



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101432592 B

(45) 授权公告日 2012. 05. 30

(21) 申请号 200780015298. 1

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2007. 04. 24

G01B 21/04 (2006. 01)

(30) 优先权数据

0608235. 8 2006. 04. 26 GB

(56) 对比文件

(85) PCT申请进入国家阶段日

2008. 10. 27

US 5649368 A, 1997. 07. 22, 全文 .

CN 1666085 A, 2005. 09. 07, 说明书第 7 页第
18- 第 8 页第 30 行 \ 第 11 页第 10-19 行, 图 1-7.

CN 1639541 A, 2005. 07. 13, 全文 .

(86) PCT申请的申请数据

PCT/GB2007/001496 2007. 04. 24

审查员 朱磊

(87) PCT申请的公布数据

W02007/125306 EN 2007. 11. 08

(73) 专利权人 瑞尼斯豪公司

地址 英国格洛斯特郡

(72) 发明人 亚历山大·坦南特·萨瑟兰

(74) 专利代理机构 北京明和龙知识产权代理有
限公司 11281

代理人 郁玉成

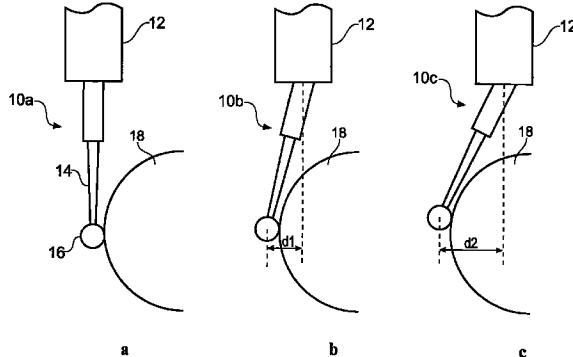
权利要求书 2 页 说明书 10 页 附图 4 页

(54) 发明名称

误差校准

(57) 摘要

描述了一种校准安装在机器上的测量探头(10)的方法。所述测量探头(10)具有触针(14)，所述触针(14)具有工件接触尖端(16)。所述方法包括确定探头校准矩阵，所述探头校准矩阵使探头输出(a, b, c)与机器坐标系统(x, y, z)相关联。所述方法包括如下步骤：使用第一探头偏转(d_1)扫描校准物(18)，以便获得第一机器数据；使用第二探头偏转(d_2)扫描校准物，以便获得第二机器数据。使用所述第一机器数据和所述第二机器数据获得纯探头校准矩阵，其中基本上消除了任何机器误差。有利的是，所述方法基于第一和第二机器位置之间的差异是已知的假定通过数值处理确定所述纯探头矩阵。



1. 一种校准安装在机器上的测量探头的方法,所述测量探头具有触针,所述触针具有工件接触尖端,其中,所述方法包括确定探头校准矩阵,所述探头校准矩阵使探头输出与机器坐标系统相关联,所述方法包括如下步骤:

- (i) 使用第一探头偏转扫描校准物,以便获得第一机器数据;
- (ii) 使用第二探头偏转扫描校准物,以便获得第二机器数据;以及
- (iii) 使用所述第一机器数据和所述第二机器数据获得纯探头校准矩阵,其中基本上消除了任何机器误差,

所述步骤 (iii) 包括使用数值处理来确定所述纯探头校准矩阵;并且机器位置差异值假定是已知的,所述机器位置差异值与所述第一机器数据和所述第二机器数据之间的差相关。

2. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,所述探头输出包括在探头坐标系统中定义的探头输出数据,其中,步骤 (i) 还包括获取与所述第一机器数据相对应的第一探头输出数据,所述步骤 (ii) 还包括获取与所述第二机器数据相对应的第二探头输出数据,所述步骤 (iii) 包括使用所述第一机器数据、所述第二机器数据、所述第一探头输出数据和所述第二探头输出数据来获取纯探头校准矩阵。

3. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,所述步骤 (iii) 包括对所计算的机器位置差异值和所述已知的机器位置差异值之间的误差进行最小化处理。

4. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,所述第一机器数据包括一系列第一机器数据值,所述第二机器数据包括一系列第二机器数据值,所述第一机器数据值和所述第二机器数据值与具有相应的表面法向量的机器位置有关。

5. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,所述纯探头校准矩阵包括至少一个查找表。

6. 根据权利要求 1 所述的方法,还包括如下步骤:

(iv) 获取当所述校准物位于机器范围内的第一位置时从所述校准物获得的机器数据和相应的测量探头输出;以及

(v) 使用在步骤 (iii) 中确定的纯探头校准矩阵来提供球杆数据,所述球杆数据允许被指示的机器运动与实际机器运动进行比较。

7. 根据权利要求 6 所述的方法,其特征在于,步骤 (v) 包括计算用于所述机器范围内的所述第一位置的机器几何校准矩阵。

8. 根据权利要求 1 所述的方法,包括以两个或者多个不同的速度扫描校准物的步骤。

9. 根据权利要求 8 所述的方法,其特征在于,以第一扫描速度执行步骤 (i),然后以第二扫描速度重复步骤 (i)。

10. 根据权利要求 8 或 9 所述的方法,其特征在于,根据以不同速度进行的扫描的机器数据和探头输出确定动态校准矩阵。

11. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,所述测量探头的扫描轴相互正交,并且与所述机器坐标系统的相互正交的轴表面上平行。

12. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,步骤 (i) 和 (ii) 包括沿着跨过校准物表面的基本上相同的路径扫描所述测量探头的所述触针尖端。

13. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,步骤 (i) 和 (ii) 每个都包括在一个或者

多个平面内扫描校准物的表面。

14. 根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 所述校准物包括球体。

15. 一种测量装置, 其包括测量探头、机器和校准物, 其中, 所述测量探头具有触针, 所述触针具有工件接触尖端, 所述测量探头安装在所述机器上, 所述机器包括用于控制所述测量探头的运动的控制器, 其中, 所述控制器被布置成执行校准程序以确定探头校准矩阵, 所述探头校准矩阵使探头输出与机器坐标系统相关联, 所述控制器被布置成:

(i) 使所述测量探头用第一探头偏转扫描校准物, 以便获得第一机器数据;

