



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101290212 B

(45) 授权公告日 2012. 09. 05

(21) 申请号 200810096381. 2

WO 90/07097 A1, 1990. 06. 28, 参见说明书第 1 页第 29 行至第 30 页第 15 行、附图 1-19.

(22) 申请日 2008. 04. 17

CN 1637380 A, 2005. 07. 13, 全文.

(30) 优先权数据

US 5446971 A, 1995. 09. 05, 全文.

07106415. 8 2007. 04. 18 EP

US 6587810 B1, 2003. 07. 01, 全文.

(73) 专利权人 六边形度量衡股份公司

WO 90/07097 A1, 1990. 06. 28, 参见说明书第 1 页第 29 行至第 30 页第 15 行、附图 1-19.

地址 瑞典纳卡斯特兰德

(72) 发明人 P·乔迪尔 B·彼特森 S·努特 W·威尔科克斯

审查员 王建良

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001

代理人 赵华伟

(51) Int. Cl.

G01B 11/00(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 1211724 A, 1999. 03. 24, 全文.

US 6568242 B2, 2003. 05. 27, 全文.

US 4603487 A, 1986. 08. 05, 全文.

WO 2007/017235 A2, 2007. 02. 15, 说明书第 13 页第 28 行至第 15 页第 27 行.

CN 1573284 A, 2005. 02. 02, 全文.

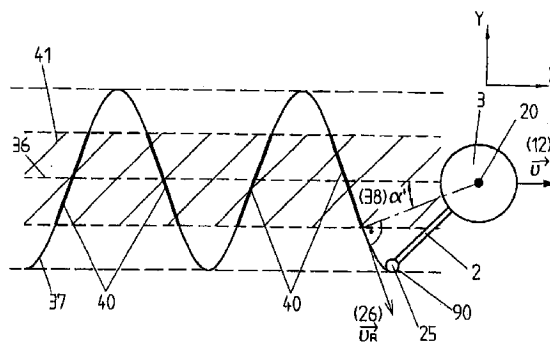
权利要求书 1 页 说明书 7 页 附图 4 页

(54) 发明名称

用于扫描工件表面的方法

(57) 摘要

一种方法,用于采用设置在坐标测量机器(CMM)4的支架3上的扫描探针2以恒定的扫描速度|V<sub>a</sub>|来扫描工件1表面。该CMM包括第一组驱动装置(6,7,8),以便沿着三个线性轴(x,y,z)移动支架,并且支架3包括第二组驱动装置(14,17),以便使扫描探针2相对于所述支架3以两个自由度移动。该方法包括连接至驱动装置组(6,14,17)的控制装置33,以及用于存储待扫描表面的理论剖面 and 坐标的存储装置。



1. 一种用于扫描工件 (1) 的表面的方法, 所述方法采用设置在坐标测量机器 (4) 的支架 (3) 上的扫描探针 (2) 对所述工件 (1) 的所述表面进行扫描, 所述扫描探针 (2) 具有探针尖端, 所述探针尖端能沿循扫描路径保持与工件的表面接触, 所述坐标测量机器包括第一组致动器 (6, 7, 8), 以便沿着三个线性轴 (x, y, z) 移动所述支架 (3), 所述支架 (3) 包括第二组致动器 (14, 17), 用于致动所述扫描探针 (2) 相对于所述支架 (3) 的移动, 所述坐标测量机器还包括一个控制器 (33), 被设置成驱动所述的两组致动器 (6, 7, 8, 14, 17), 所述方法包括下述步骤:

- (i) 确定所述探针尖端与所述工件表面的接触点的扫描速度的值  $|V_a|$ ;
- (ii) 操作所述的第一和第二组致动器 (6, 7, 8, 14, 17), 以便将探针尖端 (25) 定位成接触所述表面 (1);
- (iii) 操作所述第一组致动器 (6, 7, 8), 以便沿着一确定的轨迹 (36) 移动支架 (3);
- (iv) 操作所述第二组致动器 (14, 17), 以便在支架 (3) 相对于表面相对运动的同时产生所述的扫描探针 (2) 相对于支架 (3) 的移动;

由此, 所述控制器 (33) 沿着所述扫描路径 (37) 根据至少一种反向运动学变换而调整所述两组致动器 (6, 7, 8, 14, 17) 的驱动, 以便至少在所述扫描路径 (37) 的部分 (40) 上维持所述探针尖端 (25) 的所述扫描速度等于所确定的值  $|V_a|$ 。

2. 根据权利要求 1 的方法, 所述扫描探针相对于支架的运动横切所述轨迹 (36) 的瞬时方向。

3. 根据权利要求 1 的方法, 所述扫描探针相对于支架的运动为摆动。

4. 根据权利要求 1 的方法, 所述控制器 (33) 进行的调整是根据所述探针 (2) 的角位置 (22, 23) 而进行的。

5. 根据权利要求 1 的方法, 以这样一种方式来操作第二组致动器, 该方式使得维持探针 (2) 相对于待检测工件 (1) 表面的倾角恒定。

6. 根据权利要求 1 的方法, 其中, 所述探针 (2) 为接触型探针, 并且其中, 以这样一种方式操作所述第二组致动器, 该方式使得维持探针和待检测工件 (1) 之间的接触力 (F) 恒定。

7. 根据权利要求 1 的方法, 还包括沿着所述的扫描路径 (37) 以规则的时间间隔 ( $\Delta t$ ) 对坐标采样的步骤。

8. 根据权利要求 1 的方法, 所述至少一种反向运动学变换采用了等间隔排布在所述扫描路径 (37) 上的坐标 (60)。

## 用于扫描工件表面的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种用于扫描工件表面的方法。

### 背景技术

[0002] 已知有多种扫描方法,其中,机械探针被固定在机械的心轴上,其以直线在每个可能的方向(x, y, z)上跨过工件的表面。在完成每条线之后,机械心轴将探针移至离开所完成线的新位置,并沿着平行线而重复该移动。

