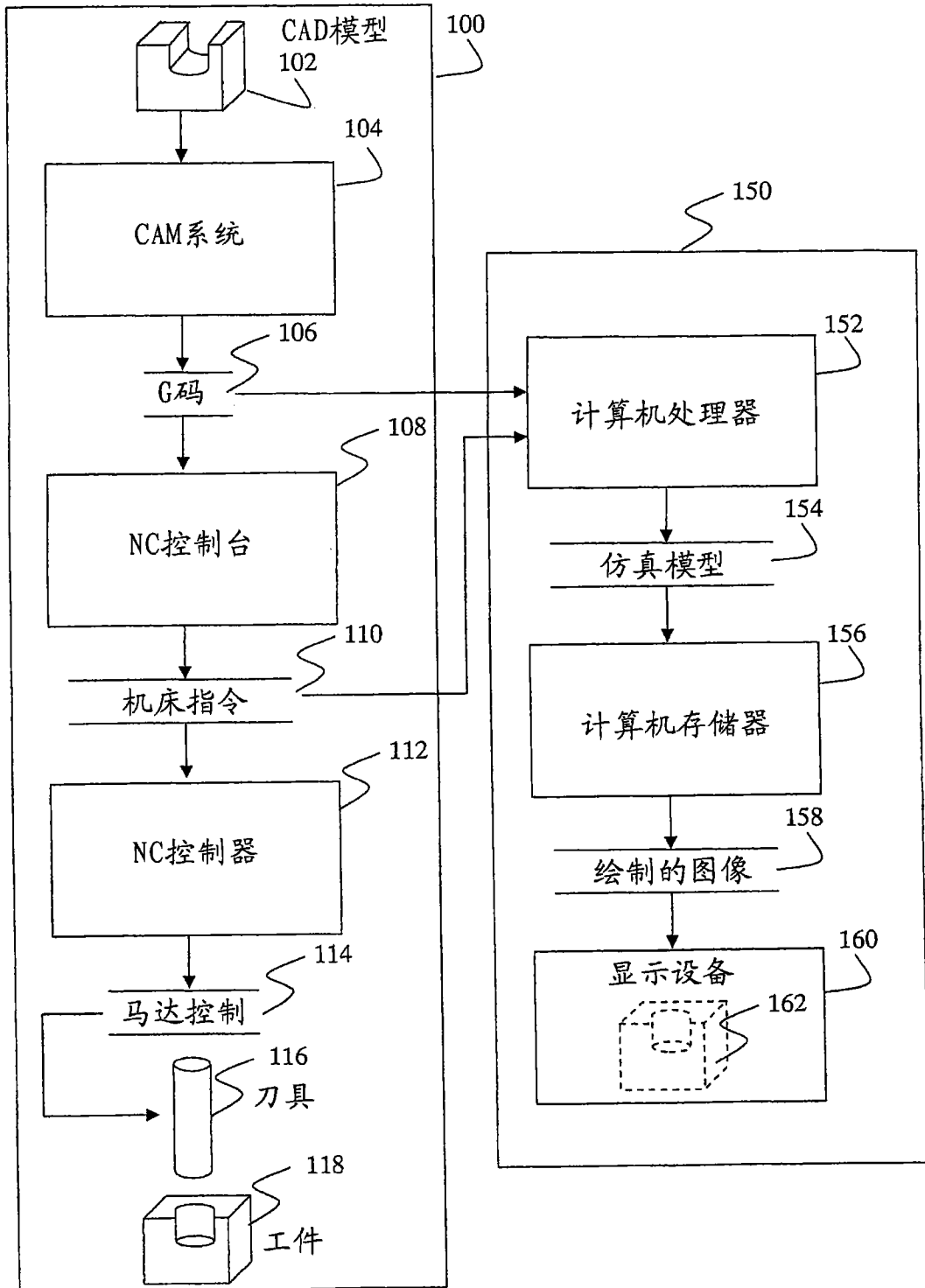


图 1

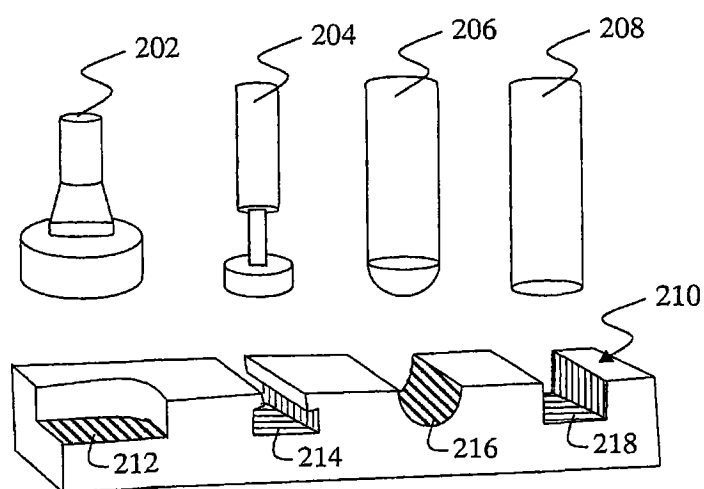


图 2A

