



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103906606 A

(43) 申请公布日 2014.07.02

(21) 申请号 201280040937.0

代理人 刘延喜 乔建聪

(22) 申请日 2012.07.19

(51) Int. Cl.

(30) 优先权数据

B25J 9/16 (2006.01)

102011079764.5 2011.07.25 DE

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2014.02.27

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2012/064162 2012.07.19

(87) PCT国际申请的公布数据

W02013/014056 DE 2013.01.31

(71) 申请人 约翰尼斯·高特立博

地址 德国贝尔海姆市

(72) 发明人 约翰尼斯·高特立博

(74) 专利代理机构 北京市立方律师事务所

11330

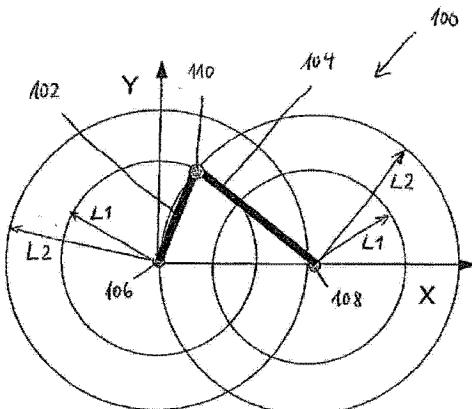
权利要求书1页 说明书9页 附图4页

(54) 发明名称

运动学校准方法

(57) 摘要

本发明涉及一种对并联和串联机器人运动学校准的方法，运动学未构造成专门用于实现可能的最大精度。为此，提出一种方法，其包括如下步骤：沿着预定数量的第一配置向量移动运动学，其中，将控制函数应用于所述配置向量；测量作为移动结果的运动学姿势；识别第二配置向量，所述第二配置向量通过应用所述控制函数而产生了所测量的姿势；通过对第一配置向量及相关的第二配置向量的一部分进行评估而确定第一配置向量至少一部分的校正值；通过评估校正值而确定用于转换配置空间的函数；及通过持续首先执行用于转换配置空间的函数及此后执行控制函数而确定校准后的控制函数。



1. 一种校准运动学的方法,该方法包括以下步骤:

根据预定数量的第一配置向量移动运动学,其中,将控制函数应用于所述配置向量;

测量作为移动结果的运动学姿势;

识别第二配置向量,所述第二配置向量通过应用所述控制函数而产生了所测量的姿势;

通过对第一配置向量及相关的第二配置向量的一部分进行评估而确定第一配置向量至少一部分的校正值;

通过评估校正值而确定用于转换配置空间的函数;及

通过持续首先执行用于转换配置空间的函数及此后执行控制函数而确定校准后的控制函数。

2. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于:为不同于所述第一配置向量的另外配置向量确定校正值。

3. 根据权利要求 2 所述的方法,其特征在于:通过插值或外推或拟合为所述另外的配置向量确定校正值。

4. 根据前述任何一项权利要求所述的方法,其特征在于:所述用于转换所述配置空间的函数延续到所述运动学的所述致动器可以占据的所述配置空间的部分之外。

5. 根据前述任何一项权利要求所述的方法,其特征在于:在定义所述校准后的控制函数时确定并且考虑差异,所述差异为:工作空间即当评估所述控制函数时所述运动学可以实现的姿势集合与所述运动学实际采取的姿势之间的差异。

6. 根据前述任何一项权利要求所述的方法,其特征在于:所述转换包括将所述校正后的向量加到所述相关的第一配置向量。

7. 一种结构,其具有至少一个芯片和 / 处理器,所述结构配置为执行根据权利要求 1-6 中任何一项所述的校准运动学的方法。

8. 一种计算机程序,其能够在将该计算机程序加载到数据处理装置的存储装置之后,让所述数据处理装置执行根据权利要求 1-6 中任何一项所述的运动学校准方法。

9. 一种计算机可读数据,其包括根据权利要求 1-6 中任何一项所述的方法确定的校准后的控制函数的至少一部分及 / 或根据权利要求 1-6 中任何一项所述的方法确定的校正值的至少一部分。

10. 一种其上存储程序的计算机可读存储介质,所述程序能够在将该程序加载到数据处理装置的存储装置之后,让所述数据处理装置执行根据权利要求 1-6 中任何一项所述的运动学校准方法及 / 或其上存储根据权利要求 9 所述的计算机可读数据。

## 运动学校准方法

### [0001] 【介绍】

[0002] 本发明涉及一种运动学校准方法和结构，并且涉及一种对应的计算器程序和对应的计算机可读存储介质，其特别可用于将校准扩展到并未特别设计成用于实现最大精度的并联和串联机器人运动学中。关键术语定义如下。

[0003] 与机器人运动学的定位精度相关的制造商信息涉及一般的误差估计及各种姿势中的定位偏差测量值。

[0004] 在许多机器人运动学中，到目前为止，可靠描述误差测量值（比如标准偏差）尚不切实际。这些误差测量值将必须有应用到所有可行的姿势中。这些误差估计可以出现在坐标测量机的特定情况中。然而，设计这些机器时已经考虑了误差估计。

[0005] 因为到目前为止，在许多运动学中确定整个工作空间的定位精度及对数据校验实际上行不通，这些数据没有提到可靠地描述误差测量值的明确误差界限。因此需要坐标测量机的特定情况下普遍存在的精度信息。当然，坐标测量机也设计成能够对误差进行估计。

[0006] 推荐一种新颖的方法来测量基于配置空间的“映射（map）”而生成的点位处的定位误差。由于配置空间具有特别简单的形状，通常为立方体形状，因此容易在该空间内实现测量点位的均匀分布。配置空间内测量点位的均匀分布导致在工作空间内也均匀分布。这是运动学设计的构造及功能要求所产生的结果，在此，假定姿势的微小变化由配置空间内的微小变化引起，并且另一方面，配置空间内的微小变化仅仅导致工作空间内的微小变化。