[0003] 现有技术中已知的这些方法的一个主要缺点在于由于覆盖表面的整个扫描区域时整个机器需要向后和向前移动,所以它们对于扫描复杂的形状相当慢。另外,由于负责定位表面检测设备的元件的质量大而产生的强惯性力,机器的加速和减速会在测量过程中产生误差。因此,惯性力所引起的弹性变形可负面地影响测量。

[0004] 为最小化惯性作用并因而保证更精确的结果,在EP1489377中已经引入了恒速扫描装置。这些扫描装置仍然不适合于非直线运动。

[0005] 还已知其它涉及探针旋转运动的扫描装置。相反,这些扫描方法非常适合于球形或圆柱形的表面,但是不适合于平坦表面。US5895442描述了这种探针的一个实例,基于存储的校正值而允许沿着圆柱形或者球形表面恒速扫描。

[0006] EP0402440公开了一种扫描装置,其更有效地处理带有更复杂轮廓的表面。该装置允许根据常规轴(x, y, z)在线性运动上有另外的旋转自由度。该探针由设置在测量机器头部上的触针组成,从而该头部包括可围绕两个正交轴旋转的轴。触针可采取任意方向,从而该尖端保持与待扫描表面接触。这样,可沿着曲线路径更有效地进行扫描,同时由于触针的轻质而最小化惯性作用。但是,该装置未考虑电影效应,以便估计施加于探针上的力,因此精度不是最佳的。另外,由于沿着扫描路径施加的摩擦力,该电影效应放大了探针尖端上的磨损。

### 发明内容

[0007] 本发明的目标在于克服现有技术中的已知方案的局限性。

[0008] 本发明提供了一种用于扫描工件表面的方法,所述方法采用设置在坐标测量机器的支架上的扫描探针对所述工件的所述表面进行扫描,所述扫描探针具有探针尖端,所述探针尖端能沿循扫描路径保持与工件的表面接触,所述坐标测量机器包括第一组致动器,以便沿着三个线性轴移动所述支架,所述支架包括第二组致动器,用于致动所述扫描探针相对于所述支架的移动,所述坐标测量机器还包括一个控制器,被设置成驱动所述的两组致动器,所述方法包括下述步骤:确定所述探针尖端与所述工件表面的接触点的扫描速度值;操作所述的第一和第二组致动器,以便将探针尖端定位成接触所述表面;操作所述第一组致动器,以便沿着一确定的轨迹移动支架;操作所述第二组致动器,以便在支架相对于表面相对运动的同时产生所述的扫描探针相对于支架的移动;由此,所述控制器沿着所述扫描路径根据至少一种反向运动学变换而调整所述两组致动器的驱动,以便至少在所述扫

描路径的部分上维持所述探针尖端的所述扫描速度等于所述确定值。

[0009] 优选地,所述扫描探针相对于支架的运动横切所述轨迹的瞬时方向。

[0010] 优选地,所述扫描探针相对于支架的运动为摆动。

[0011] 优选地,所述控制器进行的调整是根据所述探针的角位置而进行的。

[0012] 优选地,以这样一种方式来操作第二组致动器,该方式使得维持探针相对于待检测工件表面的倾角恒定。

[0013] 优选地,所述探针为接触型探针,并且以这样一种方式操作所述第二组致动器,该方式使得维持探针和待检测工件之间的接触力恒定。

[0014] 优选地,所述方法还包括沿着所述的扫描路径以规则的时间间隔对坐标采样的步骤。

[0015] 优选地,所述至少一种反向运动学算法采用了等间隔排布在所述扫描路径上的坐标。

[0016] 根据本发明,通过采用设置在坐标测量机器(CMM)4的支架3上的扫描探针2以恒定扫描速度 $|V_a|$ 扫描工件1表面的方法而实现这些目标。该CMM包括第一组第一组致动器6,7,8,用于沿着三个线性轴(x,y,z)移动支架,并且支架3包括第二组致动器14,17,用于使扫描探针2相对于所述支架3而运动。CMM包括连接至该组致动器6,7,8,14,17的控制器33。

[0017] 该方法包括如下步骤:

[0018] (i) 确定扫描速度值;

[0019] (ii) 操作该组致动器6,7,8,14,17,以便将探针尖端25定位成接触表面1;

[0020] (iii) 操作第一组致动器6,7,8,以便沿着确定的轨迹36移动支架3;

[0021] (iv) 操作第二组致动器14,17,以便在支架3相对于表面相对运动的同时产生扫描探针2相对于支架3的移动。

[0022] 控制器33沿着扫描路径37而调整两组驱动装置6,7,8,14,17的驱动,以便至少在扫描路径37的部分40上维持扫描速度等于确定值 $|V_a|$ 。

[0023] 本发明满足了扫描装置在测量领域的需要,其可例如通过摆动有效地扫描所有类型的表面,同时在整个测量过程中有可能在整个扫描路径上维持非常高的精度。恒扫描速度的特征还通过在加速阶段减小由于更大的摩擦力所产生的过热而改进探针的寿命。

[0024] 所公开的扫描装置的另一个优点是一种简单的采样过程,以提供离散点的均匀分布,其坐标需要沿着扫描路径而在表面上测量。实际上,通过简单地设置规则的采样时间间隔,将沿着扫描路径而均匀地散布这些点。

## 附图说明

[0025] 借助于对以举例给出并由附图描述的实施例的说明,将更好地理解本发明,其中:

[0026] 图1示出了用于应用本发明的坐标测量机器和扫描装置;