(ii) 使所述测量探头用第二探头偏转扫描校准物, 以便获得第二机器数据; 以及

(iii) 使用所述第一机器数据和所述第二机器数据获得纯探头校准矩阵, 其中基本上消除了任何机器误差,

所述步骤 (iii) 包括使用数值处理来确定所述纯探头校准矩阵; 并且机器位置差异值假定是已知的, 所述机器位置差异值与所述第一机器数据和所述第二机器数据之间的差相关。

误差校准

技术领域

[0001] 本发明涉及一种用于校准安装在机器上的测量探头的方法,特别涉及一种用于确定探头校准矩阵的方法。

背景技术

[0002] 在例如机械工具和测量探头的测量系统中,存在多种影响读取精度的因素。这些因素包括误差,例如机器误差,其包括:平直度和垂直度误差;动态误差;以及将探头读数转换成机器轴读数所导致的误差。为了缓和这些影响,在进行任何测量之前需要对机器和测量探头进行校准。

[0003] 已经开发了各种技术来校准这种测量设备。这些技术包括在机器的工作范围内在不同的部位进行扫描,以形成机器的误差映射。也已知使用不同的探头偏转来扫描标准的工件,以便生成关于偏转的误差映射函数。当随后测量实际工件时使用该误差映射来检查容差。

[0004] 另一种技术是使用校准物 (calibration artefact) (通常为球体),以便形成校准矩阵,用于将探头 (a, b, c) 轴读数与机器 (x, y, z) 轴读数相关联。问题在于,还存在其他结合到探头校准矩阵中的影响因素。这些因素可被分成全局机器误差、局部机器误差和动态误差。标准探头校准过程将所有这些因素组合成单个探头校准矩阵,该探头校准矩阵仅为在与校准过程中所用的相同的机械区域中以相同速度进行的测量提供将探头轴读数到机器座坐标的准确转换。

[0005] 一般说来,以相同的速度进行校准和测量过程,使得可以减轻动态误差,例如来自加速度的动态误差。但是,当工件的轮廓或者待扫描的小的特征突然改变时,整个测量过程可以进行的速度将受到限制。

发明内容

[0006] 根据根本发明的第一方面,提供一种校准安装在机器上的测量探头的方法,所述测量探头具有触针,所述触针具有工件接触尖端,其中,所述方法包括确定探头校准矩阵,所述探头校准矩阵使探头输出与机器坐标系统相关联,所述方法包括如下步骤:

[0007] (i) 使用第一探头偏转扫描校准物,以便获得第一机器数据;

[0008] (ii) 使用第二探头偏转扫描校准物,以便获得第二机器数据;以及

[0009] (iii) 使用所述第一机器数据和所述第二机器数据获得纯探头校准矩阵,其中基本上消除了任何机器误差。

[0010] 本发明因此提供了测量探头校准技术,其中通过测量探头采用第一和第二探头偏转进行校准物(例如球体)的两种扫描。这提供了第一机器数据和第二机器数据,根据这些数据可确定纯探头校准矩阵,其中基本上去除或者消除了机器误差。使用该方法确定的纯探头校准矩阵因此允许探头坐标系统中的探头输出转换成机器轴分量;也就是说,探头偏转的相关的机器轴分量可以通过将每个探头输出分量乘以相关的矩阵项而获得。如下面

描述的,一旦知道了纯探头校准矩阵,则可以建立校准矩阵来校正机器几何和动态误差。

[0011] 根据本发明的方法提供了一种纯探头校准矩阵,其基本上不受存在的机器误差的影响同时扫描校准物。相反,现有技术中的技术提供具有机器误差的探头校准矩阵,这些机器误差来自整体机器误差和局部机器误差的结合。现有技术中的校准技术因此提供了仅在机器的获取测量数据的区域附近有效的探头校准矩阵,因此对测量工件的每个其他区域需要重新计算探头校准矩阵。通过确定纯探头矩阵,本发明因此较少校准机器所需要的时间并且允许在机床的工作范围内的任何位置的测量探头输出(例如,a,b,c 数值组)被精确地转换成机器坐标系统。如下面更详细的描述的,建立根据本发明的纯探头校准矩阵还允许量化动态误差,从而便于进行变速扫描。

[0012] 有利的是,所述探头输出包括在探头坐标系统中定义的探头输出数据。步骤(i)因此还包括获取与所述第一机器数据相对应的第一探头输出数据。此外,所述步骤(ii)还可包括获取与所述第二机器数据相对应的第二探头输出数据。在这种情况下,所述步骤(iii)可方便地包括使用所述第一机器数据、所述第二机器数据、所述第一探头输出数据和所述第二探头输出数据来获取纯探头校准矩阵。换句话说,可以对两个不同的探头偏转的每个在校准物的表面上的多个点获取机器数据(例如x,y,z 值)和探头输出数据(例如a,b,c 值)的相应数据对。

[0013] 有利的是,所述步骤(iii)包括使用数值处理来确定所述纯探头校准矩阵。例如,可以建立几何关系以允许从在两个探头偏转的每个获取的探头输出数据和相应的机器数据计算出某个数值或者大小(假定某一个纯探头校准矩阵)。从该计算获得的值可以与已知的(例如预先测量的)值进行比较。特别的是,可以方便的进行数值处理,其中纯探头校准矩阵的项迭代变化以最小化这些测量值和已知值之间的差异或者误差。

[0014] 在该方法的步骤(i)中,机器沿着第一工具路径扫描测量探头。该工具路径被选择使得触针尖端接触校准物以便给出上述第一探头偏转。如果校准物是球体,那么所述第一工具路径因此包括(为了简化起见,例如是二维的情况)半径为 M_1 的圆,其大致以球体的中心为中心。在该方法的步骤(ii)中,机器沿着第二工具路径扫描测量探头。为了获得所需的第二触针偏转,所述第二工具路径包括半径为 M_2 的圆,其也大致以球体的中心为中心。第一工具路径和第二工具路径之间的差异(在该例子中为半径差 M_2-M_1)可因此认为是已知的,也就是说,机器已经被指示沿着具有已知的半径差异的两个工具路径来扫描探头。已经发现这种假定是正确的,因为当进行这两种扫描时机器位置的局部和整体机器误差是相同的,或者任何差异是可忽略的。与第一机器数据和第二机器数据之间的差异有关的机器位置差异值(例如 M_2-M_1)可因此方便地假定是已知的。