[0007] 根据本方法进行的补偿，获得了大量姿势，其中，完全消除了姿势中的误差，除了可以忽略的残留误差之外。通过基于几何参数预期偏差的误差估计可以获得工作空间内剩余点位的可靠误差估计。因此，与参数识别比较，本新颖方法适于由公认的政府机构确认姿势误差。

[0008] 运动学系统的使用开创了全新的应用尤其在机器人技术中的应用，比如医学技术及微纳米技术，所述运动学系统具有证明其精度的“检验证书”，并且还由于姿势误差补偿的原因而具有增强精度，且其清晰地限制了姿势误差。

[0009] 变换配置空间的方法不仅可用于活动式运动学（机器人），而且可用于配置成测量姿势的运动学比如坐标测量机。通过用于变换配置空间的方法同时增强了其精度。

### 【背景技术】

[0010] 具有许多校准运动学的方法。许多校准方法及文中提出的方法可用于机器人、机械手及测量装置例如坐标测量机或机床的并联运动学。运动学姿势误差补偿方法首先指的是运动学本身，但也经常包括周边元素比如末端执行器、多种配件及适配器。根据现有技术，校准主要基于通过参数识别获得需要被校准的个体的正确运动学模型而进行，进而对不同的几何参数的效果进行补偿。

[0011] 作为配置空间元素功能的运动学姿势由多个称为运动学的“运动学模型”的几何参数来限定。

[0012] 尤其是，由于技术生产引起的误差差异及生产中尺寸误差有限的原因，相对于由

设计指定的运动学模型的几何参数而言,相同类型的每个个体展示了其几何参数中的差异。

[0013] 因此,仅仅是基于标称运动学模型的运动学控制引起姿势误差。由于在许多应用中这种姿势误差无法忽略,因此需要进行校准测量。

[0014] 由于几何参数偏差是造成大量姿势误差的原因,因此实际上姿势误差补偿测量几乎完全基于对每个个体的几何参数进行最精确的识别(“参数识别”).

[0015] 这种识别过程基于将运动学的多个理论计算出的姿势与通过精确测量确定的那些姿势进行比较,且比较是从配置空间的相同元素开始的。存在大量与该主题相关的文献,其也主要设计机器人技术姿势误差补偿的主题。文中需要提及的例子为:

[0016] 机器 人 校 准 概 览 (IEEE J. Robotics and Automation Vol. RA-5 No. 5, 1987, pages 377 – 385 Roth, Z. S. ; Mooring, B. W. ; Ravani, B) ;

[0017] 机械手基础 (John Wiley&Sons, 1991, Mooring, B. W; Roth, Z. S. ; Driel, M. R.) ;

[0018] 机器人校准 (Chapman&Hall, London, 1993, R. Bernhardt and S. Albright) ; 或

[0019] 工业机器人尤其是并联运动学的精度改善 (Dissertation, Helmut-Schmidt-University Hamburg. Shaker Verlag, Aachen 2005, ISBN3-8322-3681-3, Lukas Beyer)。

[0020] 基于参数识别的姿势误差补偿具有很多缺点。实际上,当前此类问题中的参数识别具有与所确定的参数识别有关的严重问题(误差函数的非凸性,即模糊性、数值不稳定性等)。所确定的参数替换精确构造的运动学模型的构造几何参数,并且进而降低了运动学组件的制造和安装精度。

[0021] 根据测量数据确定几何参数存在额外的明显困难和不确定性。所采用的算法为探索性算法(比如 downhill-simpex 算法),结果的可靠性受到大量不确定性的影响,因此原则上结果的精度必须遭到质疑。故此,测量值很小的差异或导致所确定的参数的较大偏差。例如,单个测量姿势中的姿势确定中存在的随机误差以无法预测的方式影响所确定的参数。因此现有技术不甚满意及在姿势误差补偿领域展开大量研究是不足为奇的。

[0022] 因此,发明目的是提供一种运动学校准方法和结构,及对应的计算器程序和对应的计算机可读存储介质,其消除了上述缺陷并且尤其允许确定各种并联和串联机器人运动学的可靠误差测量。

[0023] 通过权利要求 1、7-10 中引用的发明特征实现该目的。本发明的有益实施例在从属权利要求中被引用。

[0024] 根据发明的独特优点,可以较高的精度校正所有可行姿势的运动学。通过在根据本发明的校准运动学的方法中指定多个定义的致动器位置实现这一点。致动器位置由配置向量定义。配置空间 KR 的第一向量  $x$  对应于致动器位置,其中,第一向量  $x$  通过控制函数(也称为直接运动学 DK)映射到姿势空间 PR 的姿势  $p(x)$  上,或更精确地为映射到工作空间 AR 内的姿势  $p(x)$  上。通过应用控制函数来移动姿势的运动学。一般而言,当控制函数应用于第一向量  $x$  时运动学所呈现的姿势不同于理论上计算出的姿势  $p(x)$ 。因此,测量了姿势,当将控制函数应用于特定数量的致动器位置时,运动学相对于所述姿势移动。所获得的数值称为给第一向量  $x$  测量的正运动学  $GDK(x)$ 。

[0025] 每个控制函数 DK 与逆映射相关,即所谓的逆运动学 IK。借助逆运动学 IK,确定了每个姿势  $p$  的特定致动器位置  $x$ ,当将控制函数应用于向量  $x$  时,该致动器位置  $x$  引起了姿

势  $p$ 。现在将该逆运动学 IK 应用于测量的姿势  $gDK(x)$ 。因此计算出配置空间 KR 的第二向量  $x' = IK(gDK(x))$ , 其通常不同于预先定义的第一向量  $x$ 。

[0026] 通过分别评估第一及相关联的第二向量, 确定了配置空间 KR 的至少一个离散子集(样集)的对应关联值。优选地, 关联值为向量关联值。当第一向量及相关的关联值在配置空间的离散子集上已知时, 优选地通过插值和外推将该关联值集扩展到整个配置空间的额外元素上, 优选地扩展到所有元素上。通过应用相应的关联值, 现在将来自配置空间的第三向量与来自配置空间的这些向量关联起来。可以将第一向量到第三向量的映射视为配置空间的变换。

