



(21)申请号 201510390610.1

(22)申请日 2012.09.18

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104991518 A

(43)申请公布日 2015.10.21

(30)优先权数据
61/540,150 2011.09.28 US

(62)分案原申请数据
201280045878.6 2012.09.18

(73)专利权人 UR机器人有限公司
地址 丹麦欧登塞

(72)发明人 鲁内·瑟·克努森
埃斯本·哈伦德拜克·厄斯特高
亨里克·戈登·彼得森

(74)专利代理机构 北京品源专利代理有限公司
11332
代理人 杨生平 钟锦舜

(51)Int.Cl.

G05B 19/408(2006.01)

B25J 9/16(2006.01)

(56)对比文件

EP 1592536 A1,2005.11.09,

CN 1704210 A,2005.12.07,

US 2005/273198 A1,2005.12.08,

US 7756608 B2,2010.07.13,

CN 1747816 A,2006.03.15,

Robert G Bonitz.“Calibrating Multi-manipulator Robotic System”.《IEEE Robotics & Automation Magazine》.1997,第4卷(第1期),19-21.

David J.Bennett.“Autonomous Calibration of Single-Loop Closed Kinematic Chains Formed by Manipulators with Passive Endpoint Constraints”.《IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION》.1991,第7卷(第5期),597-603.

审查员 叶双清

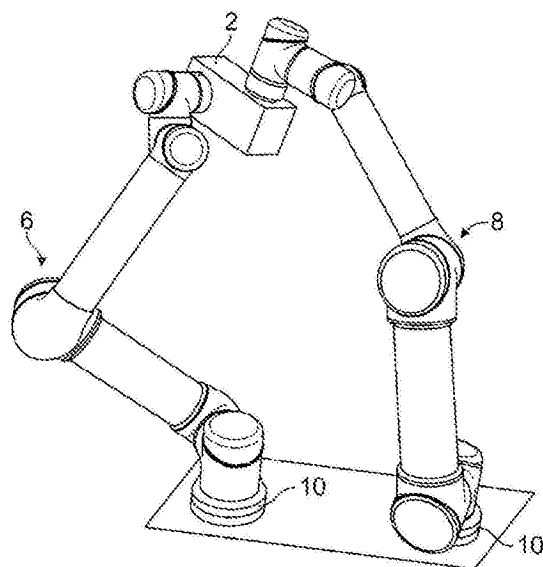
权利要求书1页 说明书16页 附图17页

(54)发明名称

机器人的校准和编程

(57)摘要

本发明涉及一种用于在没有使用外部测量设备的情况下校准机器人的方法。本发明还涉及一种用于在未校准机器人之间复制工作程序的方法。两种方法利用闭链属性和该链中的连杆的相对位置,以更新机器人运动模型。



1. 一种用于将工作程序从第一机器人 (R_1) 转换到第二机器人 (R_2) 的方法, 每个机器人 (R_1, R_2) 具有连接以下两个法兰的关节: 基底法兰和工具法兰, 所述方法包括以下步骤:

- (a) 使用第二机器人 (R_2) 替换第一机器人 (R_1),
- (b) 提供与所述第一机器人 (R_1) 相关联的工作程序 (R_1P),
- (c) 根据工作程序 (R_1P) 选择多个位置或者角度, 并且将所述第二机器人 (R_2) 移动到那些位置, 由此提供位置或角度对数据集合 ($\langle R_1Q, R_2Q \rangle$), 并且随后
- (d) 使用所述位置对的数据集合 ($\langle R_1Q, R_2Q \rangle$) 和由至少所述第一机器人 (R_1) 和所述第二机器人 (R_2) 形成的数学闭链模型来估计所述第一机器人 (R_1) 和所述第二机器人 (R_2) 的运动模型 (M_1, M_2)、基底法兰偏移 (T_{base}) 和工具中心点偏移 (T_{tcp}), 并且随后
- (e) 基于所述所估计的运动模型 (M_1, M_2) 来执行工作程序转换。

2. 根据权利要求1所述的方法, 还包括评估所述工作程序是否能够在适当所选公差内来在所述第二机器人上运行的步骤。

3. 根据权利要求2所述的方法, 还包括以下步骤: 根据所述工作程序 (R_1P) 来选择额外数量的位置, 并且将所述第二机器人 (R_2) 移动到那些额外的位置, 由此提供扩展的位置对的数据集合, 并且随后如果所述工作程序不能在适当所选公差内在第二机器人上运行, 则使用所扩展的位置对的数据集合来执行步骤 (d) 和步骤 (e)。

4. 根据权利要求1、2或者3所述的方法, 还包括: 基于所估计的运动模型 (M_1, M_2) 来转换另一个工作程序的步骤。

5. 根据权利要求1所述的方法, 其中, 基于所述所估计的运动模型来执行所述工作程序转换的步骤 (e) 包括以下子步骤:

- 使用与所述第一机器人 (R_1) 相关联的所估计的运动模型 (M_1) 来在工作程序 (R_1P) 中的所有位置或者角度 (R_iQ) 上施加正向运动, 以导致位置或者角度 (R_iK),
- 使用用于所述第二机器人 (R_2) 的所估计的运动模型 (M_2) 来在所述位置或者角度 (R_iK) 上施加反向运动, 由此给出与所述第二机器人 (R_2) 相关联的位置或者角度 (R_jQ), 并且随后
- 使用对应的位置或者角度 (R_jQ) 来替换所述工作程序 (R_1P) 中的位置或者角度 (R_iQ), 由此给出与所述第二机器人 (R_2) 相关联的工作程序 (R_2P), 借此完成所述工作程序转换。

6. 根据权利要求1所述的方法, 其中, 由限定变换的参数确定所述运动模型 (M_1, M_2)。

7. 根据权利要求6所述的方法, 其中, 由三种类型的Denavit-Hartenberg参数确定所述运动模型 (M_1, M_2)。

8. 根据权利要求7所述的方法, 其中, 所述三种类型的Denavit-Hartenberg参数由Schilling参数、平行变量参数和RPY参数表示。

9. 根据权利要求8所述的方法, 其中, RPY参数用于调制所述机器人的最后关节。

10. 根据权利要求1所述的方法, 其中, 通过将预定模型用作开始点来估计所述运动模型 (M_1, M_2)。

机器人的校准和编程

[0001] 本申请是申请号为201280045878.6、申请日为2014年3月20日、发明名称为“机器人的校准和编程”的申请的分案申请。

技术领域

[0002] 本发明涉及对机器人进行校准的方法和对机器人进行编程的方法。

背景技术

[0003] 在工业机器人领域中,机器人的物理特性知识对计算机器人的精确位置很重要。这些特性可以由机器人设计的图形限定,但是将取决于机器人的装配过程和机器人组件的公差而变化。为了精炼该知识,并且由此增加机器人准确度,必须校准描述该机器人的模型。

[0004] 在专利文献中已经建议了用于编程机器人的几种方法和设备。在US6,535,794中公开了三维坐标测量机,该三维坐标测量机使用具有已知大小的机械测量壁,以创建数据误差图,以用于校准机器人。

[0005] US 2011/0022216公开了一种用于校准工业机器人系统的方法和设备,该工业机器人系统包括具有机器人坐标系的至少一个机器人和具有定位器坐标系的定位器,并且适合于通过将工件关于旋转轴进行旋转来保持并且改变该工件的定向。关于物体坐标系来对用于机器人的目标点进行编程。设备包括:机器人控制器、在定位器上布置的至少三个校准物体和由机器人保持的校准工具。校准物体的位置在物体坐标系中是已知的。机器人控制器被配置为:确定关于机器人坐标系的校准物体的位置,确定用于定位器的旋转轴的至少三个不同角度的所述校准物体中的第一校准物体和第二校准物体的位置,基于所确定的用于旋转轴的三个角度的第一校准物体和第二校准物体的位置来确定机器人坐标系中的定位器的旋转轴的方向,并且通过执行校准物体的已知位置和所确定位置之间的最佳匹配来确定第一物体坐标系和定位器坐标系之间的关系。