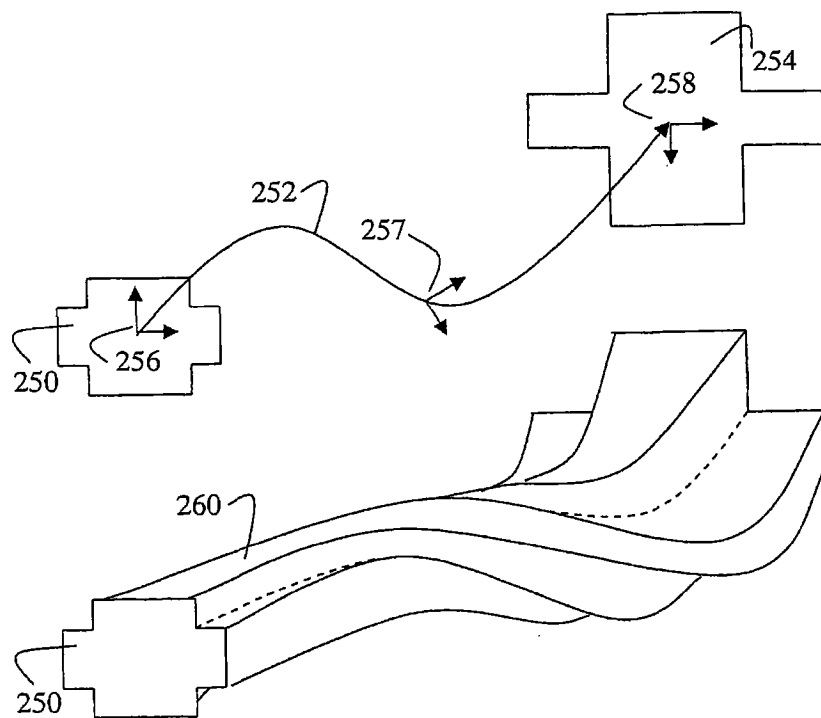


图 2B

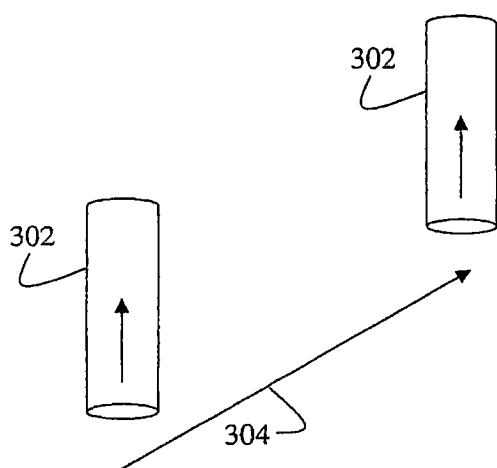


图 3A

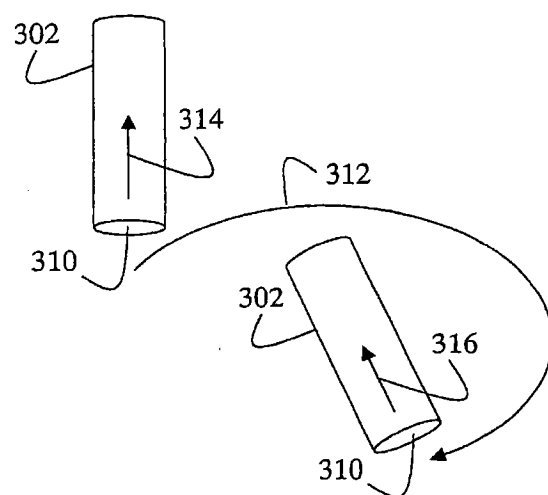