[0027] 借助用于变换配置空间的函数定义校准后的控制函数, 从而应用于将变换配置空间变换为来自配置空间的向量  $x$  的函数, 此后, 将控制函数应用于因而获得的来自配置空间的变换后的向量。更精确地说: 当准备采用姿势  $p$  时, 通过逆运动学 IK 确定来自配置空间的向量  $x=IK(p)$ , 该向量将理论上产生姿势  $p$ 。将变换应用于该向量  $x$  以便获得校正后的向量。该变换的映射值, 即, 通过执行变换获得的数值也是向量, 该向量通常为配置空间的元素。当该数值为配置空间的元素时, 将该数值应用于正运动学 DK。否则, 将会获得无法实现的字数。因此, 校正后的控制函数为用于连续执行对配置空间转换的函数及执行针对向量  $x$  的(原始)控制函数。现在使用校准后的控制函数, 而不是(原始)控制函数来控制、移动或指挥运动学。

[0028] 根据本发明的优选实施例, 由配置空间 KR 的第一向量  $x$  的子集限定的致动器位置很大程度上在配置空间内均匀分布。当致动器在比如一个区间  $[a, b]$  (其可以为比如平动或转动区间)内运行时, 根据优选实施例, 所述区间均匀分割为  $n$  个子区间。然后, 这些子区间的边界作为配置空间 KR 的第一配置向量  $x$  的预定分量使用。从而在配置空间 KR 内产生均匀分布的网格点。根据本发明, 将相应的校正值赋予这些点位中的每一个, 并且借助插值或外推通过配置空间 KR 内离散分布的点位的相关性确定函数, 所述函数将校正值赋予配置空间 KR 的每个点位或向量  $x$ , 且对配置空间进行。在优选实施例中, 通过插值或外推获得的该函数持续到配置空间内超过所述运动学可以实现的区间的数值。

[0029] 由于在测量运动学所采用的姿势甚至是那些可以确定的姿势时, 其理论上无法通过将控制函数应用于来自致动器区间数值范围内的向量而获得, 因此在评估控制函数时, 工作空间, 即运动学可以实现的姿势集合, 与运动学实际采取的姿势之间产生不同。根据优选实施例, 在校准后的控制函数中考虑了不同处。

[0030] 根据本发明的另一个优选实施例, 利用借助校正后的配置空间转换实现的用于运动学姿势误差补偿的方法获得了校正后的姿势。该配置空间的校正转换的特点在于: 从配置空间的有限子集开始, 确定该集合的每个元素  $x$  的向量校正被加数, 并且通过限定范围的适当扩展而将限定的函数扩展到整个配置空间内, 并且通过借助扩展函数获得的校正被加数加到配置空间自身的相同自映射上而产生了整个配置空间的校正转换。通过首先应用逆运动学 IK 从所需要的姿势  $p$  中获得配置空间的元素, 然后通过将与该元素相关的校正值加到该元素, 并且此后指挥该姿势, 而实现了运动学个体的校正姿势  $P$ 。因此, 姿势校正的特点在于: 为了实现姿势, 执行校正后的逆运动学。

[0031] 根据优选实施例, 立方体配置空间的样集作为配置空间预定的第一配置向量(样集)使用, 并且立方体配置空间的校正逆运动学作为校正后的逆运动学使用。立方体配置空

间指的是所有工作空间或致动器区间  $[a(i), b(i)]$  ( $i=1, \dots, \text{DOF}$ ) 的笛卡尔乘积。应当将立方体元素理解为多维矩形实体。

[0032] 有利地,可以将致动器区间  $[a(i), b(i)]$  ( $i=1, \dots, \text{DOF}$ ) 细分为进一步的子区间。有利地,可以将致动器区间细分为均等长度的子区间。区间边界  $W(j, i)$  with  $a(i)=W(0, i) < W(1, i) < W(2, i) \dots < W(Q(i), i) = b(i)$  也称为区间分段标量。根据优选实施例,致动器区间的区间分段标量不含致动器偏移的至少一些端点,从而使得包含在配置空间内的立方体为正确的配置空间子集。假定校正后的立方体配置空间的逆运动学应用于校正后的逆运动学。通过在不同集合“配置空间 / 立方体”中外推来获得校正后的函数。

[0033] 根据另一个优选实施例,配置空间可以整体或局部由有限元素覆盖。因此,有限元素的边角作为样集而被测量。

[0034] 根据另一个优选实施例,  $n$  维单形作为有限元素使用。维数  $n$  在此对应于运动学的自由度 DOF。如上所述,基于单形的边缘限定的样集而确定了该样集的校正值。然后将这些校正值以重心方式插入个体单形内部或外推。如上所述,基于这些校正值限定了配置空间的转换,如上所述,校正后的逆运动学基于这些校正值。

[0035] 前述方法可以依序执行多次及 / 或相互结合。可以在配置空间、工作空间或同时在这两个空间的一些区域内或点位处执行额外的基于误差映射和补偿计算的校正。

[0036] 根据本发明的结构具有至少一个芯片和 / 处理器,并且其配置成执行校准运动学的方法,其中,该方法包括以下步骤:

[0037] 根据预定数量的第一配置向量移动运动学,其中,将控制函数应用于所述配置向量;

[0038] 测量作为移动结果的运动学姿势;

[0039] 识别第二配置向量,所述第二配置向量通过应用所述控制函数而产生了所测量的姿势;

[0040] 通过对第一配置向量及相关的第二配置向量的一部分进行评估而确定第一配置向量至少一部分的校正值;

[0041] 通过评估校正值而确定用于转换配置空间的函数;及

[0042] 通过持续首先执行用于转换配置空间的函数及此后执行控制函数而确定校准后的控制函数。

[0043] 根据本发明的计算机程序能够在将该计算机程序加载到数据处理装置的存储装置之后,让数据处理装置执行运动学校准方法,其中,该方法包括如下步骤:

[0044] 根据预定数量的第一配置向量移动运动学,其中,将控制函数应用于所述配置向量;

[0045] 测量作为移动结果的运动学姿势;

[0046] 识别第二配置向量,所述第二配置向量通过应用所述控制函数而产生了所测量的姿势;

[0047] 通过对第一配置向量及相关的第二配置向量的一部分进行评估而确定第一配置向量至少一部分的校正值;

[0048] 通过评估校正值而确定用于转换配置空间的函数;及

[0049] 通过持续首先执行用于转换配置空间的函数及此后执行控制函数而确定校准后

的控制函数。

[0050] 根据本发明的又一个优选实施例，根据本发明的计算机程序可具有模块化结构，其中，可以将单个模块安装在数据处理装置的各种部件上。

[0051] 有利的实施例进一步提供了计算机程序，其配置成执行在说明书中描述的另外处理步骤或流程。

[0052] 本发明的另一方面涉及一种计算机可读数据，其包括本发明方法确定的校准后的控制函数的至少一部分及 / 或根据本发明方法确定的校正值的至少一部分。

[0053] 可以将这种计算机程序和 / 或计算机可读数据可设置成比如(收费或免费、自由访问或密码保护的)用于通过数据或通信网络下载。然后，所提供的计算机程序可被本方法使用，其中，根据权利要求 8 的计算机程序和 / 或根据权利要求 9 的计算机可读数据从电子数据网络比如从互联网下载到与所述数据网络连接的数据处理装置中。

[0054] 根据本发明的方法可以借助其上存储有程序的计算机可读存储介质在将程序加载到数据处理装置的存储装置后实施，所述程序能够执行运动校准方法，其中，所述方法包括如下步骤：

[0055] 根据预定数量的第一配置向量移动运动学，其中，将控制函数应用于所述配置向量；

[0056] 测量作为移动结果的运动学姿势；

[0057] 识别第二配置向量，所述第二配置向量通过应用所述控制函数而产生了所测量的姿势；

[0058] 通过对第一配置向量及相关的第二配置向量的一部分进行评估而确定第一配置向量至少一部分的校正值；

[0059] 通过评估校正值而确定用于转换配置空间的函数；及

[0060] 通过持续首先执行用于转换配置空间的函数及此后执行控制函数而确定校准后的控制函数。

[0061] 本发明的另一方面涉及一种其上存储数据的计算机可读存储介质，所述数据包括本发明方法确定的校准后的控制函数的至少一部分及 / 或根据本发明方法确定的校正值的至少一部分。

[0062] 根据本发明，文中提供的校准可以扩展到坐标测量机的运动学，并且扩展到所有其他自身用于姿势测量的运动学。这种运动学可完全或局部具有非驱动的致动器，然而，其运行确定偏离。通过确定致动器的偏离而计算出该运动学实现的姿势测量结果。所述校准包括如下步骤：

[0063] 根据预定数量的第一配置向量移动运动学，其中，将控制函数应用于所述配置向量；

[0064] 测量作为移动结果的运动学姿势；

[0065] 识别第二配置向量，所述第二配置向量通过应用所述控制函数而产生了所测量的姿势；

[0066] 通过对第一配置向量及相关的第二配置向量的一部分进行评估而确定第一配置向量至少一部分的校正值；

[0067] 通过评估校正值而确定用于转换配置空间的函数。

- [0068] 现在借助这些校准后的校准机器执行姿势测量中的以下步骤：
- [0069] 将运动学移动到需要确定的姿势；
- [0070] 读取所有致动器的偏离传感器，并且进而确定配置空间的元素；
- [0071] 如上所述，将配置空间的转换应用于配置空间已测量的向量中，以便获得校正后的配置向量；
- [0072] 将正运动学应用于通过转换校正的配置向量，并且进而利用校正优势确定姿势。
- [0073] 现在将参考运动学校准的例子详细解释本发明。应当注意：本发明未限制于以下公开的实施例，而是本发明也可以包括其他方法、装置、计算机程序或存储介质，只要其仅仅实施了独立权利要求中的所有特征即可。
- [0074] 将参考附图详细描述示例性实施例，在图中：
- [0075] 图 1-5 展示了 DOF=2 的示例性运动学的工作空间；
- [0076] 图 6 展示了示例性运动学的第一致动器的示例性校正函数；
- [0077] 图 7 展示了示例性运动学的第二致动器的示例性校正函数；及
- [0078] 图 8 展示了构造为 Stewart Gough 平台的运动学视图。
- [0079] 现在将参考图 1-7 结合 DOF=2 的示例性简单运动学 100 详细解释校准过程。
- [0080] 图 1 展示的优运动学 100 由两个长度可变的支柱 102、104（线性致动器）组成，支柱 102、104 也称为支柱。支柱 102、104 的每一个的一端在转动关节 106、108 处固定，而支柱 102、104 的另一端则在公共铰链关节 110 处连接在一起。
- [0081] 运动学 100 所具有的二维姿势为由笛卡尔坐标 x、y 所限定的位置。众所周知，该点位也由两个支柱的长度限定。
- [0082] 图 1 中圆圈的半径表示在特定实施例中使用的支柱长度 L1 和 L2。数值 L1 和 L2 总共可以为 4- 元样 (L1, L1), (L1, L2) (L2, L1) 及 (L2, L2) 集产生 4 种配置。该样集与上述第一配置向量对应。
- [0083] 样集的 4 个姿势展示于图 2-5 中，当两个支柱 102、104 均具有相应的支柱长度 L1 和 / 或 L2 时，4 个姿势由支柱长度 L1 和 L2 的组合产生。
- [0084] 在这 4 个姿势中，运动学实际呈现的姿势（在笛卡尔坐标中）可以借助外部测量设备（例如坐标测量机）测量和计算得出。
- [0085] 在图 2 中，比如，假定对数值为  $(x', y')$  而不是数值  $(x, y)$  的姿势进行测量。借助逆运动学  $IK(x', y')$  从这些数据  $(x', y')$  中计算出第二配置向量  $(L1', L2')$ 。类似过程出现在图 3-5 中。
- [0086] 所形成的两个校正被加数函数可以从图 6（针对支柱 102）和图 7（针对支柱 104）看出。
- [0087] 该校正被加数函数对应于配置空间中相同集合的校正被加数函数 KSF\_PM。
- [0088] 图 6、7 中的位置  $(L1, L2)$ ,  $(L2, L2)$ ,  $(L1, L1)$  及  $(L2, L1)$  处的校正被加数中的每一个与图 2-5 中的姿势相关联。因此，图 6、7 中的图形中的 4 个函数值基于所测量的姿势偏差。所有其他点位通过插值获得。
- [0089] 因此，校正基于图 6、7 展示的第一支柱 102 和第二支柱 104 的校正函数 600、700。
- [0090] 当将通过误差补偿实现姿势  $(x, y)$  时，首先计算出理论上与姿势相关联的第一支柱 102 的支柱长度 S1 及第二支柱 104 的支柱长度 S2。利用来自图 6、7 的图形中的支柱长