[0006] 在US 2008/0188986中公开了一种通过运动学机器人模型参数确定来提供多关节机器人中的改进的准确度的方法和系统。根据机器人模型参数的变化通过针对参考物体的参考点的被计算姿势中的变化使用用于雅克比行列式(Jacobian)推导中的微分链式法则来校准多关节机器人。该方法还使用两个这样的参照物和其间的已知距离来创建长度尺度,由此避免需要知道机器人的一个连杆长度。迭代法用于找到用于合成模型参数的改进准确度的最优解。而且,公开了机器人的端关节参数(包括限定了工具附接机制框架的参数)的确定,这在没有随后校准的情况下允许工具互换。

[0007] 在US 2008/0188983中还公开了一种用于校准多关节工业机器人的装置和方法。

[0008] US 6,070,109涉及一种机器人校准系统,该机器人校准系统包括校准传感器,该校准传感器提供当第一参考点(其相对机器人基底保持固定)离第二参考点(其位于机器人壁上)为固定距离时的指示。机器人臂被移动通过多个定向,并且每次获得两个参考点之间的固定距离,确定机器人关节位置信息。优选校准传感器包括一根绳子(string),该绳子在

两个参考点之间延伸,并且每次由机器人臂的定向所引起绳子拉紧而激活信号发生器。所生成的信号指示两个参考点相隔固定距离。所确定的机器人关节位置随后用于确定校准因数,该校准因数取决于特定情况的需要而变化。示例性校准因数用于校正机器人运动信息中的错误,定位工作单元参考框架并且定位工具中心点参考框架。

[0009] 在US 2009/0157226中公开了一种用于机器人及其外围设备的校准系统,该系统包括附接到机器人及其外围设备的发射器。发射器发射激光束,并且接收器在某点处还被安装到机器人或其外围设备,以允许校准并且用于接收该激光束,并且允许计算以确定发射器和接收器之间的尺寸。

[0010] US 4,753,569涉及一种用于校准计算机导引的机器人设备的方法和设备。安装在机器人臂上或者固定在工作台处的至少一个相机观察目标,该目标包括固定到另一个机器人臂或者工作台的至少三点的模式,这种观察当机器人臂接近工作台以执行预定操作时发生。将相对于预定目标模式的任何偏差的感测发送到计算机,以重置机器人的计算机化的导引系统。

[0011] 因此,虽然存在多种校准机器人的方法,但是所有方法都需要多种额外的主动测量设备(即包括传感器的测量设备)和如何使用所述测量设备的专业知识,而且依赖于通过其知道所述设备的物理特征的准确度。

发明内容

[0012] 因此,本发明的目的在于提供一种校准多关节机器人的方法,该方法容易实现,并且不需要使用外部主动测量设备。

[0013] 此外,本发明的目的还在于提供一种复制未校准机器人之间的工作程序的方法。

[0014] 根据本发明,通过校准机器人的方法实现上述目的和其它目的,该方法包括以下步骤:

[0015] (a) 提供至少两个机器人(R_1 和 R_2),每个机器人(R_1, R_2)具有连接以下两个法兰的关节和/或连杆:基底法兰和工具法兰,

[0016] (b) 由至少两个机器人(R_1, R_2)形成闭链,

[0017] (c) 操控链中的连杆或关节中的至少一个,由此引起链中的一些其它连杆或关节中的操作,并且随后

[0018] (d) 基于与至少两个机器人(R_1, R_2)中的每一个机器人的关节相关联的传感器信息来估计用于每个机器人(R_1, R_2)的运动模型(M_1, M_2)。

[0019] 借此实现校准方法,该校准方法不取决于外部主动测量设备的准确度,而仅使用机器人本身。本发明方法将机器人组合到闭链中,以获得信息,该信息随后用于调整机器人的运动参数,即用于更新机器人的运动模型,由此校准机器人。通过调制在可用工作空间上分布的不同形态中的链(即,通过操控链中的至少两个机器人的至少一个关节)来生成用在校准过程中的必要信息,由此引起链中的其它连杆或关节中的一些的操作。随后通过使用闭链属性和来自各种链形态的连杆和/或关节的知识来完成校准(即,数学运动模型的估计)。为了限定链的比例大小,需要知道至少一个距离或距离变化。在可以求解的方程组中表达了链中所使用的连杆和/或关节,由此校准机器人。因此,通过使用闭链的原理,可以探索机器人的工作空间的大部分区域,并且因此该校准方法的成果高度地表示所述机器人的

整个工作空间。这在除了机器人本身之外而没有任何测量设备的情况下允许几个机器人的同时校准。通过将闭链的模型表示和多个物理观察值进行比较,可以精炼模型的参数并且因此校准模型的参数。

[0020] 这里,该方法用在闭链中,每个连杆通过其自己的约束被引导,以实现整个闭链的约束。这要求链中的位置、速度、加速度和力等。通过利用该属性,可以估计每个连杆的动态属性,并且因此校准机器人的运动。

[0021] 应当理解的是,在本专利说明书的全文中,术语一个或多个关节可以用于表示转动关节、棱柱型关节(prismatic joint)或者球形关节。取决于关节的类型,关节可以控制并且记录旋转和/或位置。在下文中,“位置”用于描述旋转和/或位置。还应当理解的是,链可以包括不是关节的连杆或者是关节的连杆。

[0022] 在根据本发明的方法的实施例中,可以通过提供具有至少两个机器人臂的单个机器人来完成提供至少两个机器人的步骤(a),并且随后将所述每个臂看作一个机器人。该类型的机器人不具有与工具法兰相同数量的基底法兰。

[0023] 根据校准机器人方法的又一个实施例,从用于驱动机器人关节和/或连杆的相同传感器获得传感器信息。

[0024] 根据校准机器人方法的又一个实施例,从用于驱动机器人关节和/或连杆的相同传感器仅获得传感器信息。

[0025] 根据校准机器人方法的又一个实施例,步骤(c)包括以下子步骤:

[0026] -改变关节位置,并且由此改变至少两个机器人(R_1, R_2)中的每一个机器人的关节的位置(Q),并且

[0027] -收集所述对应位置对($\langle R_1Q, R_2Q \rangle_m$)。

[0028] 根据校准机器人方法的又一个实施例,传感器信息是与关节位置(Q)有关的信息,并且其中步骤(d)包括:基于所收集的位置对($\langle R_1Q, R_2Q \rangle_m$)来估计运动模型(M_1, M_2)。

[0029] 根据校准机器人方法的又一个实施例,传感器信息包括下列任何一个、以及/或者下列任何一个的变化:角度、位置坐标或它们的派生物。

[0030] 根据校准机器人方法的又一个实施例,传感器信息包括下列任何一个、以及/或者下列任何一个的变化:力、力矩或它们的派生物。

[0031] 根据校准机器人方法的又一个实施例,通过物理地将所述至少两个机器人(R_1, R_2)连接在至少其基底法兰处和/或其工具法兰处,来执行由至少两个机器人(R_1, R_2)形成闭链的步骤(b)。

[0032] 根据校准机器人方法的又一个实施例,由至少两个机器人(R_1, R_2)形成闭链的步骤(b)还包括在至少两个机器人(R_1, R_2)之间固定至少一段距离的步骤。

[0033] 根据校准机器人方法的又一个实施例,由至少两个机器人(R_1, R_2)形成闭链的步骤(b)还包括在至少两个机器人(R_1, R_2)之间固定至少一个连接方向的步骤。

[0034] 根据校准机器人方法的又一个实施例,由至少两个机器人(R_1, R_2)形成闭链的步骤(b)包括使用测量设备来测量至少两个机器人(R_1, R_2)之间的相对位置的步骤。