[0027] 图2示出了安装探针的横截面。

[0028] 图3示出了扫描探针及其角位置的3D视图。

[0029] 图4示出了探针所沿循的扫描路径的顶视图,并描述了速度向量组成。

[0030] 图 5 解释了如何根据本发明的另一方面而进行速度调整过程。

### 具体实施方式

[0031] 在图 1 中公开了根据本发明一优选实施例的坐标测量机器 4。这样的机器 4 还称为 CMM。CMM 4 包括连至支架 3 的扫描探针 2。支架 3 可沿任何线性方向 (X, Y, Z) 移动, 而扫描探针 2 相对于支架 3 具有两个旋转自由度。在该实例中, 探针的旋转轴分别为垂直的、水平的, 但是可考虑到轴的其它组合 (例如, 两条独立的正交水平轴, 或者任何数量的旋转轴, 或者旋转和线性自由度的任意组合)。

[0032] 根据该环境, CMM 可装有几类型测量探针, 例如, 包括但不排它的:

[0033] 如图 2 所描述的接触型探针, 其中, 对着测量表面而推动接触球, 并且通过考虑探针的偏斜而计算接触点的坐标, 该坐标由应力计或其它合适的传感器给出;

[0034] 激光探针 (未显示), 其中, 探针将一条或多条激光光束照射到表面上, 并给出沿着光路的距离;

[0035] 光学探针, 其基于微型成像设备或者机械显示系统。

[0036] 下面将特别参考第一种情形的接触型探针 2 而进行描述, 其被 CMM 4 沿扫描路径带到接触表面 1 的坐标待测点。但是, 该特征不是必要特征。对于非接触型探针, 通过将探针对准表面的坐标待检测的那些点而同样地应用本发明的方法。通常, 本发明包括采用 CMM 将测量探针沿着扫描路径以恒定的速度带到和表面的坐标待测点之间呈测量关系的步骤。

[0037] 下面, 如图 1 所描述的, 参考 CMM 的常规方位而使用方向“垂直”和“水平”。但是, 必须理解, 为简单起见而在这里使用这些方向, 并不表示对本发明的限制, 本发明可以以其它类型的测量装置以及任意地空间定位而被实施。

[0038] 通过作为例子而在图 1 中以电动机 6, 7, 8 示意性地表示的第一组驱动装置, 支架 3 可在任意线性方向 (X, Y, Z) 上移动。可通过合适的编码器 (未示出) 测量支架 3 相对于轴 X, Y, Z 的位置。优选地, 由 CMM (在图 1 中可见) 的数字控制器 33 来控制和处理编码器进行的电动机 6, 7, 8 的驱动以及测量。控制器还负责读取编码器的位置和测量探针的输出, 以及将该数据转变为表面 1 的点坐标。

[0039] 由于支架 3 的大部分元件非常重, 所以在图 4 中进一步示出的支架 3 所沿循的轨迹 36 优选为线性的, 或者至少特征是低加速水平, 以减小惯性作用。

[0040] 和支架 3 相反, 探针 2 由轻质材料制成。虽然支架 3 被定位成粗略地确定扫描区域并且沿着优选为直线的轨迹 36 移动, 但是探针 2 旨在使得扫描在表面 1 上提供更多的参照点以及坐标测量方面更为有效。为实现这一点, 探针 2 可横向移至线性轨迹 36 的瞬时方向, 同时相对于支架 3 稍微旋转运动。这些旋转运动例如可以为摆动。它们被第二组驱动装置 14, 17 驱动, 其目标一方面在于根据相应的轴而确定角速度  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ , 但另一方面在于施加力矩  $T_1$ ,  $T_2$ , 以便允许如此操作时接触表面 1。优选为球形的探针 25 尖端因此可保持与扫描表面 1 接触, 同时以随后在该文献中定义的恒定速度  $V_s$  进行扫描。探针 25 尖端和待扫描表面 1 之间的接触力  $F$  被定义为由表面施加至探针尖端 25 上的反作用力。也在图 1 中描述的接触力因此与同表面 1 的接触点正切的表面垂直。

[0041] 图 2 示出了将探针 2 设置在支架 3 上以及如何被第二组驱动装置驱动而运动的截面图。优选地, 该第二组驱动装置由两个致动器 14, 17 组成。第一致动器 14 沿着 Z 轴驱动

中心轴,并优选为电动机。探针头 24 装配在轴底部上,从而固定探针 2 并将其旋转运动传送到探针 2。相应于该轴所获得的旋转运动的角速度还称为  $\omega_1$ 。

[0042] 探针头部 24 被设计为探针 2 还可围绕另一条轴而自由旋转,借此,该第二轴与第一轴(在该实例中为 Z 轴)正交,但是其在平面上的方向取决于中心轴的位置。第二致动器 17 沿着该第二轴驱动旋转运动,并且也优选为电动机。相应于该轴所获得的旋转运动的角速度还称为  $\omega_2$ 。

[0043] 在该实例中,为简单起见,我们假定电动机 14,17 的两条轴在空间 20 中汇集于一点,即使不一定总是如此。本领域技术人员将可理解,我们的推导和本发明的方法同样适用于一般情况。该点 20 为两个旋转运动的中心,并且当支架 3 以恒定的线性速度运动时,可表示伽利略参考系的中心。由于点 20 沿轨迹 36 的坐标是已知的,如图 3 进一步所述的,所以探针 23 的长度允许确定探针 25 尖端和两条轴 20 的交点之间的接触点位置,并因此依次获得接触点的绝对坐标。

[0044] 图 3 示出了如何获得探针尖端 25 的绝对坐标。其由探针相应于旋转轴的角位置  $\alpha$ ,  $\theta$  确定。将球面坐标  $(L, \alpha, \theta)$  简单转换为线性坐标  $(X, Y, Z)$  产生了绝对坐标。探针 2 在任意方向  $(\alpha, \theta)$  上的定向产生了更大的扫描自由度,这是由于它允许在不失去与具有多个有角表面 1 的工件接触的条件下进行扫描,同时探针头 24 简单地沿着线性轨迹 36 移动。另外,和大重量的支架 3 相比,带动轻质触针 2 时可减小惯性作用。探针尖端 25 的绝对坐标沿着扫描路径 37 移动,该路径由探针尖端 25 和表面 1 之间的所有接触点组成。在本发明的优选实施例中,将绝对坐标 44 存储在存储装置中。