度可以读取第一支柱 102 的校正被加数 ds1 及第二支柱 104 的校正被加数 ds2。图 6、7 展示的函数对应于配置空间内的校正被加数函数 KSF\_KR。

[0091] 现在,在调整支柱长度 S1+ds1 以及 S2+ds2 时,该点位处的姿势得以被正确地误差补偿。

[0092] 图 8 展示了称为 Gough Stewart 平台的运动学 800。该运动学具有 6 个支柱 802、804、806、808、810 及 812。虽然运动学 800 更加难以描述并且因而情形错乱,上述简单例子中的方法可类似且有利地用于该运动学,正如情形已经明显表明。

[0093] 本发明的实施例未限制于上述优选的示例性实施例。而是很多变异是可行的,这些变异甚至在本质上不同的实施例中利用了根据本发明的方法、根据本发明的设备、根据本发明的计算机程序及根据本发明的计算机可读介质。

[0094] 定义和解释

[0095] 现在将通过一些与校准基本概念有关的注解对示例性实施例进行补充。

[0096] 运动学

[0097] 术语运动学指的是串联和并联运动学类别,及这两类的组合。这些类别包括比如机器人、机床、加工机器、坐标测量机、实体机器人。另外,类别还包括具有冗余传感器的运动学。

[0098] 致动器

[0099] 在本说明书中,致动器定义如下:致动器为技术装置,其将输入值(电压、数值等)转变为物理上实现的参数,或转变为物理参数的变化,所述变化代表运动学的自由度。可以借助比如特殊的测量装置,根据偏离与输入值之间的已知关系确定致动器的偏离。

[0100] 致动器为技术组件,其偏离代表配置空间的元素。除了以机械方式运行的致动器外,致动器还包括运动学中仅仅执行测量的元素。

[0101] 特别地,致动器包括线性致动器、旋转台和线性测量装置和旋转测量装置、由记忆合金、压电陶瓷制成的致动器、以气动或液压运行的致动器等。

[0102] 运动学的自由度(DOF)

[0103] DOF 定义为运动学自由程度的数量。

[0104] 在本方法中,适于方法的运动学中的致动器数量为 DOF。如果存在冗余,即,如果致动器的数量超过了 DOF,则在根据本发明的校准中,选择并且考虑 DOF 个致动器。

[0105] 姿势(P)

[0106] 运动学的姿势是指与运动学有关的所有移动刚性体的位置和方位或组件或子集的组合。

[0107] 通常,姿势与单个刚性体关联。然而,根据本发明,可以借助对应的关联刚性体对由多个子运动学组成的运动学进行校准。

[0108] 姿势空间(PR)

[0109] 应当将姿势空间理解为运动学理论上可以获得的所有姿势,或这些姿势的适当扩展集,比如 Gough 机械手的特殊欧几里得小组 SE(3)。

[0110] 配置空间(KR)

[0111] 运动学由致动器控制。致动器 1,2,3, … DOF 的相应偏离可以表达为向量 x。在本专利的行文环境中,因此,配置空间为在运动学运行过程中提供的 RDOF 一部分。

[0112] 正运动学(DK)

[0113] 正运动学为函数,该函数将来自姿势空间的对应姿势赋予来自配置空间的元素。

[0114]  $DK: KR \rightarrow PR$

[0115] 该赋值以理论方式进行,并且基于运动学的构造几何参数。实际上,可逆确定性得以保证,并且在没有损失普遍性的情况下在此采用了可逆确定性映射。

[0116] 通常,将正运动学作为函数存储在控制计算机中。

[0117] 工作空间(AR)

[0118] 工作空间为姿势空间中用于让运动学运行的部分。该工作空间为机器人能够采取和在常规运行时应当采取的所有姿势的集合。

[0119] 逆运动学(IK)

[0120] 逆运动学为一种函数,该函数将来自配置空间的对应元素赋给来自姿势空间的每个姿势。IK 为 DK 的逆映射。

[0121]  $IK: PR \rightarrow KR$

[0122] 测量的正运动学(GDK)

[0123] 借助测量可以为来自 KR 的每个元素确定配置中实际采取的姿势,比如借助坐标测量机。将 KR 元素向实际采取的姿势的映射称为测量的正运动学(GDK)。

[0124] GDK 将配置空间映射到工作空间:

[0125]  $GDK: KR \rightarrow AR$

[0126] 配置空间的样集(PM)

[0127] 将来自配置空间中用于校准的一组元素称为 PM。

[0128] PM 的校正被加数函数(KSF\_PM)

[0129] 将来自的校正被加数  $R^{DOF}$  赋给每个元素  $x \in PM$ :

[0130]  $KSF\_PM: R^{DOF} \rightarrow R^{DOF}, x \rightarrow x - IK(GDK(x))$

[0131] 这些被加数子用于测量姿势的运动学中具有相反的数学符号。

[0132] 因此,校正被加数  $x - IK(GDK(x))$  表示致动器的预定偏离  $x$  (其理论上将导致姿势  $DK(x)$ ) 与根据借助逆运动学测量的姿势  $GDK(x)$  的偏离  $IK(GDK(x))$  之间的差值。

[0133] 校正后的正运动学 PM(KDK\_PM)

[0134] 根据以下表达式将  $p \in AR$  赋给每个元素  $x \in PM$ :

[0135]  $KDK\_PM(x) = DK(x + KSF\_PM(x))$ .