[0035] 根据校准机器人方法的又一个实施例,测量设备被配置为用于测量至少两个机器人(R_1, R_2)的部件之间的距离。

[0036] 根据校准机器人方法的又一个实施例,测量设备被配置为用于确定至少两个机器

人 (R_1, R_2) 的部件之间的方向。

[0037] 根据校准机器人方法的又一个实施例,测量设备为连接至少两个机器人 (R_1, R_2) 的至少一个球杆 (ball bar)。

[0038] 根据又一个实施例,传感器信息包括由闭链中的连杆给出的任何信息,以实现与校准的静态部件和动态部件有关的模型。例如但不限于位置信息和力信息及其派生物。

[0039] 虽然应当理解为可以使用其它种类的传感器信息,但是使用角度是用于表示具有转动关节的机器人关节的位置的非常实用的方法。根据本方法不仅可以校准机器人的规模,而且也可以校准力和力矩的读取/估计和/或动量计算。

[0040] 并不局限于机器人需要彼此物理地连接,只要提供将链闭合的信息即可。因此,根据又一个优选实施例,由至少两个机器人形成闭链的步骤 (b) 包括以下步骤:将该至少两个机器人一起固定在其基底法兰处和其工具法兰处。这提供了两个限定明确的距离,可以通过该两个限定明确的距离来依比例决定该模型。另一种可能性是使用机器人的统计知识来依比例决定模型 (例如,通过吉洪诺夫正则化 (Tikhonov regularization))。该统计知识可能基于大量相同种类的机器人,和/或机器人本身的技术制图。

[0041] 根据又一个实施例,由至少两个机器人形成闭链的步骤 (b) 包括以下步骤:在链中使用额外的连杆,该连杆提供比用于将链关闭更多的信息或属性。例如,球杆可以固定或者测量连接机器人的连杆的距离,该机器人提供至少一个维度的属性,以可以被调制来用在校准中。

[0042] 根据又一个实施例,由至少两个机器人形成闭链的步骤 (b) 包括以下步骤:使用测量设备来测量至少两个机器人的相对位置。例如,测量设备可以为测量机器人法兰之间的距离的球杆。

[0043] 根据又一个实施例,至少两个机器人的基底法兰和工具法兰不共享相同的旋转轴,以减少机器人的连接关节之间的依赖关系。这将降低校准所有连杆的可能性但是仍然是可用的,因为可以估计必要的运动属性,以模拟闭链。

[0044] 根据又一个实施例,用于估计运动模型的步骤 (d) 还基于至少两个机器人在其基底法兰处和在其工具法兰处的偏移的估计和测量。借此,可以使用这两个距离中的一个或者两个,以依比例决定模型大小。可替选的可能性在于使用机器人的统计知识来依比例决定模型 (例如,通过吉洪诺夫正则化)。

[0045] 根据又一个实施例,用于估计运动模型 (M_1, M_2) 的步骤 (d) 还基于与链的至少一个部件有关的统计信息。

[0046] 根据又一个实施例,统计信息用于基于超过在没有统计信息的情况下待求解方程的数量的传感器信息来估计模型 (M_1, M_2)。

[0047] 在又一个优选实施例中,本发明方法还包括:在步骤 (d) 之后,而在步骤 (e) 之前,评估是否获得与至少两个机器人中的每一个机器人的关节相关联的足够传感器信息的步骤。借此实现未知数的数量不超过待求解的方程式的数量。

[0048] 本方法的又一个优选实施例还包括:在步骤 (d) 之后,而在步骤 (e) 之前,评估是否获得足够位置对的数据 ($\langle R_1 Q, R_2 Q \rangle_m$) 的步骤,并且随后

[0049] -如果没有获得足够的位置对的数据 ($\langle R_1 Q, R_2 Q \rangle_m$),则重复步骤 (d),以估计运动模型,或者

[0050] -如果获得足够的位置对的数据 ($\langle R_1Q, R_2Q \rangle_m$) ,则执行步骤(e) ,以估计运动模型。

[0051] 根据本发明的又一个实施例,本方法包括以下步骤:除了收集求解方程以更新运动模型的所必要的传感器信息之外,还收集传感器信息的开销百分比 (OPI) 。借此保证运动模型的稳定收敛。

[0052] 根据又一个实施例,本方法还包括以下步骤:

[0053] -保留所述传感器信息的开销百分比 (OPI) 的至少一部分不被用于更新运动模型,

[0054] -将所述传感器信息的开销百分比 (OPI) 的所述至少一部分保存在数据存储设备上,

[0055] -使用传感器信息的开销百分比的所述至少一部分来验证校准。

[0056] 由于OPI的所述一部分不用于更新模型,所以该OPI的所述一部分可以用于验证该模型,即验证角度或位置是否对应于由所估计的模型所预测的。因此,在一个实施例中,用于验证校准的步骤可以包括:将所收集的传感器信息的开销百分比的所述一部分与由用于机器人的所更新的运动模型预测的对应值进行比较的步骤。优选地,所述比较通过计算在所收集的传感器信息的开销百分比的所述一部分中的每一个与由用于机器人的所估计的运动模型预测的对应值之间的差值并且将所述差值或者其数值与阈值进行比较来执行。根据又一个实施例,所述传感器信息的开销百分比 (OPI) 的范围处于10%与200%之间,优选20%与80%之间,更加优选20%与60%之间,或者可替选地处于10%与20%之间,或者20%与40%之间,或者40%与60%之间,或者60%与80%之间,或者80%与100%之间,或者100%与120%之间,或者120%与140%之间,或者140%与160%之间,或者160%与200%之间。

[0057] 根据一个实施例,该方法还包括:将所更新的运动模型保存在数据存储设备(该数据存储设备可以放置在可操作地连接到机器人的机器人控制器中)或者另一个设备上的步骤。

[0058] 根据又一个实施例,通过关闭所述两个机器人中的一个机器人的关节的位置调节器中的至少一个并且让该机器人由另一个机器人在周围引导来执行对链中的至少一个机器人的至少一个连杆和/或关节进行操控的步骤(c)。

[0059] 根据又一个实施例,通过关闭所述两个机器人中的每一个机器人的关节的位置调节器中的至少一个(例如,所有位置调节器)并且由操作员外部地(例如,手动地)改变关节位置来执行对机器人的整个工作空间的至少一个部件上的链中的至少一个机器人的关节中的至少一个进行操控的步骤(c)。

[0060] 根据又一个实施例,通过关闭所述两个机器人 (R_1, R_2) 中的每一个机器人的关节的位置调节器中的至少一个并且手动地改变关节位置来执行对链中的至少一个机器人 (R_1, R_2) 的关节中的至少一个进行操控的步骤(c)。

[0061] 根据又一个实施例,由限定变换的参数来确定运动模型 (M_1, M_2) 。

[0062] 根据又一个实施例,该参数为两种类型的Denavit-Hartenberg参数。该两种类型的Denavit-Hartenberg参数可以分别由Schilling参数和平行变量参数表示。

[0063] 根据本发明的另一个实施例,该方法还包括:调整通过其来对至少两个机器人 (R_1, R_2) 进行操作的力的步骤。根据又一个实施例,模型 (M_1, M_2) 中的每一个包括用于每个关节的变换。

[0064] 如上所述,至少两个机器人的运动模型优选由两种类型的Denavit-Hartenberg参数确定。两种类型的Denavit-Hartenberg参数可以由Schilling参数和设计用于平行旋转轴的变化分别表示。该变化在后文中称为平行DH参数。所选择的具有4个参数的符号都为最小的且完整的方法,以描述旋转轴之间的变换。然而,还可以使用其它符号。

[0065] 根据又一个实施例,本方法还可以包括:调整通过其来对至少两个机器人进行操作的力的步骤。优选地,每一个模型包括用于至少两个机器人中的每一个机器人的每一个关节的变换。

[0066] 上述方法可以延伸到涵盖超过两个机器人。因此,根据又一个实施例,本方法还包括以下步骤:将N个额外的机器人与至少两个机器人并联或者串联地连接,N是自然数,并且针对每个额外的N个机器人执行本发明方法的步骤。

[0067] 根据又一个实施例,所述至少两个机器人(R_1, R_2)为单个机器人的两个机器人臂。在又一个实施例中,所述臂中的至少一个可以为关节式机器人臂。此外,所述臂中的至少一个可以包括棱柱型关节。所述单个机器人具有至少一个基底法兰和至少两个工具法兰,并且在任何情况中工具法兰比基底法兰多。