[0015] 如下面将更详细描述的,也可以得到一表达式,根据该表达式可以在第一和第二探头偏转进行的扫描获取的第一和第二组探头输出数据和机器数据计算机器位置差异值(例如 M_2-M_1)(对于给定的纯探头校准矩阵)。对于每组获得的数据所计算的机器位置差异值可以与已知值进行比较。

[0016] 有利的是,可以得到误差值,该误差值量化了已知的机器位置差异值和计算的机器位置差异值之间的差异。然后运用误差最小化技术(例如最小平方和的方法),其中纯探头校准矩阵的值迭代变化以最小化误差。所述方法的步骤(iii)可因此方便地包括步骤:最小化所计算的机器位置差异值和所述已知的机器位置差异值之间的误差。

[0017] 有利的是,所述第一机器数据包括一系列第一机器数据值,所述第二机器数据包括一系列第二机器数据值。所述第一机器数据值和所述第二机器数据值优选与具有相应的表面法向量的机器位置有关。以上述例子为例,第一和第二机器数据值可因此被布置成与相同角度的机器位置有关。该机器可被布置成使得初始在两种不同探头偏转扫描期间在相同角位置获取机器位置数据。可选择的是可以对第一或者第二机器位置数据进行插值。也可以以类似的方式对第一或者第二探头输出数据进行插值。

[0018] 一旦已经使用上述方法建立了纯探头校准矩阵,可以计算所谓的球杆数据,下面会对此进行更详细的描述。该方法因此有利的包括步骤(iv),即获取当所述校准物位于机器范围内的第一位置时从所述校准物获得的机器数据和相应的测量探头输出。步骤(iv)可以包括取出上述方法的步骤(i)或者步骤(ii)中获取的机器数据和相应的探头输出,或者可以包括收集进一步的数据。在步骤(i)和(ii)期间,第一位置可以对应于校准物的位置,也可以与之不相对应。然后可以执行步骤(v),其中使用在步骤(iii)中确定的纯探头校准矩阵来提供球杆数据,所述球杆数据允许被指示的机器运动与实际机器运动比较。换句话说,知道纯探头校准矩阵允许从扫描校准物时获取的数据生成球杆图(实际上不需要使用球杆)。

[0019] 有利的是,步骤(v)包括为所述机器范围内的所述第一位置计算机器几何校准矩阵。这种机器几何校准矩阵允许从所产生的触针尖端位置数据去除与机器有关的几何误差。

[0020] 当机器几何误差是整体误差和局部误差的结合以及它们的相互作用方式时,机器几何校准矩阵仅从机器工作范围的进行校准的区域去除机器误差。如果需要在该区域外进行测量,则可以在工作范围内的不同位置进行该校准方法,可能会针对所用测量条件产生独立于机器误差的机器误差图(error map)。如果需要,可因此重复步骤(iv),其中校准物放置于机器范围内的一个或者多个不同位置。通过这种方式,可以得到对于机器范围内的多个不同位置的几何校准矩阵。

[0021] 除此之外或者取而代之的是,建立机器(几何)误差还可以将根据本发明确定的纯探头校准矩阵用在校正动态误差的方法中。可以通过使用相同的触针偏转以不同的速度进行至少两个扫描来实现。该方法可因此方便地包括以两个或者多个不同的速度扫描校准物的步骤。方便的是,可以从以不同的速度扫描获取的机器数据和探头输出确定动态校准矩阵。最简单的方式是使用之前使用的(例如步骤(i)或者步骤(ii)使用的)偏转之一以不同的速度进行进一步的校准扫描。有利的是,以第一扫描速度进行步骤(i),然后以第二扫描速度重复步骤(i)。通过这种方式,仅仅需要一次额外的扫描(例如以第二速度)来建立动态校准矩阵。

[0022] 在其最简单的形式中,动态校准矩阵允许在第一扫描速度收集的机器位置数据映射至在第二扫描速度收集的机器位置数据。为了使得能够执行变速扫描,由于探头速度的变化产生的动态误差必须被建立或者对于进行测量的每个速度被插值。因此可以以多个速度(例如三个或更多、四个或更多、五个或更多)扫描校准物,以允许随后以可变的速度进行测量。扫描校准物的速度的数量因此取决于动态校正所需的精度和在测量扫描过程中可能使用的速度的范围。也优选的是,在每个偏转进行多次扫描,每次在所使用的范围内以不同的速度进行,这提高了插值处理的精度。

[0023] 与几何校准矩阵相同的是，动态校准矩阵随着机器范围内的校准物的位置而变化。如果需要，可因此确定多个动态校准矩阵。也可以对于工作范围内的一个或者多个位置建立组合的几何和动态校准矩阵。

[0024] 应当注意的是，现有技术不允许分开探头、机器几何和动态误差补偿矩阵。在已知的校准处理中，不能够以可变的速度进行扫描，因为机器误差对于动态误差的影响是非线性的或者是不可预知的。相反，本发明允许单独建立这些误差中的每一个，由此提高测量精度。

[0025] 上述矩阵（例如纯探头校准矩阵，几何校准矩阵和动态校准矩阵）可有利地实施为任何合适的形式。例如，这种矩阵可以采取函数阵列的形式或者可以包括一个或者多个查找表（LUT）。方便的是，一个或者多个矩阵可以是多维的。

[0026] 有利的是，所述测量探头的扫描轴相互正交（即，探头可以采用笛卡尔坐标系统）。类似的，机器可以采用笛卡尔坐标系统。方便的是，探头坐标系统的轴与所述机器坐标系统的轴表面上平行。尽管这里描述了笛卡尔几何，本发明可以采用任何类型的机器和/或探头几何。例如，测量探头可以输出极坐标数据，该极坐标数据被转换为笛卡尔机器坐标系统。尽管该方法可以实施以提供三维中的探头和机器轴之间的映射，但还应当注意，该技术同样适用于二维应用。

[0027] 有利的是，步骤(i)和(ii)包括沿着跨过校准物的表面的基本上相同的路径扫描所述测量探头的所述触针尖端。方便的是，步骤(i)和(ii)每个都包括在一个或者多个平面内扫描校准物的表面。例如，可以采用下面参照图2描述的多平面扫描技术。但是，应当理解，可以采用任何扫描路径。