图 3B

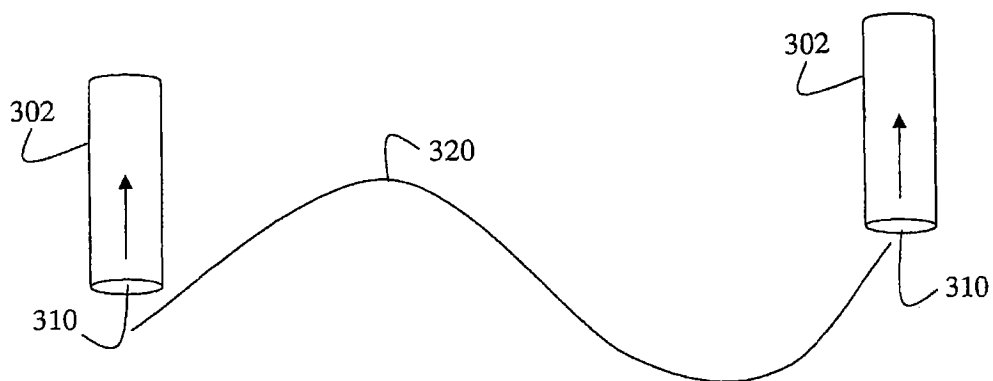


图 3C

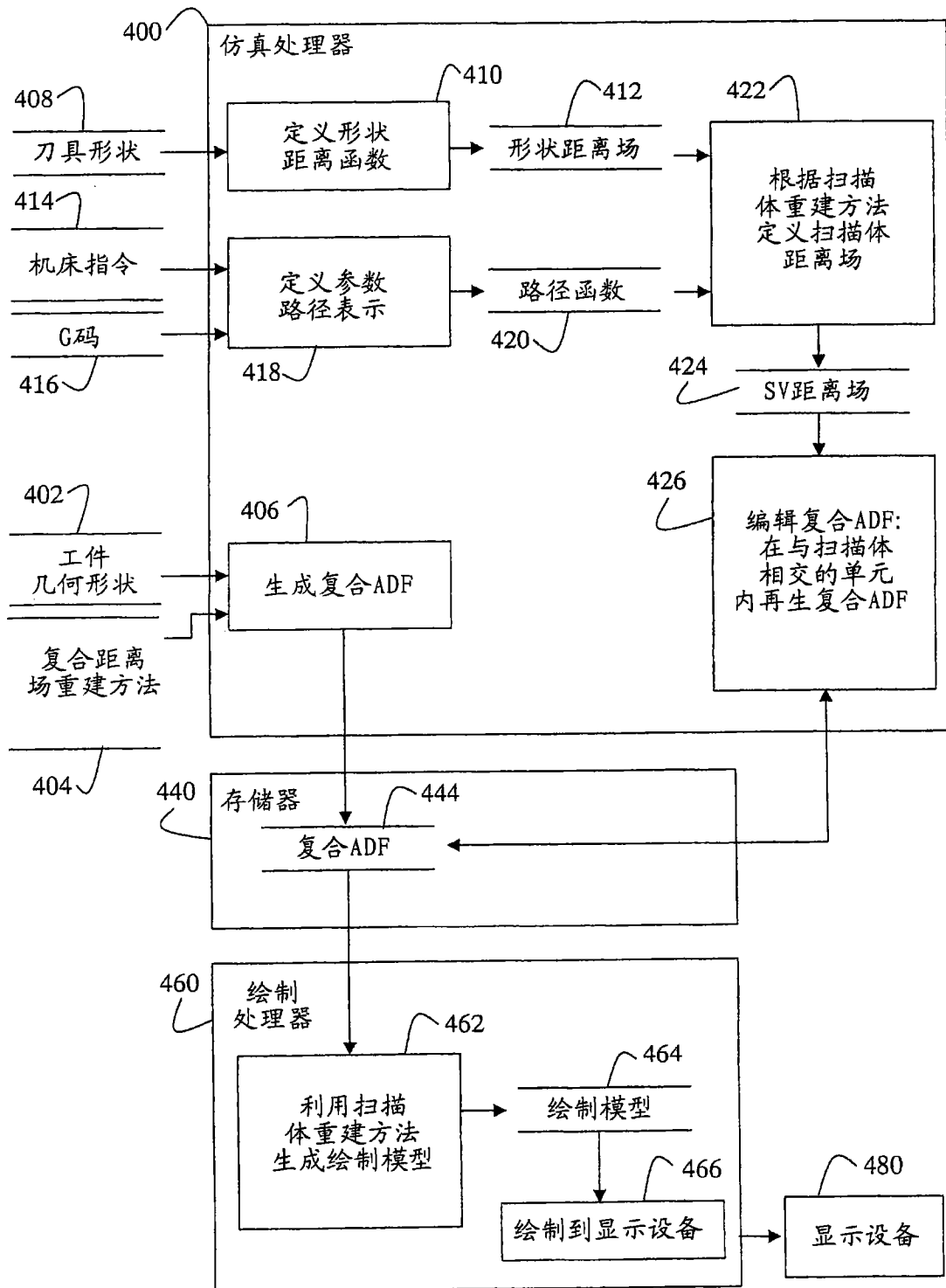