[0068] 为了直接使用来自另一个机器人的工作程序,两个机器人的比例必须完全相同,并且必须相等地调整位置传感器。因为这是难以实现的,所以可能很难复制机器人之间的程序。因此本发明的目的在于提供一种复制可能未校准机器人之间程序的方法。

[0069] 由本发明的第二方面实现的该目的和另一目的,本发明的第二方面涉及一种将来自第一机器人 R_1 的工作程序转换到第二机器人 R_2 的方法,每个机器人(R_1, R_2)具有连接以下两个法兰的关节:基底法兰和工具法兰,该方法包括以下步骤:

[0070] (a) 使用第二机器人 R_2 替换第一机器人 R_1 ,

[0071] (b) 提供与第一机器人 R_1 相关联的工作程序 R_1P ,

[0072] (c) 根据工作程序 R_1P 选择多个位置和角度,并且将第二机器人 R_2 移动到那些位置,由此提供位置或角度对数据集 $\langle R_1Q, R_2Q \rangle$,并且随后

[0073] (d) 使用位置对的数据集 $\langle R_1Q, R_2Q \rangle$ 来估计所述至少两个机器人的运动模型(M_1, M_2)、基底法兰偏移(T_{base})和工具中心点偏移(T_{tcp}),并且随后

[0074] (e) 基于所述所估计的运动模型(M_1, M_2)来执行工作程序转换。

[0075] 通常出现将一个更新的机器人替换一个机器人的需求。然而,可以将“旧”机器人的关节角度用作数学模型中链的一半并且将“新”机器人的对应角度用作链的另一半,而不是执行新机器人的校准。借此实现如上步骤(c)所述的角度对数据集,其用于更新机器人的运动模型。

[0076] 本发明的第二方面的一个实施例还包括评估该程序是否能够在适当所选公差内在第二机器人上运行的步骤。

[0077] 本发明的第二方面的又一个实施例还包括以下步骤:根据工作程序 R_1P 来选择额外数量的位置,并且将第二机器人 R_2 移动到那些额外的位置,由此提供扩展的位置对的数据集合,并且随后如果该程序不能在适当所选公差内在第二机器人上运行,则使用该扩展的位置对的数据集合来执行步骤(d)和步骤(e)。

[0078] 本发明的第二方面的又一个实施例还包括基于所估计的运动模型(M_1, M_2)来转换另一个工作程序的步骤。

[0079] 本发明的第二方面的又一个实施例还包括:基于所述所估计的运动模型来执行工作程序转换的步骤(e),并且包括以下子步骤:

[0080] -使用与第一机器人 R_1 相关联的所估计的运动模型 M_1 来在 R_1P 中的所有 R_1Q 上施加正向运动,以导致程序 R_1K ,

[0081] -使用用于第二机器人 R_2 的所估计的运动模型 M_2 来在 R_1K 上施加反向运动,由此给出位置 R_2Q ,并且随后

[0082] -使用对应的 R_2Q 来替换程序 R_1P 中的 R_1Q ,由此给出与第二机器人 R_2 相关联的工作程序 R_2P ,借此完成程序转换。

[0083] 根据本发明的第二方面的又一个实施例,由限定变换的参数来确定运动模型(M_1 , M_2)。

[0084] 根据本发明的第二方面的又一个实施例,由三种类型的Denavit-Hartenberg参数来确定运动模型(M_1 , M_2)。

[0085] 根据本发明的第二方面的方法的又一个实施例,三种类型的Denavit-Hartenberg参数由Schilling参数、平行DH变量参数和具有平移的Roll-Pitch-Yaw旋转(后文中称为RPY)参数分别表示。

[0086] 根据本发明的第二方面的方法的一个实施例,RPY参数用于调制机器人的最后一个关节。还可以使用调制全程旋转和平移的其它符号。但是RPY符号是用于小旋转变化的6个参数的最小且完整的符号。

[0087] 根据本发明的第二方面的又一个实施例,通过将预定模型用作起始点来估计运动模型(M_1 , M_2)。这些预定模型可以是例如通过使用上述提及的某种统计信息所确定的近似模型。

附图说明

[0088] 本发明的本质和优势的进一步理解可以通过参考说明书的剩余部分和附图来实现。在下文中,参考附图更详细地理解本发明的优选实施例,其中:

[0089] 图1示出Schillings Denavit-Hartenberg符号,

[0090] 图2示出平行Denavit-Hartenberg符号变型,

[0091] 图3示出两个机器人的闭链配置,

[0092] 图4示出两个机器人的可替换的闭链配置,

[0093] 图5示意性地示出在闭链配置中连接的两个6连杆机器人的变换,

[0094] 图6示意性地示出两个机器人的未校准链的表示,

[0095] 图7示意性地示出距离如何可用于限定模型规模,

[0096] 图8示出限定两个旋转轴之间的公法线的适配器,

[0097] 图9示出将表1中的变换放置在系统的哪里,

[0098] 图10示出校准 R 个机器人的方法的实施例的流程图,

[0099] 图11示出校准机器人的方法的最高级实施例,

[0100] 图12示出校准循环的自动版本实施例的流程图,

[0101] 图13示出校准循环的手动版本实施例的流程图,

[0102] 图14示出保存非同步化机器人的传感器信息的方法的实施例的流程图,

- [0103] 图15示出保存同步化机器人的传感器信息的方法的实施例的流程图，
 [0104] 图16示出其中将新机器人与旧机器人的模型图像一起示出的闭链，
 [0105] 图17示出将表2中的变换放置在系统的哪里，
 [0106] 图18示出用于收集数据对以用在程序转换中的流程图的实施例，
 [0107] 图19示出用于程序转换的流程图的实施例，
 [0108] 图20示出用于程序转换的方法的实施例的流程图，
 [0109] 图21示出用于限定关节角度的方法的实施例的流程图，
 [0110] 图22示出用于执行未校准机器人之间程序转换的方法的实施例的流程图。

具体实施方式

[0111] 现在在下文中将参考附图更充分地描述本发明，其中示出了本发明的示例性实施例。然而，本发明可以不同形式体现，并且不应当解释为限于本文给出的实施例。相反，提供这些实施例，使得本公开是彻底的并且完整的，并且将向本领域的那些技术人员充分地传达本发明的范围。相同的参考符号在全部附图中指代相同元素。因此针对每个附图的描述将不详细地描述相同元素。

[0112] 经典的运动学用于模拟机器人。这使得将来自机器人关节的信息转移到笛卡尔坐标系成为可能，以使得机器人关节是可比较的。

[0113] 符号

[0114] 所使用的符号如下：

[0115] $T_c(\theta)_r$ ，其是围绕轴c顺时针旋转 θ 的齐次变换，其中，c为x,y或者z。

[0116] $T_c(s)_t$ ，其是沿着轴c平移s的齐次变换，其中，c为x,y或者z。

[0117] T_j^i ，其是从i到j的齐次变换。

[0118] Z_j^i ，其是用于从i到j的齐次变换的z轴的单位向量。

[0119] P_j^i ，其是从i到j的位置。

[0120] 机器人表示

[0121] 用两种类型的Denavit-Hartenberg (DH) 参数来模拟机器人。第一种类型的DH使用Schilling符号(c.f.R.J.Schilling. “Fundamentals of Robotics: Analysis and Control”. Simon&Schuster Trade, 1st ed. 1996, 其通过引用方式并入本文中) 来描述两个非平行z轴之间的变换，因为当z轴平行时，符号具有奇点(见下面的等式1)。

[0122] 第二种类型使用DH平行变量来避免该奇点(见下面的等式2)。平行DH变量使用与原始DH相同的原理，但是当第一个y轴和下一个z轴相应地平行时具有奇点。由于将到与第一z轴交叉的法线的距离用作参数，所以Schilling DH奇点由第一z轴和下一个z轴之间的法线限定，见图1。类似于Schilling符号来限定平行DH变量的奇点，但是通过使用第一y轴和下一个z轴之间的法线来移动奇点，见图2。