[0045] 图 4 示出了平坦表面  $(x, y)$  上可能的扫描路径,并解释了探针尖端 25 上速度向量的组成。由虚线表面表示待扫描表面 1;其在这里包括在平面  $(x, y)$  中但是可跨过三维空间  $(x, y, z)$ 。支架 3 的轨迹 36 为线性的虚线,其可指向任何方向。探针的固有移动联合支架 3 沿轨迹 36 的移动决定了探针 25 尖端所沿循并且同时测量点 90 所沿循的扫描路径 37。重要的是注意在接触型探针的情况下,测量点 90 对应于探针 25 尖端和待测量表面 1 之间的接触点,但是如果本发明应用于非接触型测量系统,例如光学探针,则不必是这种情况。尽管图 2 仅仅示出了该路径在两维中的投影,但是该路径不限于某平面,并且还可根据待测量对象的曲率和形状跨过三维空间。

[0046] 为保持速度向量 26 的值在探针尖端 25 水平上恒定,两个成分速度向量,即一方面为支架的速度向量  $V$  以及另一方面为探针尖端 25 相对于支架相对运动的相对速度向量  $V_r$ , 必须通过向量组成而提供恒定的值,或者至少提供在一定近似范围内恒定的值,从而加速度较小并且摩擦力不会过快磨损探针 25 尖端,而惯性力仍然可忽略。探针相对运动的坐标参照系中心被选为图 2 的点 20,其也示出在图 4 的顶视图上。但是,坐标的其它选择也是可能的。

[0047] 对图 4 示出的平坦表面而言,由向量  $V_r$  表示测量点相对于支架 3 中心 20 的相对速度。假定在该实例中角度  $\alpha$  根据预定的运动法则  $\alpha = \alpha(t)$  而变,而角度  $\theta$  是固定的。由恒定量  $R = L \cdot \sin(\theta)$  给出中心 20 和接触点 90 之间的水平距离。因此,接触点 90 相对于中心 20 的坐标  $x_r, y_r$  由下式给出:

$$[0048] \quad 1) x_r = -R \cdot \cos(\alpha(t))$$

$$[0049] \quad y_r = R \cdot \sin(\alpha(t))$$

[0050] 而相对速度向量  $V_r$  相应的水平分量  $V_{rx}$  和  $V_{ry}$  由下式给出：

$$[0051] \quad 2) \quad V_{rx} = R \cdot \sin(\alpha(t)) \cdot \dot{\alpha}(t)$$

$$[0052] \quad V_{ry} = R \cdot \cos(\alpha(t)) \cdot \dot{\alpha}(t)$$

[0053] 为简单起见,以平行于 X 轴的头 3 的路径 36 为头 3 的移动速度。这样,直接概括出头 3 的运动完全由其 x 坐标  $x_h(t)$  和相对速度  $V(t) = dx_h/dt$  描述。测量点 90 相对于测量对象的绝对速度  $V_a$  具有如下分量：

$$[0054] \quad 3) \quad V_{ax} = V(t) + R \cdot \sin(\alpha(t)) \cdot \dot{\alpha}(t)$$

$$[0055] \quad V_{ay} = R \cdot \cos(\alpha(t)) \cdot \dot{\alpha}(t)$$

[0056] 要求接触点  $|V_a| = K$  的绝对速度恒定引入了  $x_h(t)$  和  $\alpha(t)$  之间的关系

$$[0057] \quad 4) \quad \dot{x}_h(t) = \sqrt{K^2 - R^2 \cos^2(\alpha)} \dot{\alpha} - R \sin(\alpha) \dot{\alpha}$$

[0058] 在这里,右边的部分是完全已知的。方程 (4) 是容易数值积分的  $x_h(t)$  的单独变量的普通微分方程,对于任何给定组的参数  $R, K, \alpha(t)$ ,假定满足下面的不等式

$$[0059] \quad 5) \quad K \geq |R \cos(\alpha) \dot{\alpha}|$$

[0060] 否则方程 (4) 没有实数解。这一点符合  $K$  值必须足够大以符合探针的角摆动所施加的速度的事实。

[0061] 可观测到,在某些情况下,方程 (4) 可提供其中  $V(t) = dx_h/dt$  改变符号的解决方案,其对应于机器头 3 的前后运动。但是在许多情况下,有利的是相应于  $\alpha$  振荡幅度和速度而选择  $K$  值,以获得相同意义的头部运动来减小振荡和误差。

[0062] 因此,CMM 的控制器可实时或者在扫描前计算探针头 3 的路径,沿着该路径的移动速度并非严格恒定,而是由上述方程 (4) 给出。这样,探针 2 的测量尖端 25 将沿着曲线路径 37 扫描表面上的一系列点,由探针 2 和头 3 的运动组成产生,在接触型探针的情况下相应于接触点,测量点 90 沿着该路径以恒定速度  $|V_a| = K$  移动。

[0063] 当然不可能以无限精度施加严格恒定的速度。由于机器和算法的限制,在真实情况下,点 90 的真实速度将受某些误差影响。这种情况下,可以如此对 CMM 编程,以便在某种定义公差内维持速度  $|V_a|$  恒定。

[0064] 某些情况下,特别是在探针 2 快速摆动时,方程 (4) 将产生超过 CMM 动态极限的  $x_h(t)$  表达式。例如,有可能在探针 2 振荡的翻转点附近不能保证速度的恒定。根据本发明的另一方面,可对 CMM 编程以处理该局限性。例如,在区域 41 或者在扫描路径的选择部分 40 内可保持速度恒定,其中不超过 CMM 的动态极限,并且允许其在该区域或者这些部分之外变化。