图 4

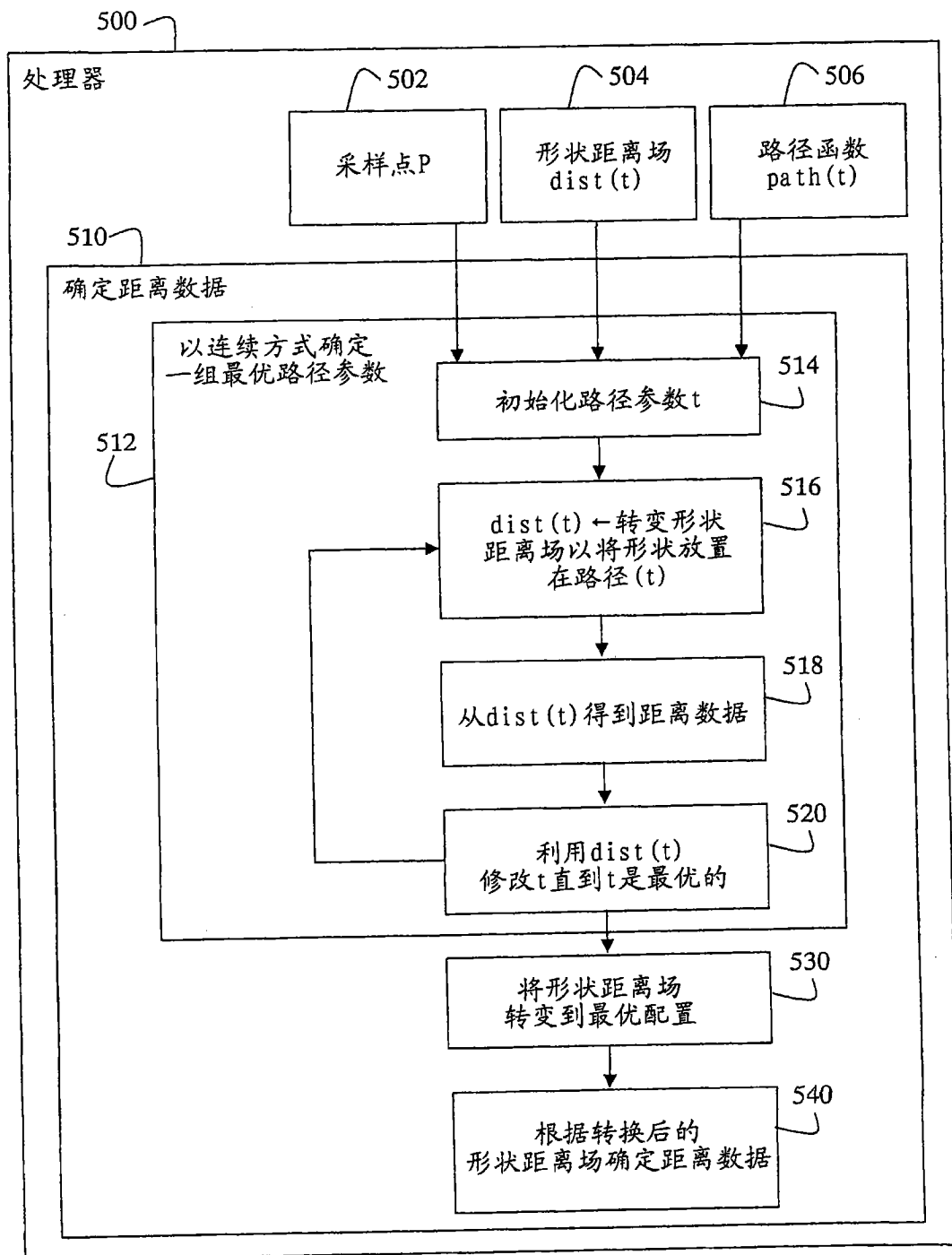


图 5

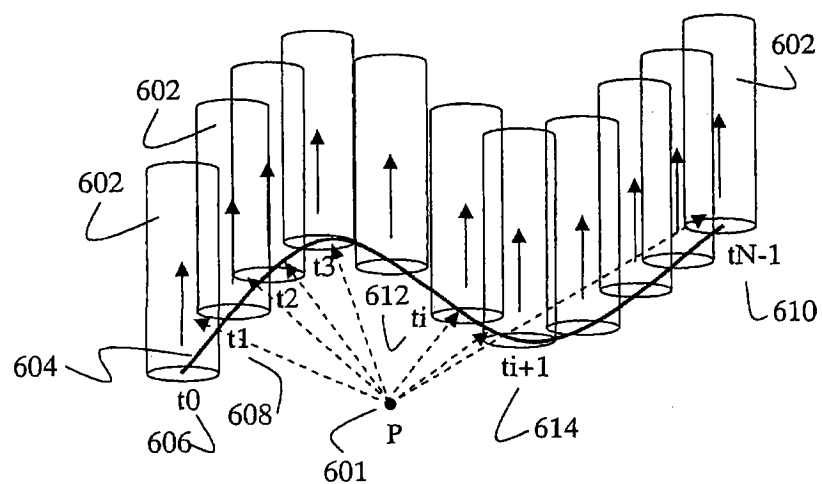


图 6A