[0123] 在没有任何DH参数奇点的情况下选择用于每个关节元素的右边符号导致了机器人的表示：

$$[0124] \quad \Phi_{DH}(\theta, d, \alpha, a) \equiv T_z(\theta)_r T_z(d)_t T_x(\alpha)_r T_x(a)_t \quad (1)$$

$$[0125] \quad \Psi_{DH}(\beta, b, \alpha, a) \equiv T_x(\beta)_r T_x(b)_t T_x(\alpha)_r T_x(a)_t \quad (2)$$

[0126] 闭链模型

[0127] 该表示将链中的每个元素组合为一个模型。该模型反映闭链的物理特征,并且使得每个元素彼此有关成为可能。取决于用于连接机器人的设备,可以使用不同方法。在基本安装中,经由硬固体适配器2连接工具法兰,并且使用硬固体适配器4连接基底法兰,并且链中的所有关节由DH参数表示,如上所述。优势在于:最小完整的表示描述了系统中相对彼此的关节旋转轴,见图3,示出了在闭链中经由适配器2和4彼此连接的两个机器人6和8。图4示出了两个机器人6、8的可替选的闭链配置,该两个机器人6、8经由适配器2在其工具法兰处连接。基底法兰10安装在能够从其确定基底法兰10之间距离的表面上,这是足够的信息,以“闭合链”。图3和图4示出了由通用机器人制造的UR5类型的两个工业机器人6和8。

[0128] 高级链组合

[0129] 更高级的适配器可以用于连接工具法兰和基底法兰10。优选地,该模型被配置为反映所使用的设备。连接机器人6、8的基底法兰10的高级方法的示例可以包括棱柱型关节,该棱柱型关节可以移动机器人6、8已知距离。可以使用球杆或者额外的关节来完成将更高级的关节添加到链的另一个示例。球杆是用于校准单个机器人的常见已知工具(c.f.M.R.Driels:Using passive end-point motion constraints to calibrate robot manipulators.Journal of Dynamic Systems,Measurement,and Control,115(3):560-566,1993,其通过引用方式并入本文中)。该方法通过将球杆端的一端安装到固定位置并且另一端安装到机器人来工作。这意味着相对固定位置完成所有观察,并且因此受该固定位置所限。由于固定位置,也限制了移动。当设备用在本发明的上下文中时,每端安装在每个机器人6、8上,并且因此,测量将不限于固定位置。这给出了获得与机器人6、8的整个工作空间有关的测量。

[0130] 一些机器人具有多个肢。通过将多个肢看做独立的机器人臂,根据本发明的方法(其在本专利说明书中被描述)可以用于在没有额外的主动测量设备的情况下校准这些肢。

[0131] 根据本发明的方法基于闭链原理,如图6所示。通过将该原理转移到模型,人们可以在不需要额外测量设备的情况下实现其中嵌入反馈的校准方法。随后在数学上建模该模型,可以调整该模型以履行闭链原理,并且因此校准机器人6、8的物理关节的数学模型。在数学上,通过打开链并且随后计算两个关节端之间的差值来在模型中计算误差,见图7。为了确定误差而没有物理上断开机器人,这是纯数学技巧。在方程组(该方程组将求解器引导到正确解)中,通过收集来自机器人6、8的足够观察使用Newton-Raphson方法以完成运动模型的调整过程,从而描述整个工作空间。优选地,收集如此多的观察(传感器信息),以使得实现了方程的超定系统(over-determined system),由此将稳定收敛引导到正确解。

[0132] 最小二乘函数

[0133] 由表示平方误差的最小二乘函数求解优选的方程的超定系统。在等式3中,该变换表示在开链中的关节的误差,如图7所示:

$$[0134] \quad \text{误差} \equiv T_0^{\hat{0}} = T_0^1 T_1^2 \dots T_{n-1}^n T_n^{\hat{0}} \quad (3)$$

[0135] 通过计算误差平移部分的平方长度将位置误差考虑在内,见等式4:

$$[0136] \quad ePos^2 \equiv \|p_0^{\hat{0}}\|^2 = p_0^{\hat{0}} \cdot p_0^{\hat{0}} \quad (4)$$

[0137] 由轴线角度符号AA计算旋转误差(c.f.Robert J.Schilling:Fundamentals of Robotics:Analysis and Control.Simon&Schuster Trade,1st edition,1996)。通过从误差旋转部分计算AA来找到角度(angle)误差,见等式5:

$$[0138] \quad \{angle, \overrightarrow{axis}\} = AA(R_0^{\delta}) \quad eRot \equiv angle \quad (5)$$

[0139] 产生的最小二乘等式为针对N个观察的等式4和等式5的平方和,见等式6:

$$[0140] \quad eSum^2 = \sum_{n=0}^{N-1} ePos_n^2 + eRot_n^2 \quad (6)$$

[0141] 表示链端之间的误差间隙,如图6所示。

[0142] 约束条件

[0143] 为了适当地缩放该模型,必须在模型中具有已知距离或者距离变化。这可以由如图7中的三角法示出,其中,三角形的角度相同但是比例不相同。估计模型的比例因子的方法是通过实现其中可以限定并且固定已知距离的模型。或者设计可以固定在所用模型中的距离。另一种可能性在于使用与预期的机器人大小有关的统计信息并且将该统计信息用于调节比例推测。这可以例如由吉洪诺夫正则化来完成。

[0144] 收集观察

[0145] 为了使用如上所述的方法,必须收集并且保存来自物理链的观察,以使用数学表示模仿该物理链。可以由操作者监督手动地或者由在工作空间中自主四处移动的机器人自动地来收集观察值。必须收集在整个工作空间中分布的足够测量。这是因为校准仅可以被假定为表示所用工作空间的事实。因为机器人6,8需要彼此连接并且跟随,所以进一步优选的是,可以关闭一些关节中的位置调节器并且由其它关节将该位置调节器在周围引导。因为由于缺少校准而不知道运动,所以必须在没有反向运动的任何使用的情况下操控机器人6,8的链。

[0146] 评估

[0147] 最后校准的可靠评估使用所估计的数学模型并且将该数学模型与观察进行比较。重要的是这些观察独立于用在校准程序中的并且分布在机器人的整个工作空间的观察。如果来自校准的观察用于评估校准,则该结果将不是可信赖的,因为没有增加新信息以支持该结果。用于结果质量的另一种可靠指示是让校准在物理已知参数上进行调整并且随后将该校准与已知值进行比较。

[0148] 具有在闭链中连接机器人6,8的关节打开可能性以调整除了与位置确定有关的参数之外的那些参数。这些参数的示例可以调整与链中的力有关的参数。

[0149] 校准示例

[0150] 该示例的目的在于示出并且解释根据本发明的方法如何能够用在由申请人(通用机器人)制造的特定机器人上。该设置包括两个UR-6-85-5-A工业串联机器人6,8和用于连接工具法兰和基底法兰的两个固体无源适配器。在图8中仅示出了用于连接工具法兰的固体适配器2。该特定类型的机器人6,8具有分散在平行的两个转动关节和与先前的旋转轴垂直的四个转动关节上的六个自由度。为了实现两个机器人6,8的纯静态运动校准,需要将该两个机器人相对彼此安装在固定位置。闭合该链的适配器2被设计为使得所连接的端关节不共享相同旋转轴,因为这将引入关节之间的一些不需要的模型依赖性。在该示例中,使用

已知位移和90°的旋转来连接工具法兰和基底法兰,以优化对Schilling DH符号的设置。为限定闭链模型的规模,可以使用与机器人有关的统计信息或者模型中的固定大小。在该实现方式中,已经选择使用固定的已知大小。已知大小为两个旋转轴18,20之间的公法线16的长度。该法线的长度直接由DH“a”参数表示,并且可以因此被限定并且固定(见图8)。

[0151] 表示

[0152] 闭链模型包括用于每个节点的变换,如图9所示。为将相同表示用于两个机器人,误差计算虽变化但却仍然如下面等式7中计算相同误差:

$$[0153] \quad T_{base}^{wrist3} \equiv T_{base}^{shoulder} T_{shoulder}^{elbow} T_{elbow}^{wrist1} T_{wrist1}^{wrist2} T_{wrist2}^{wrist3}$$

$$[0154] \quad \text{误差} \equiv \left[T_{base6}^{wrist3} T_{base6}^{wrist3} \right]^{-1} \left[T_{base8}^{wrist3} T_{base8}^{wrist3} \right] \quad (7)$$