[0065] 根据本发明的该优选实施例,有可能很容易沿着扫描路径 40 的部分以恒定的扫描速度  $|V_a|$  对坐标 44 规则地采样。仅仅需要将时间间隔选择为相等,从而所采样的坐标 44 沿着扫描路径 37 相等分布。借助于该扫描方法,从而容易获得在正确的选择边界值和采样时间间隔  $\Delta t$  时待测量点的有效分布。可将所测量的坐标 44 存储在不工作时的控制器的存储器中。

[0066] 在本发明的优选实施例中,不仅将速度维持恒定,而且将施加于探针 2 尖端的偏转力  $F$  维持恒定,以便使沿着扫描路径 37 测量的坐标尽可能地准确。为此,虽然在扫描路径 37 部分上由第一电动机 14 将角速度  $16\omega_1$  维持恒定,但是将第二电动机 17 设置为恒定

力矩  $T_2$ 。虽然没有描述下面的变形实施例,但是也可能维持第一电动机 14 的力矩  $T_1$  恒定,以及第二电动机 17 的角速度  $\omega_2$  恒定。该可能性适合于相对于探针的旋转轴具有不同方位的表面。

[0067] 虽然任何附图都没有描述该特征,但是可将加速度计放入探针 2 中,从而可测量该速度以及将该速度与本发明尽力保持恒定的值相比较。尽管如此,可提供反馈特征,与在文献中所公开的校正特征无关。

[0068] 上述实例示出了如何对 CMM 编程以便使探针的尖端 25 沿扫描路径 (或者可选择地,以非接触型探针测量点 90),同时保持恒定的绝对扫描速度  $|V_a| = K$ 。很清楚,本发明可延伸至以变化的扫描速度沿着路径扫描,该速度遵循预定的速度剖面  $|V_a| = V_a(t)$ 。

[0069] 尽管前面的实例涉及非常简单的情形,但是本发明的方法可延伸至一般表面上的三维复杂路径。

[0070] 根据本发明的优选三维实施例,利用反向运动学变换预先计算或者实时计算作为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $\alpha$ 、 $\theta$  轴位置的 CMM 轴参数,以便遵循一般的三维对象上的扫描路径 37,其以恒定速度  $|V_a| = K$  进行,或者根据变形例,遵循预定的速度剖面  $|V_a| = V_a(t)$ 。

[0071] 假定由所有自由度位置的值确定 CMM 状态。对于图 1 和 2 表示的机器而言,因此由机器的所有轴位置给出完整的配置,该轴包括线性轴  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  和旋转轴  $\alpha$ 、 $\theta$ 。这些参数的每个组合都对应探针 2 的一个预定位置以及一个测量点 90。另外,参数  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $\alpha$ 、 $\theta$  还决定了探针 2 的方位。机器参数和测量点坐标之间的对应通常被表示为向前的运动学变换。

[0072] 一般地,特别是当所考虑的机器包括旋转自由度时,向前的运动学不是内射对应,即可通过机器参数的几种组合而获得测量点的一个相同位置。这样,在数学意义上该 FK 变换并非严格可逆。但是对于测量点 90 的给定位置,可在几种可能中计算提供该测量点的参数  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $\alpha$ 、 $\theta$  的组合。其表示为反向运动运算,或者简单地表示为 IK。

[0073] 根据机器特性,已知几种进行反向运动学变换的方法。虽然已知直接的倒置方法,但是反向运动学常常被看作和用作最小化问题,意味着 IK 变换等价于找到最小化探针尖端和期望靶位置之间距离的机器参数的组合。当位移较小以及封闭的解决方案可作为起始点时,以及当运动可以分解为一系列小的连续位移时,这一点常常是有利的,对后面的情形也是如此。

[0074] 因为可允许对方案施加额外的限制,所以反向运动学变换的内在不清楚是有利的。例如,对本发明的 CMM 而言,将可采用一种反向运动学计算,其不仅使测量探针处于选择的测量点,而且维持探针 2 相对于工件表面的倾斜恒定。在最小化应用中,可通过向最小化函数中添加损失因子以考虑探针方位而实现这一点。

[0075] 因为对接触型探针和非接触型探针而言,测量误差都取决于探针的角度,所以对探针方位的控制是有利的。如果采用了例如光学探针,则有利的是使光束与测量表面垂直。

[0076] 根据本发明的变形例,CMM 控制器表示探针 2 将沿扫描路径 37。其可以为外部输入,例如由操作员或者更高级的控制器所提供的路径,或者可根据环境由控制器在内部产生。对应于待测量的工件剖面,扫描路径 37 为完全的三维曲线。

[0077] 如图 5 所示,将扫描路径 37 细分为部分 61。在该实例中,所有的部分 61 具有相同的长度  $\Delta l$ ,因为这可简化本发明算法的应用;但是该特征并非必要。优选地,该细分 61 足够小,以便将路径 37 近似为连续的直线段。



[0078] 每个部分 61 对应一个起始点和一个待到达的终点。CMM 使得探针 2 处于第一部分的起始点  $P_0$ ，其对应轴参数  $(X_0, Y_0, Z_0, \alpha_0, \theta_0)$  的某起始设定。控制器通过 IK 运算获得一组对应相同部分端点  $P_1$  的参数  $(X_1, Y_1, Z_1, \alpha_1, \theta_1)$ 。控制器然后产生指令，使 CMM 的致动器在确定的时间间隔  $\Delta t$  内将轴参数从  $(X_0, Y_0, Z_0, \alpha_0, \theta_0)$  改为  $(X_1, Y_1, Z_1, \alpha_1, \theta_1)$ 。因此，探针 2 在时间  $\Delta t$  内从  $P_0$  移到  $P_1$ 。该方法然后对点  $P_2, P_3$  等等重复。