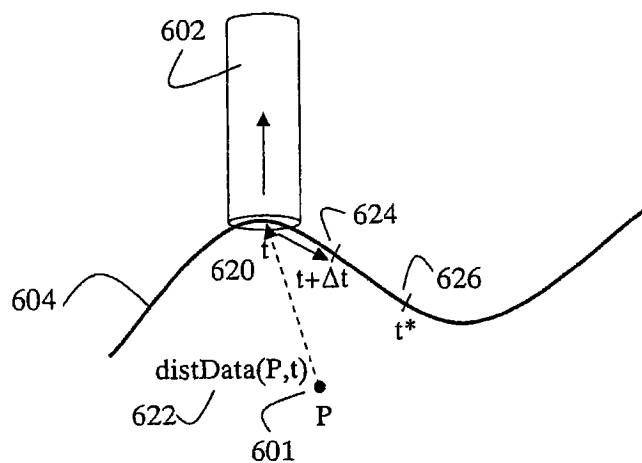


图 6B

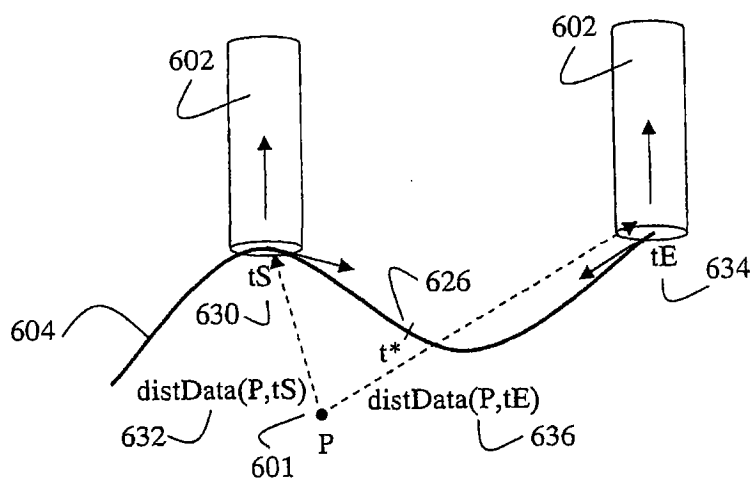


图 6C