[0136] KR 的校正被加数函数(KSF\_KR)

[0137] KSF\_PM 仅仅限定在样集 PM 上。KSF\_KR 指定了具有覆盖整个 KR 的定义范围的函数。优选地,通过对 KSF\_PM 的数值进行差值或外推通过 KSF\_PM 数值的适当拟合将校正被加数函数的数值与 KR 上的每个点位关联起来。

[0138] 术语

[0139] Gough 机械手:

[0140] 指的是 DOF=6 的并联机械手,其中,通过 6 个长度可变的腿部将移动和静止的部件互连起来。Gough 机械手也称为六足虫。

[0141]  $N_k \quad N_k = \{1, 2, 3 \dots k\}, k \in N$

[0142] DOF 自由程度,运动学的自由度

- [0143] I:  $i \in N_{DOF}$ ,  $i$  总是对致动器做标记
- [0144]  $[a(i) b(i)]$  致动器  $i$  允许的偏离区段
- [0145]  $Q(i)$ :  $Q(i)$  为致动器  $i$  的区段分割数量
- [0146] 方位 指示了主体在三维空间中的朝向。将一组三维空间内的朝向称为特殊正交组  $SO(3)$ 。
- [0147] x 配置空间的元素,以致动器的偏离向量表示
- [0148] p 姿势空间的元素,以向量表示