[0079] 由于上面所示出的本发明的方法，探针 2 以恒定速度  $|V_a| = \Delta l / \Delta t$  扫描路径 37。该方法允许探针以恒定速度沿循复杂的与测量对象形状有关的三维路径。本领域技术人员还可通过相应地改变时间间隔或者获得一般的速度剖面  $|V_a| = V_a(t)$  而将该方法延伸至非均匀部分的情形。

[0080] 优选地，IK 变换施加一些附加的期望限制，例如探针相对于工件表面的倾角可沿路径 37 保持恒定。而且，最小化算法还可适用于优选旋转轴在那些线性轴上的运动，以尽量减小振动和误差。

[0081] 当探针 2 扫描路径 37 时，CMM 控制器还对测量点 60 的坐标进行采样。例如可相应于点  $P_0, P_1, \dots$  或者在沿着路径 37 上的其它位置实现这一点。如果以恒定速率及时地进行采样，则还可沿着路径 37 而均匀分配所产生的测量点。

[0082] 根据本发明的优选变形例，可在扫描时实时进行该方法。CMM 控制器计算 IK 变化并且在实际运动时对致动器产生指令。这一点允许改变路径 37 以沿循从标称剖面的偏离，该标称剖面可从采样点 60 的坐标获得。但是根据其它的变形例，可全部或者部分预先计算该运动。

[0083] 当在扫描路径 37 上测量的坐标 44 与理论坐标 60 不匹配时，用于调整速度的反向运动学方法还适合于即时校正速度。实际上，因为从坐标差——原始和目标坐标——获得速度，并且因为在扫描时总是已知瞬时坐标，所以只要测量坐标本身是准确的，在不工作时就容易并且能精确地进行调整至任何期望的速度值的计算。

[0084] 如果 CMM 具有接触型扫描探针 2，则必须将探针的倾角保持在非常窄的限度内以保证可靠的测量。通常情况下，探针 2 的有用偏斜范围为大约 1mm 或更低。这样的精确知识并非总是可能。在许多情况下（例如在生产线的质量控制步骤中），CMM 的任务在于精确扫描可受大量误差影响的对象。

[0085] 为保证总是以足够的精度提供该坐标，可根据从已经测量的点 60 的坐标以及从探针中的倾斜传感器的输出产生的补偿向量实时改变扫描路径 37。这样，对于任何单独工件以及动态扫描，扫描路径 37 始终在改变，以便尽可能维持倾角恒定。如果实时计算单独步骤  $P_0, P_1, \dots$  之间的过渡，则系统将仍然能够以恒定速度  $|V_a|$  沿着该路径运动。因为倾角的恒定还意味着接触力的恒定，所以当用于接触型扫描探针时，本发明的方法还提供沿着三维扫描路径 37 的恒定接触力，以恒定速度沿着该路径运动或者根据选择的速度剖面运动。

[0086] 如前所述，在一些情况下，IK 变换可产生不可能的指令，例如超出 CMM 的自然速度或者加速度极限的运动。这种情况下，不能完全以恒定速度沿着该选择路径 37 运动。可对 CMM 编程以处理该情形，例如，可通过产生错误以引起操作员的注意、调用条件处理程序，或者解除速度恒定的限制直到该算法可再次收敛为止。