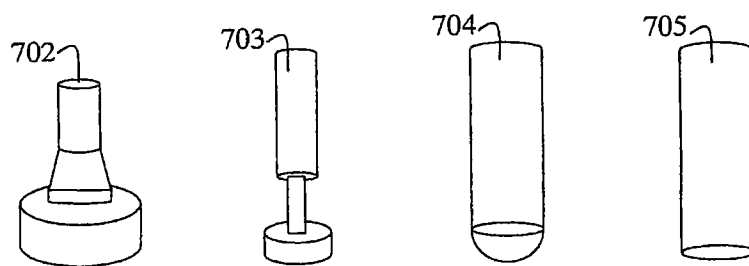


图 7A

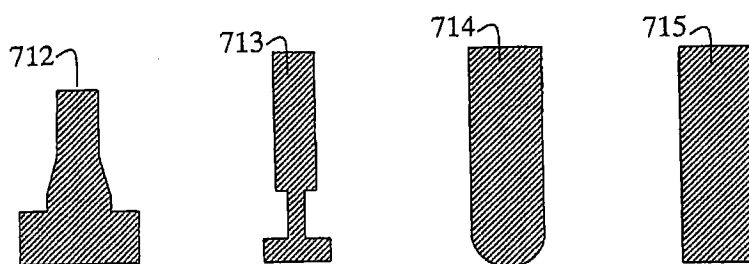


图 7B

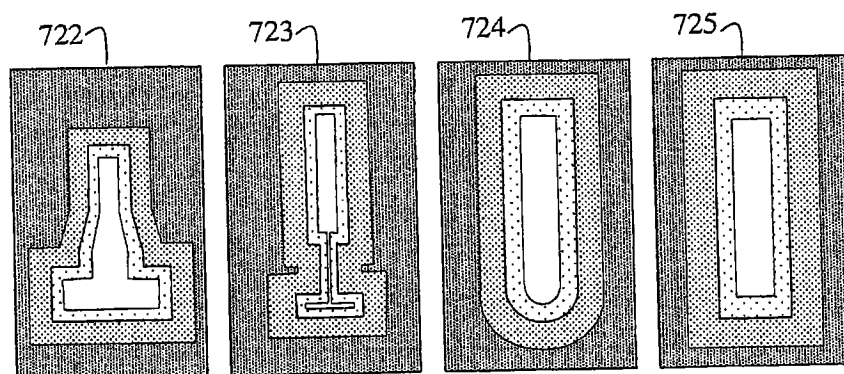