[0028] 尽管该方法描述为包括以第一和第二探头偏转进行的两种扫描，但是应当注意，可以额外地进行以不同的探头偏转的一个或者多个进一步的扫描。例如，该方法还可包括使用第三、第四、第五等探头偏转来扫描校准物以获得第三、第四、第五等机器数据的步骤。

[0029] 尽管可以采用任何形状的校准物，但是校准物有利地包括球体。还应当注意，上述方法中采用的机器可以包括任何类型的坐标定位机器。例如，该机器可以包括机床、坐标测量机器或者类似物。

[0030] 根据本发明的第二方面，提供一种测量装置，其包括测量探头、机器和校准物，其中，所述测量探头具有触针，所述触针具有工件接触尖端，所述测量探头安装在所述机器上，所述机器包括用于控制所述测量探头的运动的控制器，其中，所述控制器被布置成执行校准程序以确定探头校准矩阵，所述探头校准矩阵使探头输出与机器坐标系统相关联，所述控制器被布置成：(i)使所述测量探头用第一探头偏转扫描校准物，以便获得第一机器数据；(ii)使所述测量探头用第二探头偏转扫描校准物，以便获得第二机器数据；以及(iii)使用所述第一机器数据和所述第二机器数据获得纯探头校准矩阵，其中基本上消除了任何机器误差。该控制器还可被布置成实施根据上述本发明的第一方面的任何步骤。

附图说明

[0031] 以下将通过附图示例性地描述本发明。其中：

[0032] 图1示意性示出了测量探头；

- [0033] 图 2 示意性示出校准过程的扫描；
- [0034] 图 3 示意性示出了不同偏转的探头的校准；
- [0035] 图 4 示出了测量系统的几何关系；以及
- [0036] 图 5 示意性示出了球杆图。

具体实施方式

[0037] 图 1 示出了探头 10，该探头 10 的一端通过空心轴 12 链接到机床上，触针 14 位于探头 10 的远端，该触针 14 具有工件接触尖端 16。该机床包括床身 20，工件或者该情况下的校准球体 18 位于该床身 20 上。

[0038] 探头 10 是模拟或者扫描探头，产生与触针的在其三个正交（笛卡尔）扫描轴上的任何偏转有关的探头偏转数据。这里原始的探头偏转输出称为 a, b, c 坐标值。该机床还包括位置编码器或者类似物，用于测量空心轴在机器坐标 (X, Y, Z) 几何中的位置，即提供所谓的机器数据。

[0039] 为了提供对触针尖端位置的测量，必须将探头 (a, b, c) 坐标系统中进行的测量转换成到机器 (X, Y, Z) 坐标系统。为了提供这种转换，已知获得所谓的探头矩阵 (Δ_{p+m}) 来将 (a, b, c) 探头数据转换到机器 (X, Y, Z) 坐标系统。这允许探头数据和机器数据相结合，以便提供探头的尖端在机器 (X, Y, Z) 坐标中的位置（并因此提供物体表面上的点在机器 (X, Y, Z) 坐标中的位置）。

[0040] 美国专利文献 US6909983 中描述了用于获得这种探头矩阵的方法。该方法涉及使用单个探头偏转 (d) 来围绕校准球体扫描触针。特别的是，美国专利文献 US6909983 中描述了如何在机器坐标系统的每个平面内进行双向扫描。这也在图 2 中进行了显示，其中已经选择三个正交平面 50, 52 和 54，分别对应于机器轴的 x, y 平面、x, z 平面和 y, z 平面。在这些扫描过程中获取的机器数据和探头偏转数据然后用在迭代（最小平方和）处理中，以寻求最佳的探头矩阵。该最优化过程基于最小化与球面上的确定位置有关的径向误差。

[0041] 美国专利文献 US6909983 中描述的校准过程因此使得可以使用下述矩阵方程来建立尖端位置：

$$\text{尖端位置} = \Delta_{p+m} P + M \quad (1)$$

[0043] 其中，M 是机器数据，P 是探头 (a, b, c) 数据， Δ_{p+m} 是用于将探头 (a, b, c) 数据转换成机器坐标几何的（最优化的）探头校准矩阵。重要的是，应当注意，这项现有技术产生了包括探头 (p) 和机器 (m) 误差的探头校准矩阵。在机器工作区域的不同部分（即其中机器误差是不同的）重复进行校准过程，会产生具有不同数值的探头校准矩阵。如果要获得高精度的测量数据，则可能需要在每个不同位置找到探头校准矩阵 Δ_{p+m} 。

[0044] 根据本发明，提供一种改进的校准技术，其允许找到纯探头校准矩阵。换句话说，提供了用于找到校准矩阵 (Δ_p) 的方法，该校准矩阵不包括来自机器误差的明显影响。根据本发明的方法涉及通过使用至少两个不同的触针偏转来进行测量，下面将进行更详细的描述。

[0045] 参照图 3a, 3b 和 3c，分别示出了零偏转、偏转 d_1 和偏转 d_2 的探头 10a, 10b 和 10c。在全部三种情况下，探头尖端均与校准球体 18 接触。下面将详细描述该方法的步骤。

[0046] 在第一步骤中，确定探头尖端 16 的停靠位置。该停靠位置表示为探头零位置 (P_0)。

这种找到停靠位置的最前面的步骤防止了探头尖端从真正的停靠位置的任何偏转被用在随后的校准计算中。应当注意，这个起始步骤是可选的，可以假定任意的一个探头零位置 (P_0)。

[0047] 执行第二步骤，找到校准球体的中心。至少需要对球体表面的四个点进行测量，以便估算球体中心的位置。国际专利申请 WO00/25087 更详细描述了用于找到球体中心的方法。第二步骤使得能够选择校准路径，以确保探头尖端在整个校准过程与校准球体接触，并具有大致所需的偏转量。该步骤可以仅提供球体中心位置的估计，球体中心可以如下面描述的作为随后最优化过程中的变量。可选择的是，该步骤中找到的球体中心位置可以在随后的最优化过程中是固定的（即，假定是已知的）。