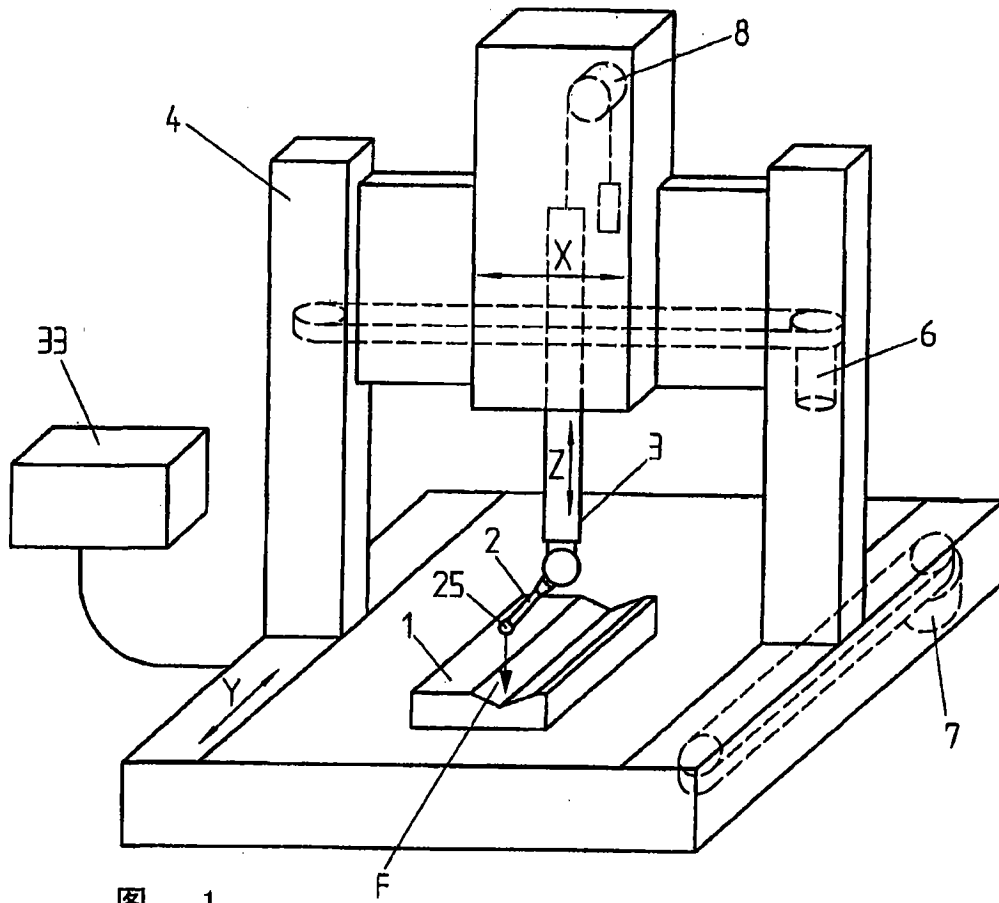


图 1

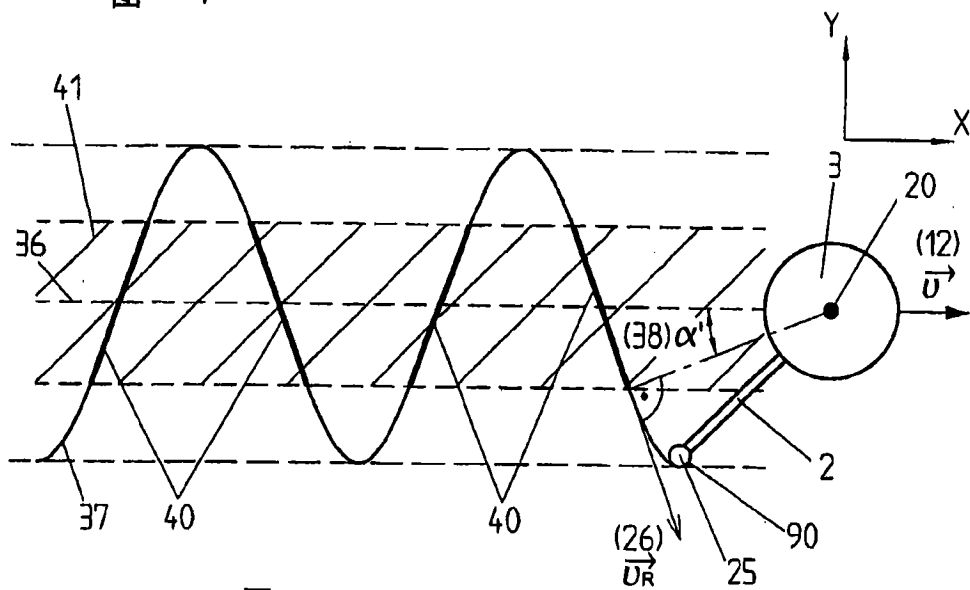


图 4

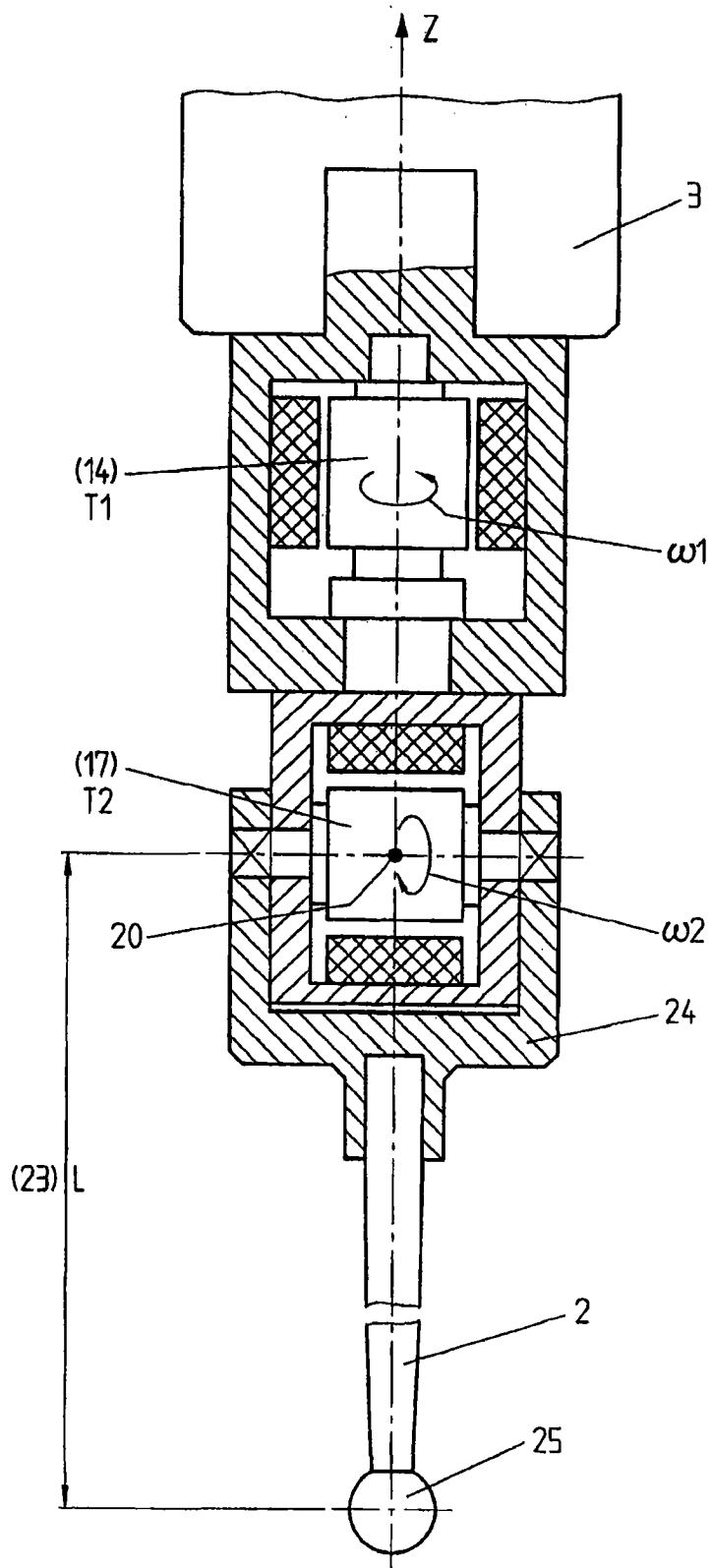