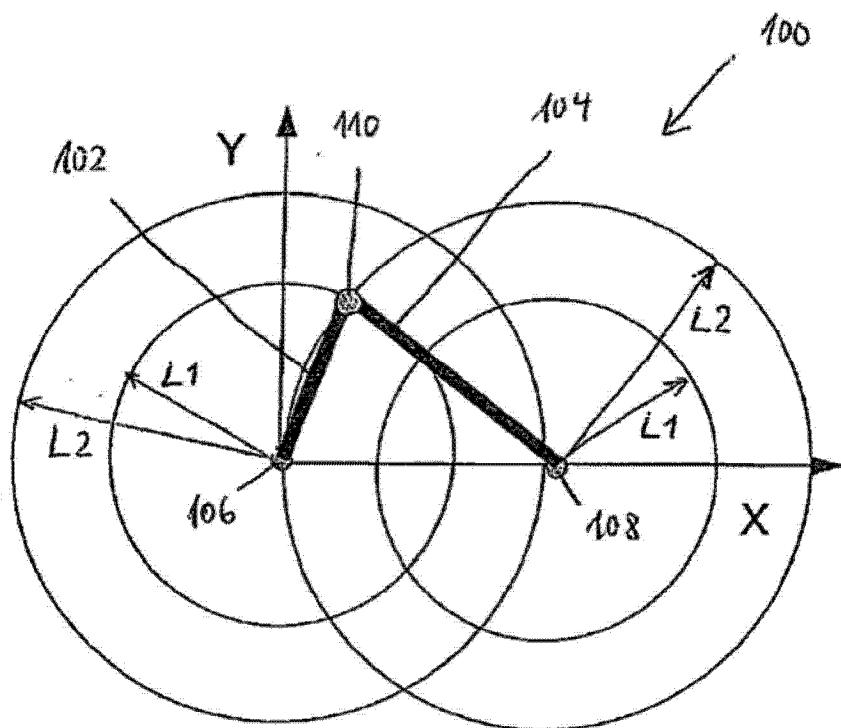


图 1

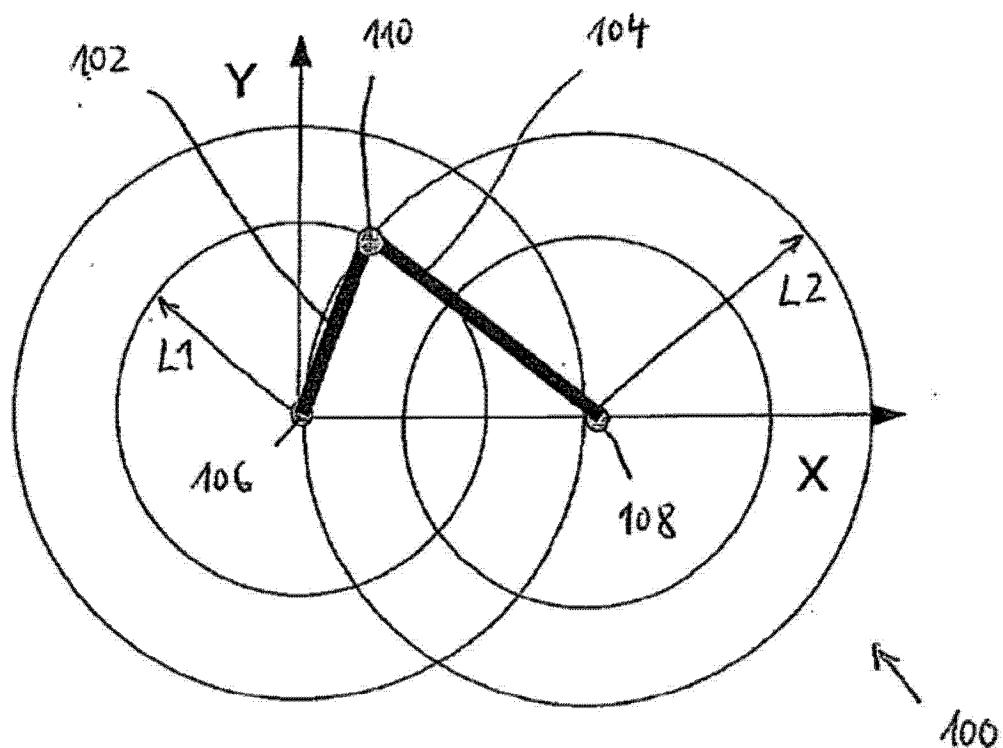


图 2

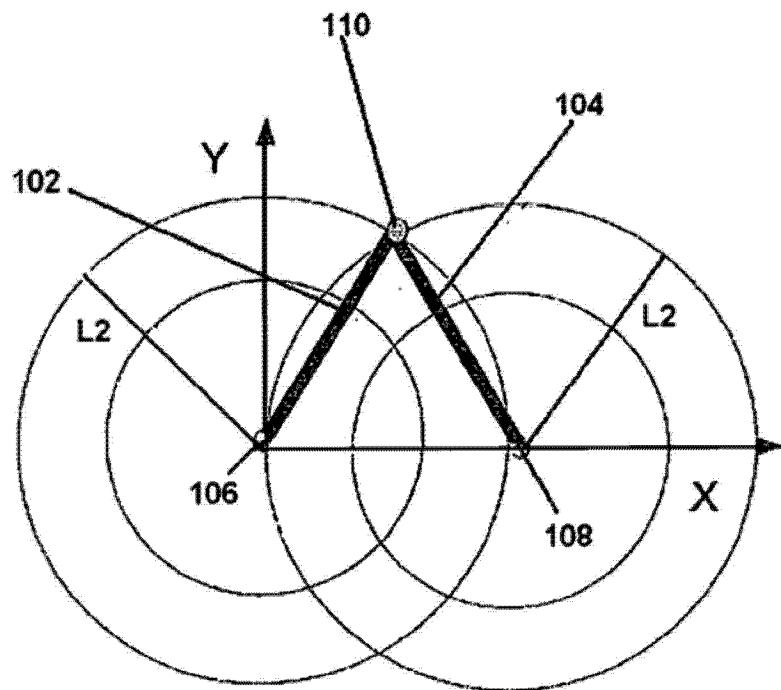


图 3

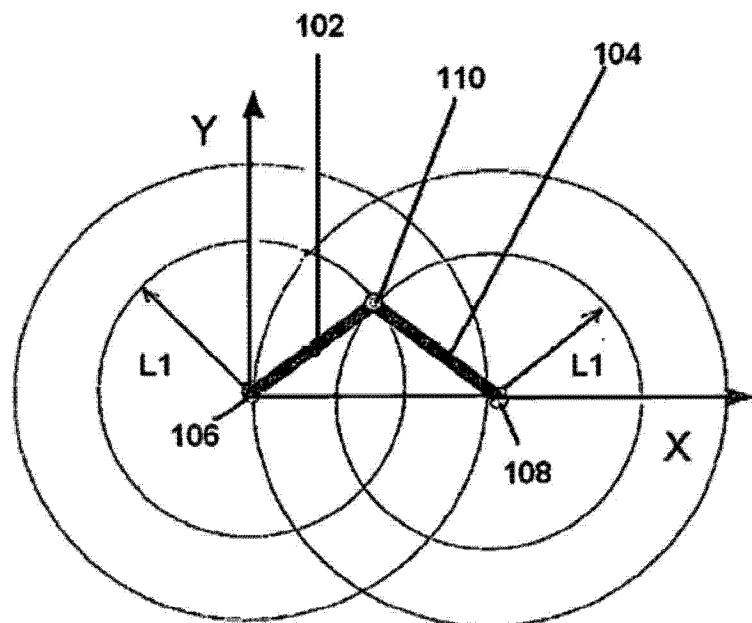


图 4