[0048] 如图 3b 所示，围绕校准球体 18 扫描具有大致恒定的触针偏转 d_1 的测量探头。为了方便起见，沿着上述图 2 所示的路径在机器坐标系统的每个平面上进行扫描。但是，应当理解，被扫描的三个平面不一定需要是正交的。但是，图 2 所示类型的扫描过程是优选的，因为它们确保了触针尖端基本上沿着校准球体的表面追踪基本上相同的路径，而与探头偏转量无关。在扫描过程中，机器数据 (x, y, z) 和相应的探头偏转 (a, b, c) 的数据在扫描路径周围的多个点上被收集。

[0049] 应当理解，可以沿着一个方向扫描图 2 所示的路径，也可以进行双向扫描。双向扫描的优点在于，从纯探头校准矩阵去除了与方向有关的效应（例如，摩擦，拖曳等）。可选择的是，可以在不同方向进行单独的纯探头校准矩阵的计算以用于扫描。

[0050] 如图 3c 所示，使用大致恒定的第二触针偏转 d_2 重复进行双向扫描过程。在第二扫描过程中，围绕扫描路径在多个点收集机器数据组 (x, y, z) 和相应的探头偏转组 (a, b, c) 的数据对。

[0051] 用于第一和第二扫描的合适的偏转的例子是 $50 \mu m$ 和 $500 \mu m$ 。两种扫描都可以以例如 $250 mm/s$ 的速度进行。

[0052] 参照图 4，现在描述为上面参照图 3 描述的两个不同的偏转 (d_1 和 d_2) 获得的数据如何被用来计算纯探头校准矩阵。

[0053] 图 4a 示出了第一扫描（即触针偏转为 d_1 的扫描）的几何图形。可以看出，校准球体在 X-Y 平面的表面限定了半径为 R 的圆 80，围绕半径为 S_1 的圆 82 扫描机器空心轴，以提供所述触针偏转 d_1 。因此，可以表示为：

$$R^2 = M_1^2 + K_1^2 + 2M_1 \text{Proj}_1 \quad (2)$$

[0055] 其中， M_1 是机器向量的长度， K_1 是机器坐标中探头向量的长度， Proj_1 是机器坐标中的探头向量在表面法向量 N 上的数学投影。

[0056] 可以对图 4b 的第二扫描几何形状建立类似的表达式，其中，围绕半径为 S_2 的圆 84 扫描机器的空心轴，以提供触针偏转 d_2 。其表达式为：

$$R^2 = M_2^2 + K_2^2 + 2M_2 \text{Proj}_2 \quad (3)$$

[0058] 其中， M_2 是机器向量的长度， K_2 是机器坐标中探头向量的长度， Proj_2 是机器坐标中的探头向量在（相同）表面法向量 N 上的数学投影。

[0059] 结合表达式 (2) 和 (3) 生成如下表达式：

$$M_1 - M_2 = \frac{K_2^2 - K_1^2 + 2(M_2 \text{Proj}_2 - M_1 \text{Proj}_1)}{(M_1 + M_2)} \quad (4)$$

[0061] 如上所述, K_1 和 K_2 是在机器坐标 (X, Y, Z) 几何中定义的距离。 K_1 和 K_2 的值可以分别通过向量长度 Q_1 和 Q_2 给出 (即 $K_1 = ||Q_1||$, $K_2 = ||Q_2||$), 其中, 向量 Q_1 和 Q_2 通过下列表达式与探头 (a, b, c) 几何中获得的测量值相关 :

$$[0062] Q_1 = \Delta_p(P_1 - P_0) \quad (5a)$$

$$[0063] Q_2 = \Delta_p(P_2 - P_0) \quad (5b)$$

[0064] 其中, P_1 和 P_2 分别是第一和第二触针偏转的探头坐标系统中的测量点 (a, b, c), P_0 是未偏转的探头位置 (也定义在探头坐标系统中), Δ_p 是纯探头校准矩阵, 其允许从探头几何转换成机器几何。纯探头校准矩阵可以根据需要是线性的或者非线性的。如果纯探头校准矩阵是非线性的, 应当注意, P_1 和 P_2 也可以包括更高阶探头偏转 (a, b, c) 的函数。

[0065] 机器长度值 M_1 和 M_2 也可以包括球体中心值 (x_0, y_0, z_0) , 其表达式为 :

$$[0066] M_1 = +\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \quad (6a)$$

$$[0067] M_2 = +\sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2} \quad (6b)$$

[0068] 其中, 第一和第二扫描的机器位置数据分别为 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 。

[0069] 将表达式 (5) 和 (6) 结合到表达式 (4) 中得出一个表达式, 其中 $M_1 - M_2$ 与在第一和第二偏转 (即偏转 P_1 和 P_2) 获取的探头数据 (a, b, c) 和在第一和第二偏转获取的相应的机器数据 (x, y, z) 相关。此外, 该表达式还包括作为变量的探头校准矩阵 (Δ_p) 和球体中心位置 (x_0, y_0, z_0) 。如果需要, 尖端半径也可以作为变量包括在其中。

[0070] $M_1 - M_2$ 的标称值是触针偏转为 d_1 和 d_2 时测量的机器位置的差, 因此可以认为是已知的。对于上述给出的例子, 对于第一和第二扫描的合适的探头偏转 (d_1 和 d_2) 可以是 $50 \mu m$ 和 $500 \mu m$ 。这可通过如下方式实现 : 围绕半径差已知为 $450 \mu m$ 的两个环形工具路径扫描机器。因此可以假定 $M_1 - M_2$ 的值为 $450 \mu m$ 。

[0071] 如上所述, 在两个不同偏转 d_1 和 d_2 的情况下在球体表面的多个点处获取探头数据和机器数据。每个扫描因此产生多对 (例如, n 对) 机器位置 (x, y, z) 数据和探头 (a, b, c) 测量数据。

[0072] 在理想的情况下, 在 d_1 扫描期间获得的 n 对数据中的每对数据与在 d_2 扫描期间获得的 n 对数据涉及相同的角坐标 (并因此涉及相同的表面法向量 N)。但是, 实际上, 在第一扫描 (即偏转为 d_1 的扫描) 时获取的数据对的表面法向量 N 不可能与在第二扫描 (即触针偏转为 d_2 的扫描) 时获取的数据对的表面法向量 N 精确对应。因此可在一组数据上进行插值处理 (例如线性插值), 以提供偏转 d_1 和 d_2 的数据组, 其包括与相同的表面法向量对应的一系列机器位置数据值。