[0155] 可以使用DH的延伸版本来表示两个机器人之间的连接(见下面的等式8和等式9)。该表示可以使得以类似的方式将任何变换表示为给出相同优势的DH。

$$[0156] \quad T_{\Phi DH}(\theta_1, d_1, \alpha, a, \theta_2, d_2) \equiv T_z(\theta_1) r T_z(d_1) t T_x(\alpha) r T_x(a) t T_z(\theta_2) r T_z(d_2) t \quad (8)$$

$$[0157] \quad T_{\Psi DH}(\beta_1, b_1, \alpha, a, \beta_2, b_2) \equiv T_x(\beta_1) r T_x(b_1) t T_x(\alpha) r T_x(a) t T_x(\beta_2) r T_x(b_2) t \quad (9)$$

[0158] 在下面的表1中描述了用于闭链模型的每个变换的参数。在模型中使用“a”参数表示固定距离(见表1)。针对两个连接(工具法兰和基底法兰)实行相同设计技巧,可以使用已知法线长度来固定这两个连接。如上所述,优选的是(但不必)具有系统中的多个预知参数。这可以使得包括预知参数中的一个作为基础真实地评估校准成果。

[0159]

描述	机器人 ₆	机器人 ₈
T_{wrist3_8}	$T_{\Phi DH}(\theta_1, d_1, \alpha, \hat{a}, \theta_2, d_2)$	
T_{wrist3_6}	$T_{\Phi DH}(\theta_1, d_1, \alpha, \hat{a}, \theta_2, d_2)$	
T_{wrist2}	$\Phi_{DH}(\theta, d, \alpha, a)$	$\Phi_{DH}(\theta, d, \alpha, a)$
T_{wrist1}	$\Phi_{DH}(\theta, d, \alpha, a)$	$\Phi_{DH}(\theta, d, \alpha, a)$
T_{elbow}	$\Psi_{DH}(\beta, b, \alpha, a)$	$\Psi_{DH}(\beta, b, \alpha, a)$
$T_{shoulder}$	$\Psi_{DH}(\beta, b, \alpha, a)$	$\Psi_{DH}(\beta, b, \alpha, a)$
T_{base}	$\Phi_{DH}(\theta, d, \alpha, a)$	$\Phi_{DH}(\theta, d, \alpha, a)$
T_{base8}	$T_{\Phi DH}(\theta_1, d_1, \alpha, \hat{a}, \theta_2, d_2)$	
T_{base6}	$T_{\Phi DH}(\theta_1, d_1, \alpha, \hat{a}, \theta_2, d_2)$	

[0160] 表1:该表描述针对其中机器人6,8成90°放置的设置的可调整且固定(“a”参数)参数。

[0161] 为了在机器人6,8的控制器中使用校准模型,必须重新计算到所需要格式中的变换。包括从 T_{base6}^{wrist3} 和 $T_{wrist3_6}^{wrist3}$ 中取出有用信息。在该情况中Schilling DH符号。

[0162] 图10示出校准R个机器人的方法的实施例的流程图,R为等于或者大于2的自然数。所示出的实施例包括以下步骤:提供具有多关节、基底法兰和工具法兰的R个机器人。在步骤22中,闭链由R个机器人形成。然后,在步骤28中,对应位置对($\langle R_i Q, R_j Q \rangle_m$)被收集。然后,在步骤30中,评估是否收集足够数据以估计该模型。如果情况不是这样,则步骤26,改变机

机器人的关节位置,并且收集对应位置对($\langle R_iQ, R_jQ \rangle_m$),如方框28所示。然后再次在步骤30中,评估是否已经收集足够数据。如果情况不是这样,则重复步骤26和步骤28,如箭头29所示。然而,如果已经收集足够数据,则通过使用所收集位置对的数据集合 $\langle R_iQ, R_jQ \rangle$ 的知识来更新或者精炼或者评估该模型,如步骤32所示。然后在步骤34中保存这些更新模型,凭此,完成校准,如步骤36所示。

[0163] 图11示出根据本发明的校准机器人方法的最高级整体实施例。在步骤38中,开始该方法,并且然后在步骤40中,将机器人一起安装在闭合运动链中,并且然后,在步骤42中,针对不确定参数执行根据本发明实施例的校准循环,来以开始点预先准备全部校准。如果该循环成功,则在步骤44中确定完整模型。如果这成功,则实行校准,如块46所示。然而,如果步骤42或44中的任何一个失败(分别如由箭头50和52所示),则校准失败,如方框48所示。

[0164] 图12和图13示出实现在图12的流程图中示出的块42和块44的两种可替换方法。

[0165] 图12示出图11中的校准循环42和44的自动版本的实施例。在步骤54中,生成或者加载下一个目标关节角度,然后,在步骤56中,除了一个机器人之外的所有机器人被设置为迫使头以目标角度朝向而被控制。然后,在步骤58中,使用位置控制来将最后剩余机器人设置为头以目标角度朝向。然后,在步骤60中,评估传感器信息中的变化是否大于适当选择阈值,以避免相同或者差不多相同测量。如果情况是这样,则保存传感器信息,如步骤62所示。另一方面,如果传感器信息中的变化小于所述适当选择阈值,则在下一个步骤64中评估是否已经收集足够数据以继续校准。如果情况是这样,则停止机器人移动,如步骤66所示,随后执行校准,即精炼该模型,如步骤68所示。然后在步骤70中,评估校准是否ok。如果情况是这样,则实行校准循环,如步骤72所示。如果步骤64中的评估示出没有收集足够数据来完成校准,则在步骤74中检查机器人是否仍然移动,并且在肯定的情况下,重复步骤60-64。如果机器人不移动,则在步骤76中确定机器人是否意外地停止;如果是这样的情况,则在步骤80中,执行用于物理不便的错误检查,例如如果机器人与周围环境或者它们本身冲突的话。如果在步骤76中的评估结果是否定的,则从步骤54重复这些步骤。

[0166] 图13示出图11中的校准循环42和44的手动版本的实施例。由于本方法的多个步骤类似于图12中示出的那些步骤,所以在下文中将仅解释不同。本质不同在于在步骤81中将所有机器人设置为力控制,然后在步骤60之前,在步骤82中手动操控关节角度。

[0167] 图14和图15示出用于保存传感器信息的流程图,如图12和图13中的步骤62所示。图14示出用于保存非同步化机器人的传感器信息的流程图,并且图15示出用于同步化机器人的一个流程图。在图14中的第一步骤84中,暂停机器人的移动,然后在步骤86中,评估机器人是否停止,并且如果是,则在步骤88中保存传感器信息例如关节角度,随后在步骤90中继续机器人的移动。然后,如果机器人被同步化,则直接保存传感器信息,如图15中的流程图中的子步骤88所示。这是可能的,因为同步化保证了同时收集来自所有传感器的信息。如果这不是同时完成,则所收集的数据集合不反映闭链,并且在那种情况中,测量将是不可用的。如果机器人没有被同步化,则必须在收集位置对之前停止这些机器人,以保证一致性。

[0168] 程序复制的示例

[0169] 将该部分描述为闭链方法如何能用于将工作程序从一个机器人复制到另一个机器人的示例,其中,该一个机器人或者两个机器人未校准。该示例利用待复制的程序。待复制的程序包括机器人配置的路点(way-point)。这里通过使用路点来获得闭链,以表示链的