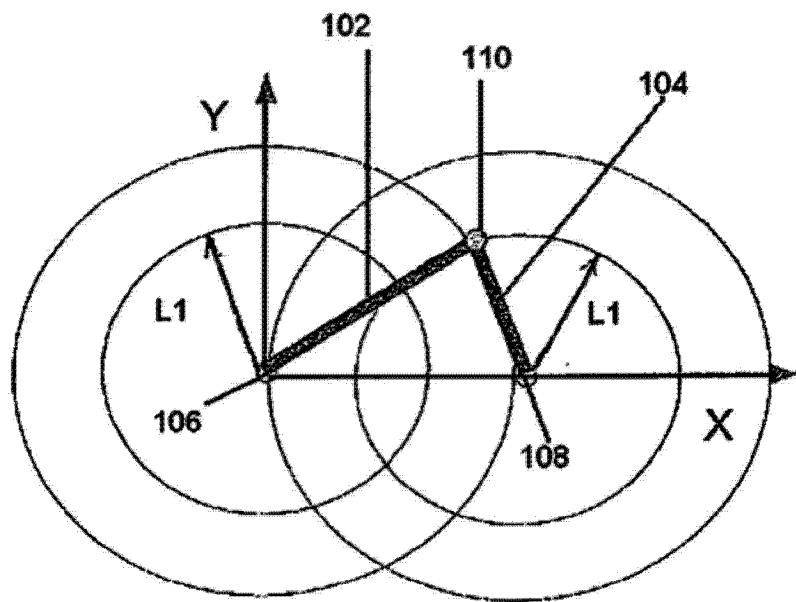


图 5

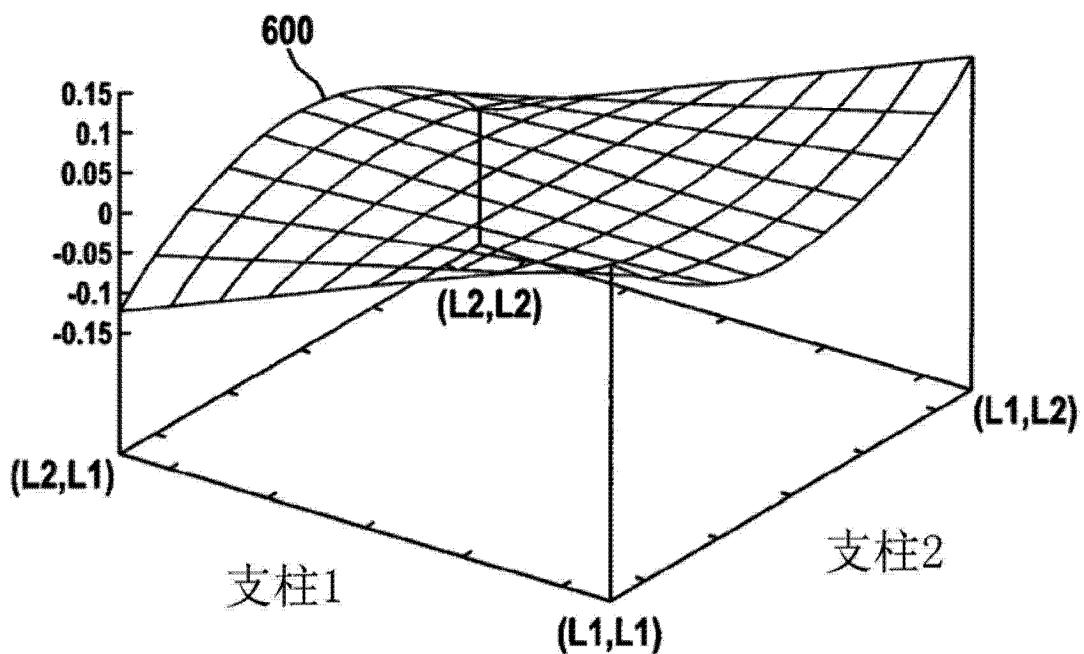


图 6

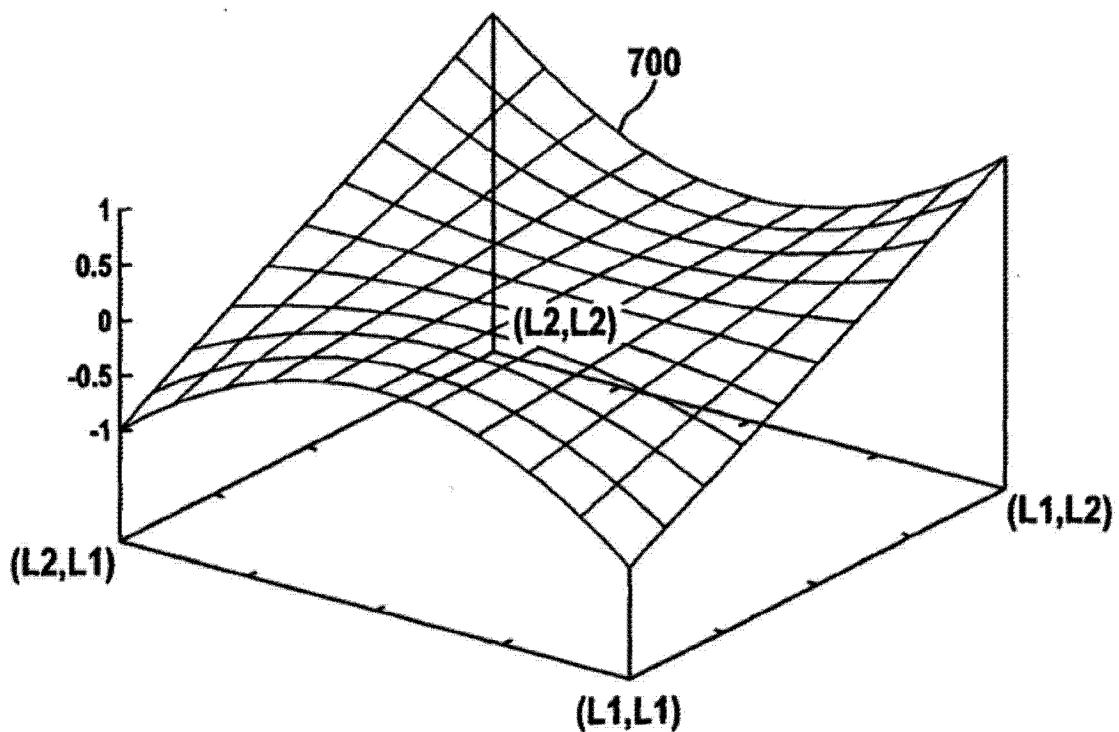


图 7

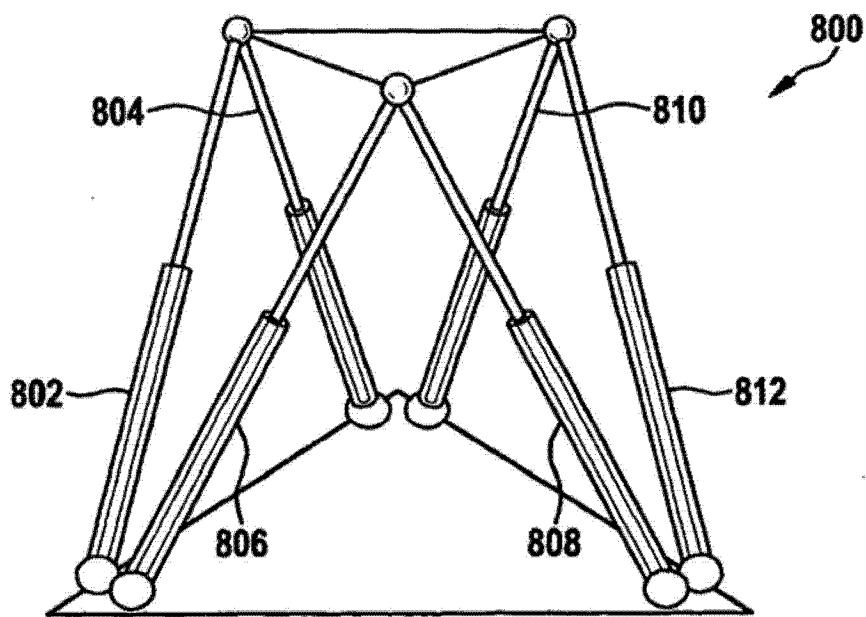


图 8