[0073] 之后, 可以将 n 个获取的数据的总体差值误差表示为 :

$$[0074] Error^2 = \sum_{i=1}^{i=n} (Act_i - Nom)^2 \quad (7)$$

[0075] 其中, “ Act_i ” 是对于第 i 组数据使用表达式 (4) 的右侧得到的 $M_1 - M_2$ 的实际值, “ Nom ” 是 $M_1 - M_2$ 的标称值或者已知值。表达式 (7) 因此允许进行数值的、最小平方和的误差最小化处理, 以得到上述变量。特别的是, 这个最小化处理生成没有任何机器误差的探头校准矩阵 (Δ_p)。该最小化处理也可用来得到球体中心位置 (x_0, y_0, z_0) , 但是如果之前已经测量为足够高的精度, 则其可以作为常量包括在最优化处理中。如果需要, 尖端半径也可以作

为变量包括在误差最小化处理中。

[0076] 一旦已经得到探头校准矩阵,给出如下用于将探头坐标 (a, b, c) 转换成机器坐标 (x, y, z) 的表达式 :

$$[0077] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \Delta_p \begin{bmatrix} a - a_0 \\ b - b_0 \\ c - c_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

[0078] 其中, a, b, c 分别是用于 A, B, C 探头轴的探头读数 ;a₀, b₀, c₀ 是未偏转的探头读数 (静止读数) ;以及线性校准矩阵为 :

$$[0079] \Delta_p = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0080] 因此,例如 :

$$[0081] x = a_{11}[a-a_0] + a_{12}[b-b_0] + a_{13}[c-c_0] \quad (10)$$

[0082] 对于二维系统,可以将探头校准矩阵简单的减少为二乘二矩阵。如果需要,也可以计算非线性纯探头校准矩阵 (例如三乘五或者三乘七的矩阵),其中,也可以包括更高阶的项。在该例子中,应当理解,探头数据也可以包括更高阶的项。

[0083] 上述技术的优点在于,与现有技术的方法不同,提供的纯校准矩阵不包括任何机器误差。一旦已经得到纯探头校准矩阵,就可以执行下一步骤来得到在机器的某一区域或者某些区域的机器误差。特别的是,一旦已经得到纯探头矩阵 Δ_p ,就可使用校准的探头得到机器几何误差。

[0084] 这里,应当注意的是,用于确定机器几何误差的最普通的技术是所谓的球杆测试 (ball bar test)。球杆测试是确定探头运动的球形度的校准过程。在欧洲专利文献 EP0508686 中描述了球杆测试的一个例子,其中机器主轴通过可延伸的杆 (球杆) 连接到固定于机床上的枢转接头上。在该例子中,球杆具有内部换能器,用于当指示机器主轴穿过枢转接头中心的圆时测量球杆的长度。

[0085] 现有技术的球杆技术的结果是所谓的球杆图。图 5 示出了这种球杆图的一个例子。具体而言,图 5 示出了如何指示机器描绘某一半径的圆 (例如真圆 60)。从真圆 60 的任何偏离被球杆记录,并且可以被绘出图形 62 以显示机器的精度。然后已知的是,应用几何校正来补偿机器的几何误差,即使得机器按指示穿过真圆。

[0086] 根据本发明的方法允许建立球杆图,而不需要实际的球杆。考虑沿着围绕校准球体的赤道的轮廓 (例如在 x-y 平面) 获取的一组探头和机器数据。该机器和探头数据可以是当如上所述计算纯探头矩阵时获取的数据,或者可以单独获取。探头尖端 (a, b) 读数可以乘以纯探头矩阵 Δ_p ,并被加到机器 (x, y) 读数。换句话说,球杆数据可以通过如下表达式给出 :

$$[0087] \text{球杆数据} = \Delta_p P + M \quad (11)$$

[0088] 其中,P 是探头数据,M 是机器数据。使用表达式 (11) 计算的球杆数据因此提供了图 5 所示类型的球杆图。该技术是有利的,因为可以获得与探头运动路径 (即工具路径) 有关的信息,而不需要使用球杆进行单独的校准处理。

[0089] 在已经计算出球杆数据之后,可以以一种已知的方式得到补偿数据并将其应用到

尖端位置数据,以减小这些几何误差。换句话说,可以得到补偿矩阵以将图 5 所示的绘制为 62 的数据转换成真圆 60。因此尖端位置可以被表示为如下表达式:

[0090] 尖端位置 = $\Delta_p P + \Delta_m M$ (12)

[0091] 其中, Δ_m 是补偿,其在被应用到机器数据 (M) 时,去除几何补偿。应当注意,导致由补偿 Δ_m 校正的机器几何误差的一个原因来自控制机器 x 和 y 的运动的伺服电机的反冲 (backlash)。

[0092] 还应当记住,根据本发明的方法提供的纯探头校准矩阵 Δ_p 独立于机器误差,所述机器误差与机器工作范围内的位置有关,在该机器工作范围内进行测量以获得所述纯探头校准矩阵。从探头校准矩阵排除机器误差还有利于进行可变速度的扫描。换句话说,本发明还允许对系统的任何动态误差进行计算,并相应地补偿测量数据。

[0093] 为了确定动态误差,可以选择的偏转(例如 d_1)但不同的速度进行两个校准扫描,例如,扫描的两个极端速度可以是 250mm/s 和 330mm/s。假设所有的其他条件具有可忽略的差异,则通过两个不同的速度的扫描获得的读数之间的差异导致了动态误差。这允许计算动态误差补偿矩阵 Δ_a ,其补偿了尖端位置数据的动态误差。

[0094] 对于位于两个所选的扫描速度之间的扫描速度,可以对动态误差补偿功能进行径向插值。如果必要,可以进行额外的校准扫描,以增加插值的精确度。有利的是,所选择的偏转要么是 d_1 ,要么是 d_2 ,因为这可减小所需的校准扫描的次数。一旦已经计算出动态误差补偿,能够进行可变速度的扫描,由此提供对部件的更快的测量,而不会损失数据或者分辨率。