第一部分,并且然后通过使用意图执行第一机器人任务的新机器人再教导相同路点来数学地将链闭合。见图16,其中将新机器人6与旧机器人8的模型图像一起示出。

[0170] 数据

[0171] 所生成的参考数据基于将要被复制的机器人程序。通过再学习关键路点位置来手动地收集数据,这对程序任务是必不可少的。这些必要位置可以取决于程序而精确地变化,但是在大部分情况中将是最明确的且最容易复制的那些位置。通过再学习这些必要位置,还可以实现新机器的产生程序将在这些关键位置匹配。如果在相同的两个机器人之间复制几个程序,则可以再利用那些关键位置,由此导致它们之间的更高级遵守。取决于任务和机器人工具,这可能难以确定校正位置和旋转。特别地,如果工具独立旋转,则旋转可能难以正确地复制。因此,这可以降低知识水平但是仍然可用,因为由于旋转独立,所以这些任务中的旋转不是那么重要。取决于机器人任务,所收集的数据通常聚合到进行机器人主要动作的组中。这意味着两个机器人的工作空间之间的关系仅是部分已知的并且可以仅在关键位置附近提供正确的对应配置。然而,因为其它路点对机器人任务不是必须的,所以这在大部分情况中针对执行程序任务的机器人将是足够好的。如果需要将程序复制回到原来机器人,则可以再使用相同对应关键位置。这使原来程序以及该程序中的变化能够回到原来机器人。如果在类似机器人单元中使用相同程序,则这是特别关注的,由此在没有损失灵活性的情况下通过复制程序来使产品能够被增大规模。

[0172] 机器人基底表示

[0173] 在本示例中,假定在两个机器人6,8上安装相同工具,并且工具中心点的位置相同(见图16)。由欧拉角(Euler angle)、RPY和3D位置向量实行机器人6,8的两个基底旋转中心之间的变换调制。通过使用欧拉角,实现了参数尽可能少的表示,这相对于机器人移位旋转而适当的调整或者没有调整是无奇点的,并且避免使用约束优化算法的需要。所选择的表示在下面的等式10中表述:

$$[0174] \quad T_{RPYxyz}(\theta_x, \theta_y, \theta_z, x, y, z) \equiv T_x(x) {}_tT_y(y) {}_tT_z(z) {}_tT_z(\theta_z) {}_rT_y(\theta_y) {}_rT_x(\theta_x) {}_r \quad (10)$$

[0175] 机器人表示

[0176] 使用三种类型的Denavit-Hartenberg参数来调制机器人6,8。两个机器人中的第一个与上述校准示例相同使用。然而,针对最后关节的调制,选择RPY符号,以保证可以调制任何位置和旋转(见下面的等式11)。该符号被使用,这是因为没有其它DH符号可以表示被需要来调制任何工具法兰变换的任何变换。如同基底表示,RPY是好选择,这是因为仅适当的调整或者没有调整被需要模拟。通过选择用于每个关节的正确符号,结果表示了没有任何参数奇点的机器人:

$$[0177] \quad RPY_{DH}(r, p, y, x, y, z) \equiv T_z(\theta_z) {}_rT_y(\theta_y) {}_rT_x(\theta_x) {}_rT_x(x) {}_tT_y(y) {}_tT_z(z) {}_t \quad (4)$$

[0178] 工具表示

[0179] 限定其中工具中心点相对机器人的工具法兰放置的变换被称为 T_{tf}^{tcp} 。由于假定相同工具安装在两个机器人6,8上,所以固定该变换。此外,可以由最后关节的参数获得所需要的任何小调整。在该示例中,只要机器人的相对比例与物理机器人6,8的比例相同,模型的比例就不重要。只要该方法的输入和输出是纯角度,就是有效的,这是因为角度不依赖于物体的比例,如图7所示。

[0180] 完整模型

[0181] 在下面的表2中示出了模型表示。为了避免模型中的线性相关参数,固定参数中的一些。固定用于两个机器人的基底关节的参数 θ 和 d ,因为可以由 T_{base}^{base} 表示实行相同调整。固定机器人的最后关节变换中的一个 T_5^f ,因为两个机器人共享工具中心点 T_{tf}^{tcp} ,并且可以通过两个关节的表示实行任何小调整。因此,所述参数彼此依赖。由于该方法仅接收关节角度信息,所以必须固定物理长度,以避免与模型比例有关的线性依赖或者以使用统计信息。在该情况中,已经选择使用统计信息调节最优化方法,这是因为即使问题是不适定的/未确定的也使得该方法可用。所选择的调节方法基于用于不适定等式的吉洪诺夫正则化。这使最小二乘优化能够选择最靠近期望数量的无限可能性的解。用于每个机器人的可调整参数的数量 N 实现了下面的等式以针对最小的且完整的符号,针对两个机器人再使用 T_{base}^{base} 和 T_5^f , R =转动关节数量。 T =棱柱型关节数量。 $N=4R+2T+6$ 。在该示例中, $R=6$ 且 $T=0$,这得出 $N=30$ 。

[0182]

描述	机器人 _i	机器人 _j
T_{tf}^{tcp}	固定	
T_{wrist3}^{tf}	$RPY_{DH}(\phi, \psi, \theta, \phi, \psi, \theta)$	$RPY_{DH}(r, p, y, x, y, z)$
T_{wrist2}^{wrist3}	$\Phi_{DH}(\theta, d, \alpha, a)$	$\Phi_{DH}(\theta, d, \alpha, a)$
T_{wrist1}^{wrist2}	$\Phi_{DH}(\theta, d, \alpha, a)$	$\Phi_{DH}(\theta, d, \alpha, a)$
T_{elbow}^{wrist1}	$\Psi_{DH}(\beta, b, \alpha, a)$	$\Psi_{DH}(\beta, b, \alpha, a)$
$T_{shoulder}^{elbow}$	$\Psi_{DH}(\beta, b, \alpha, a)$	$\Psi_{DH}(\beta, b, \alpha, a)$
$T_{base}^{shoulder}$	$\Phi_{DH}(\theta, d, \alpha, a)$	$\Phi_{DH}(\theta, d, \alpha, a)$
T_{base}^{base}	$TRPY_{xyz}(\theta_x, \theta_y, \theta_z, x, y, z)$	

[0183] 表2描述了模型的表示的可调整参数和固定参数。

[0184] 图17是示出其中将表2中的变换放置在系统中的示例性说明。

[0185] 图18是示出用于收集用在如图19所示的程序转换中的位置对的流程图的实施例。在下文中,假定已经由机器人 i 取代机器人 j 。每个机器人具有多个关节、基底法兰和工具法兰。在第一步骤92中,加载程序集合 R_iP ,并且然后在下一个步骤94中选择根据工作程序 R_iP 的多个位置或角度 R_iQ 。这些位置和由此对应的角度 R_iQ 为编程任务中的优选必要路点。然后在步骤96中,针对列表 R_iQ 中的所有 R_iQ_m ,执行步骤98。在步骤98中,将机器人 R_j 移动到 R_iQ_m 位置的那些对应位置,然后在步骤100中将其保存为位置或角度对的集合 $\langle R_iQ, R_jQ \rangle_m$ 。如方框102所示,如果没有完成循环,则重复步骤96-100。然而,当完成循环时,结果为位置或角度对的集合 $\langle R_iQ, R_jQ \rangle$,如方框104所示。

[0186] 图19是示出用于程序转换的流程图的实施例,即使用上述所收集的数据集合来将工作程序从机器人 i 复制到机器人 j 。在步骤92中,加载程序 R_iP 。然后,在步骤106中,加载对应的位置或角度对的数据集合 $\langle R_iQ, R_jQ \rangle$ 。然后在步骤108中,使用所收集的位置或角度对的数据集合 $\langle R_iQ, R_jQ \rangle$ 和闭链规则来估计运动模型 M_i, M_j, T_{base} 和 T_{tcp} 。然后在步骤110中,使用 M_i 将正向运动施加在 R_iP 中的所有 R_iQ 上,由此导致 R_iK 。然后,在步骤112中,使用 M_j 将反向运动施加在所有 R_iK 上,由此导致 R_jQ 。然后在步骤114中,用对应的 R_jQ 取代 R_iP 中的所有 R_iQ ,以导