图 2

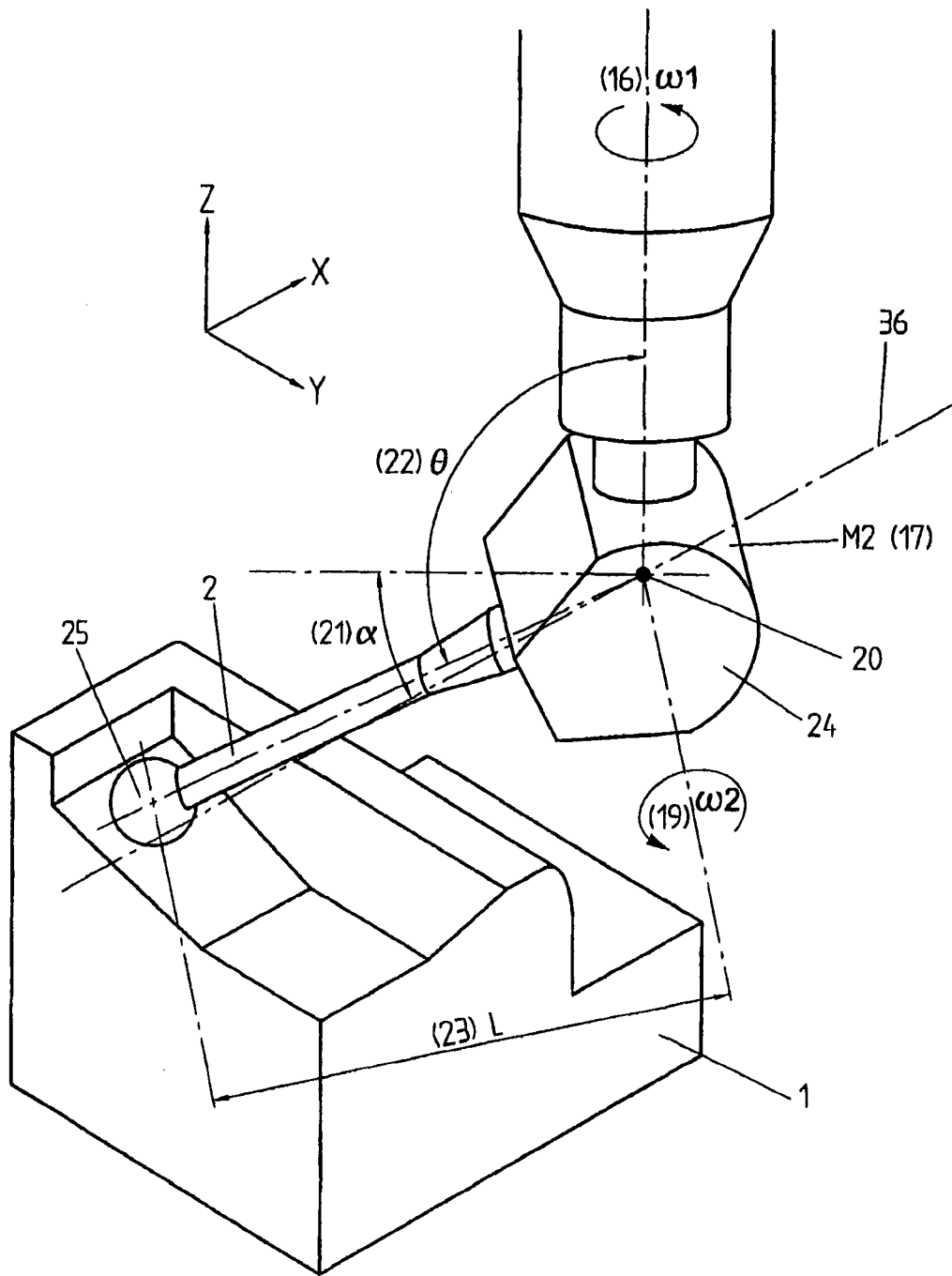


图 3

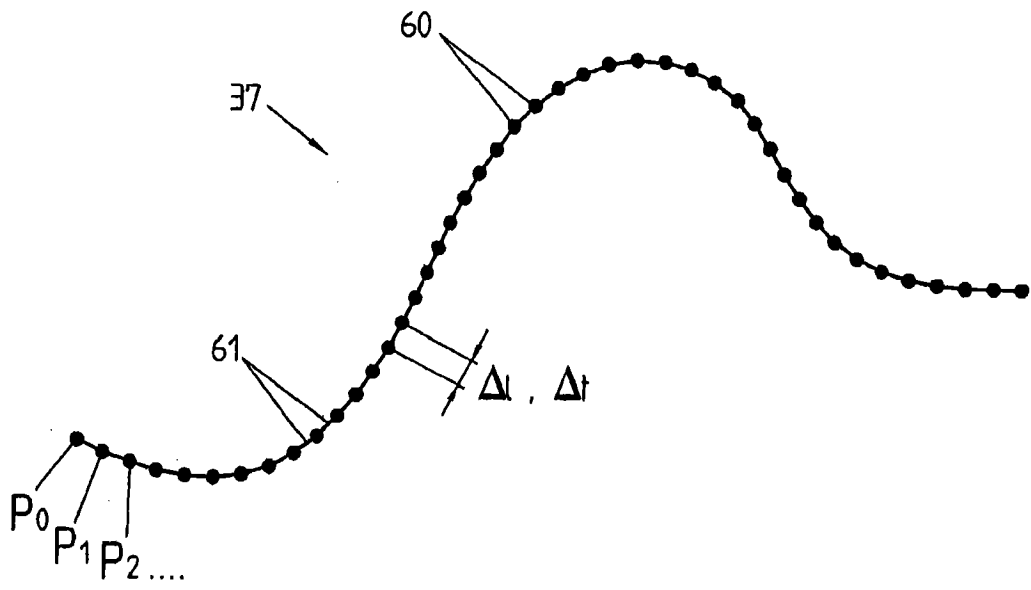


图 5