[0095] 由于速度变化产生的动态误差补偿 (Δ_a) 可以以多种方式应用到所获取的数据。一种方式是首先以上述方式使用球杆数据计算机器误差补偿矩阵 (Δ_m),以便在机器范围区域中对局部误差和整个机器误差进行补偿,所述多速度扫描在所述机器范围区域中进行。然后以不同的速度以之前使用的偏转之一进行进一步扫描。然后可以根据以相同偏转不同的速度进行的两个扫描之间的差异得到动态误差补偿矩阵 (Δ_a)。这允许通过如下表达式给出尖端位置:

[0096] 尖端位置 = $\Delta_p P + \Delta_a \Delta_m M$ (13)

[0097] 应当注意,尽管这里描述的矩阵 (Δ) 可以采取上述例子中描述的几何矩阵的形式,但是实际上,该矩阵也可以实施为任何形式。例如,每个矩阵可以包括一个或者多个查找表或者类似物。在动态补偿矩阵的情况下,可以将多个动态误差补偿矩阵 Δ_a 以查找表 (LUT) 的形式提供,其在以一定的预定范围内的速度扫描时被使用。

[0098] 还可以提供组合的几何 / 动态补偿矩阵 (Δ_{a+m}),其通过减去从以相同偏转不同的速度进行的两个扫描获得的球杆数据而计算获得。所得到的球杆数据然后可以被用来计算动态机器误差的组合补偿矩阵 (Δ_{a+m}),具体如下表达式所示:

[0099] 尖端位置 = $\Delta_p P + \Delta_{a+m} M$, (14)

[0100] 对于这两种技术,几何和动态误差补偿通常仅对于已经进行了扫描的位置而言是精确的。如果机器的工作范围内的其他位置用于测量扫描,可以对所述其他位置或者其中的一些重复进行校准处理,以能够对不同位置之间的误差补偿进行插值。

[0101] 如果在产生校准补偿矩阵的校准过程中进行顺时针和逆时针扫描,则可以产生组合校准矩阵,其将会平均化动态误差或者可以对每个方向产生校准矩阵。

[0102] 校准物优选为球体,因为其给出最不复杂的结果,但是,可以采用任何的其他形状,例如,可以使用弯曲的形状例如卵形体。在这种情况下,球杆图根据卵形体而非球体发生变化。也可以使用具有小平面的物品,但是,由于当采用高速时恒定的加速度难以保持,所以这可能会增加计算的复杂程度。

[0103] 应当注意,这里描述的速度、探头偏转等表示可以被使用的典型速度,其指示以例子的形式给出以有助于理解本发明。根据本发明可以根据需要使用其他速度、探头偏转和扫描路径等。例如,如果在校准之后要测量具有微小特征的物品,那么所采用的速度将会小得多,例如是 35mm/s 而不是 250mm/s。因此,在这些例子中使用的速度仅仅只是示例,在一些情况下,可以比给出的速度更高或者更低。