图 7C

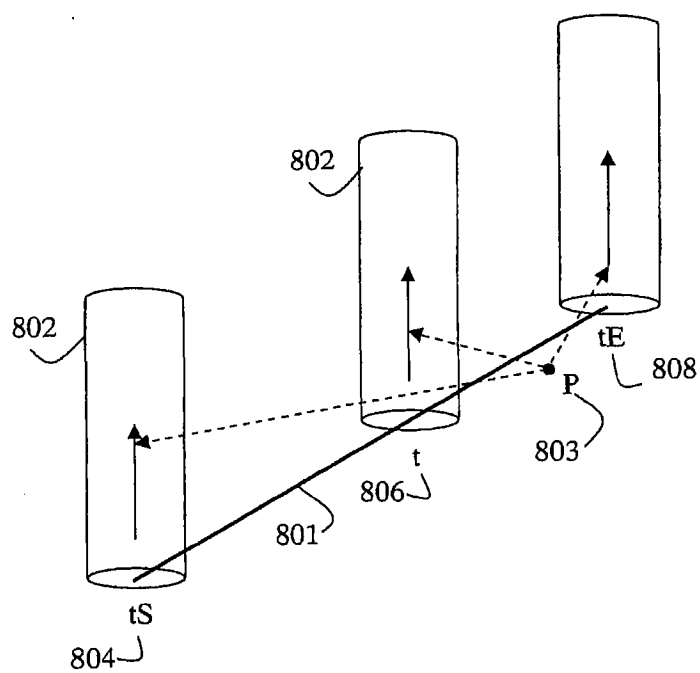


图 8A

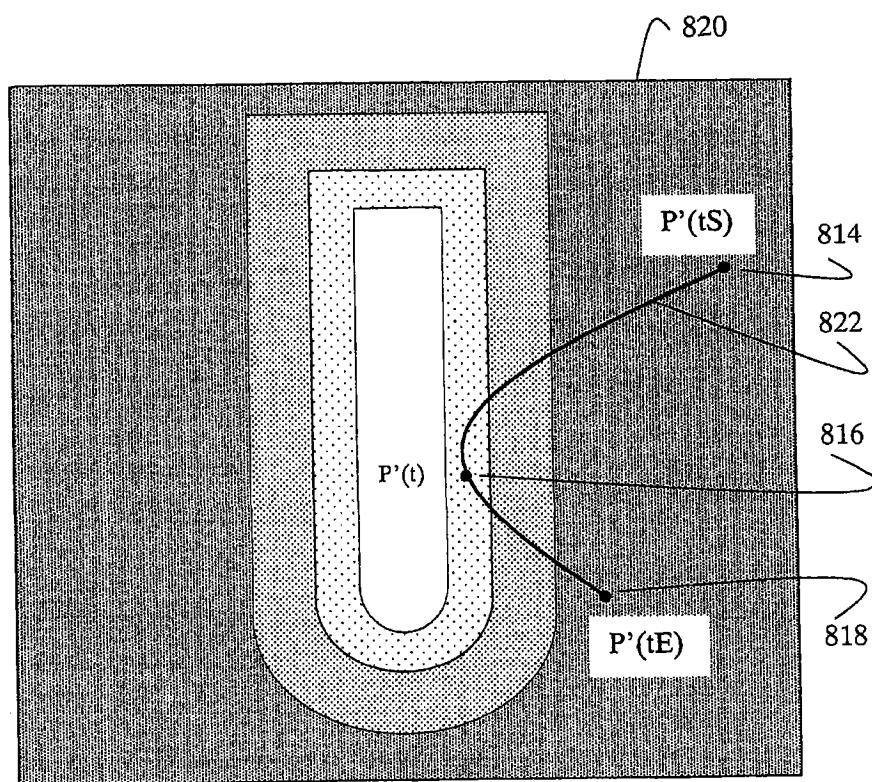


图 8B