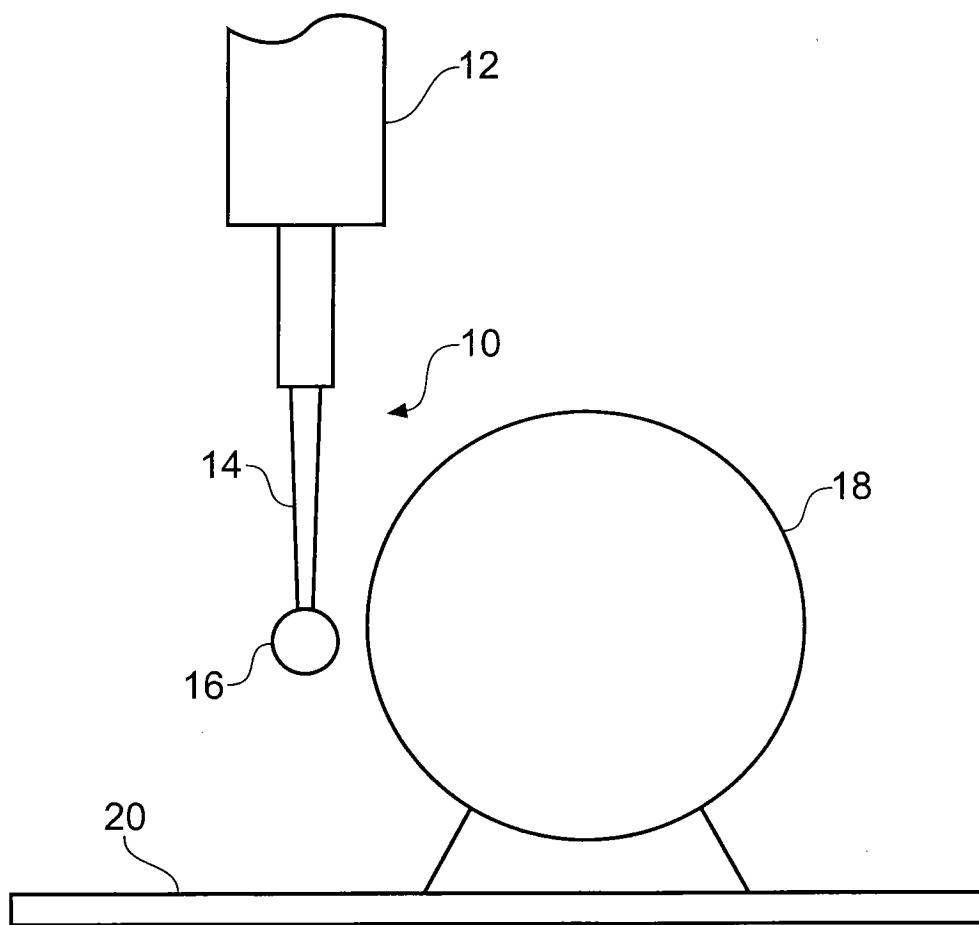


图 1

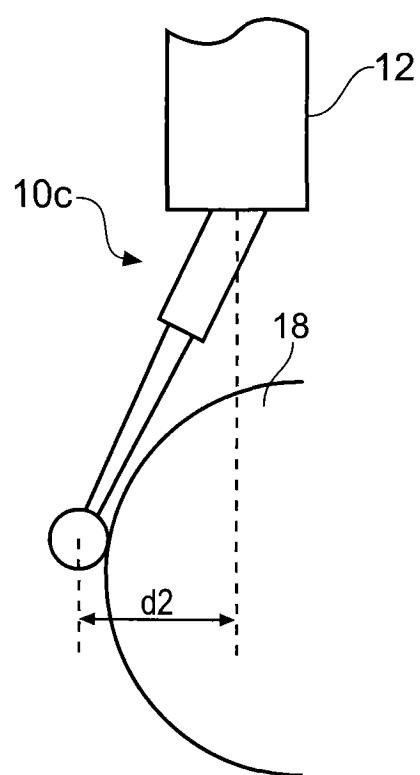
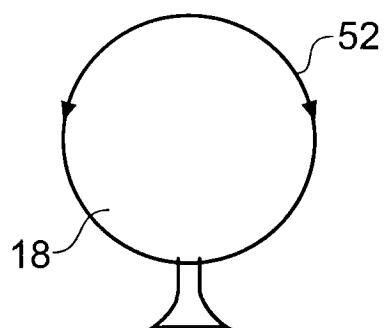
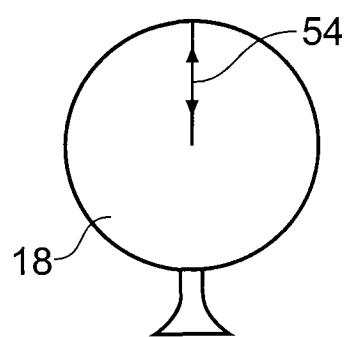
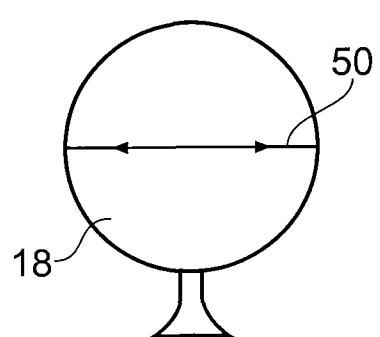


图 2

图3c

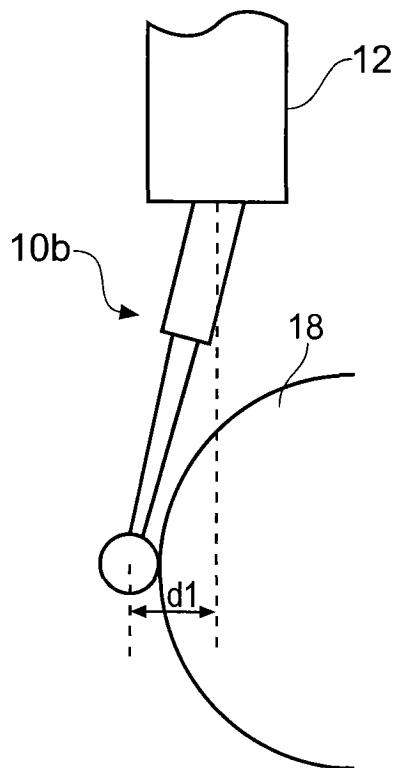


图3b

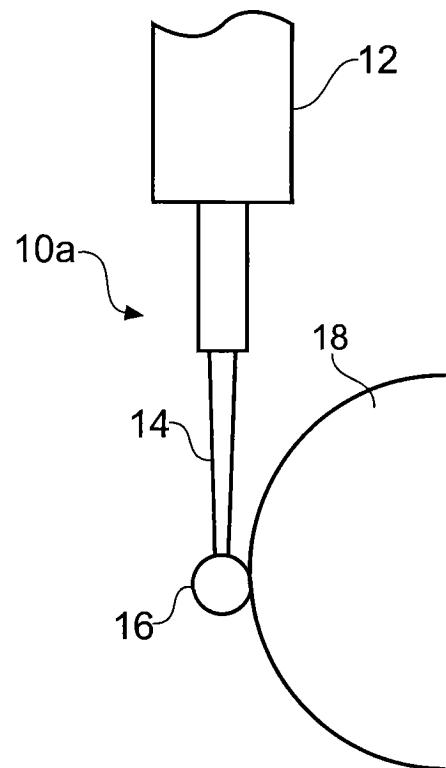


图3a

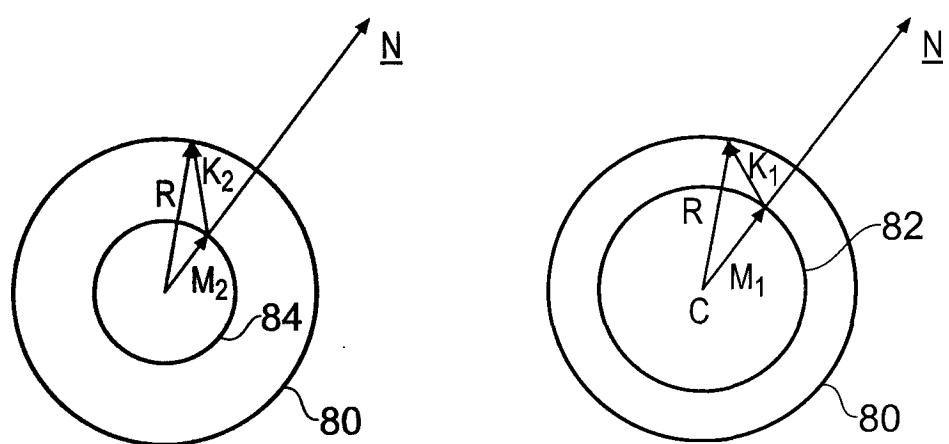


图4 b

图4 a

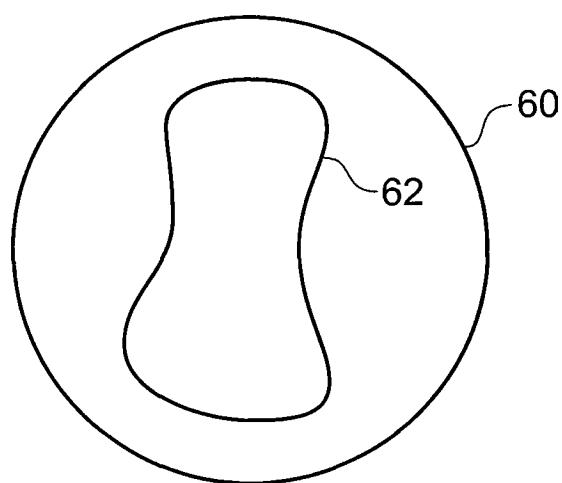


图 5