致R_jP,借此完成程序转换,如块116所示。

[0187] 图20示出用于程序校正的最高级流程图。开始点是执行机器人程序中所描述任务的工作机器人安装,如步骤188所示。然后在步骤120中,例如在机械故障情况中执行设置中的变化。这可以是机器人的变化,例如机器人的关节的替换,如方框122所示,或者机器人替换,如方框124所示,或者设置中的一些其它变化,如方框126所述。然后,在下一个步骤128中,确定在程序中将新机器人部件(例如,整个新机器人)-新对应关节角度使用到旧重要位置中的一些,由此确定新机器人和旧机器人的关节角度对的数据。然后在步骤130中,使用闭链属性来将这些数据用于精炼旧机器人和新机器人的运动模型。随后,在步骤132中,如上所述执行程序转换。如果程序校正失败,则重复步骤128-132。然而,如果程序校正成功,则在步骤134中例如通过让程序在新机器人上运行来确定程序是否可用。这可以例如在适当所选公差条件下通过评估程序是否能够在第二机器人上运行来完成。

[0188] 如果程序是可用的,则在下一个步骤(可选步骤136)中评估是否需要转换更多程序,并且如果是,则执行步骤132-136,其中可以调整或者可以额外地添加给出的角度对。否则,程序准备使用,如由在所示出的流程图中的方框138所示。

[0189] 图21是更详细地示出将如何执行在图20中示出的上述流程图中的步骤128的实施例的流程图。所示出的方法是迭代的:首先,在步骤140中,使用来自程序的一个重要路点,然后,在步骤142中,通过将新机器人移动到正确位置来限定新机器人的关节角度的新集合。然后,在步骤144中,将关节角度的旧集合和新集合保存为对应的对。然后,在最后的步骤146中,确定是否需要限定其它重要路点。如果是,则重复步骤140-146。如果否,则在用于更新模型的下一个步骤中使用角度对(见图20中的步骤130)。

[0190] 图22更详细地示出可以如何执行用于校正/转换程序的步骤132的实施例。如所示出的,第一步骤在于加载用于校正的程序148,并且然后在下一个步骤中,确定第一路点。在步骤152中,评估是否已经由步骤128限定对应位置。如果没有,则然后在步骤154中,使用表示旧机器人的模型来应用正向运动,则由此产生结果,基于该结果,使用表示新机器人的模型来计算反向运动结果,如步骤156所示。然后在步骤158中,评估计算是否成功。并且如果是,则在步骤160中,选择由反向运动计算的最靠近的解。然后在下一个步骤162中,用新计算的路点来替换旧路点。最后,在步骤164中,评估是否需要更多路点,并且如果是,则执行步骤150-164。如果在步骤152中的评估成果是真的,则使用已经限定的对应关节角度,如步骤166所示。

[0191] 如所示出的,本发明可以执行未校准机器人之间的程序转换。

[0192] 参考符号列表

[0193] 在下文中给出了用在本发明的详细描述中的参考符号的列表。

[0194]	2	工具法兰适配器
[0195]	4	基底法兰适配器
[0196]	6,8	机器人
[0197]	10	基底法兰
[0198]	16	旋转轴之间的公法线
[0199]	16,20	旋转轴
[0200]	22-36	方法步骤,校准

[0201]	38-52	方法步骤,校准
[0202]	54-82	方法步骤,自动和手动校准循环
[0203]	84-90	方法步骤,保存传感器信息
[0204]	92-104	方法步骤,收集角度数据对
[0205]	106-116	方法步骤,程序转换
[0206]	118-138	方法步骤,程序校正
[0207]	140-146	方法步骤,限定关节角度
[0208]	148-166	方法步骤,校正程序

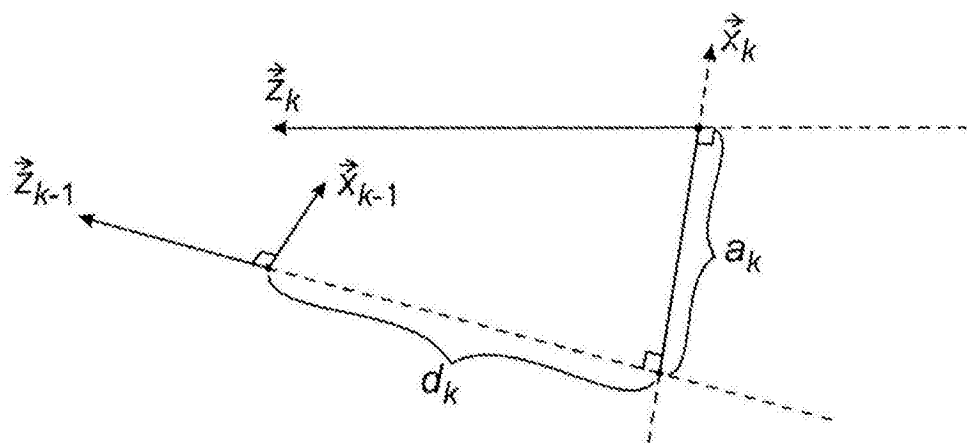


图1

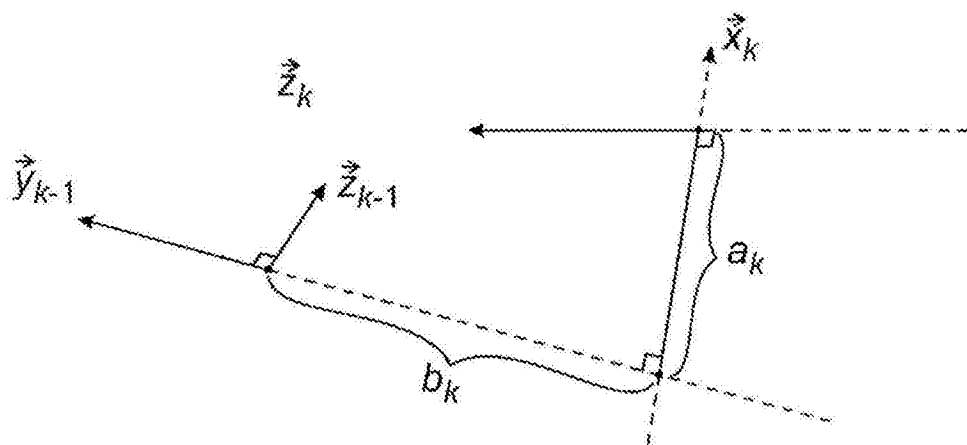


图2

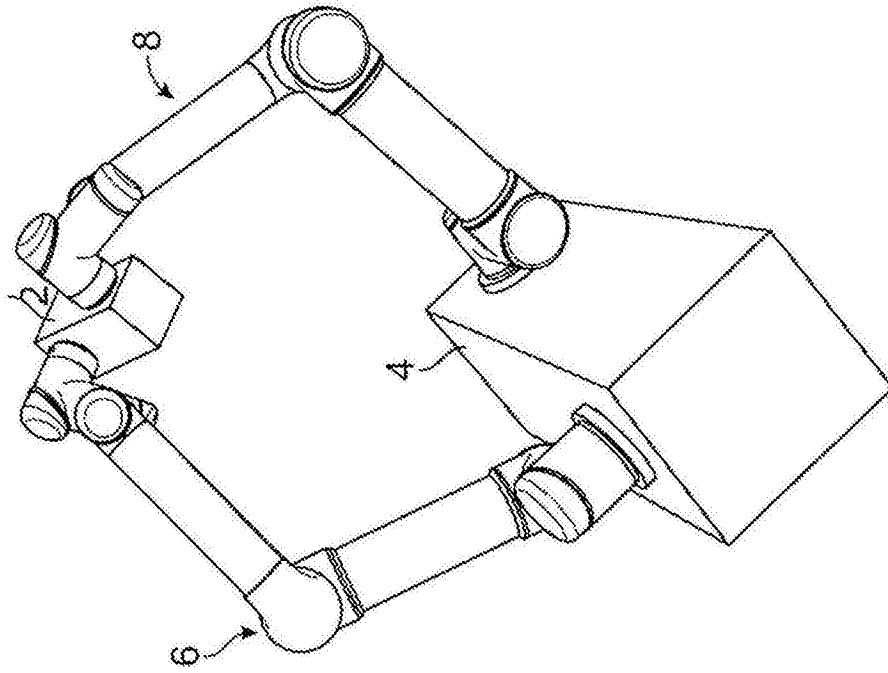


图3

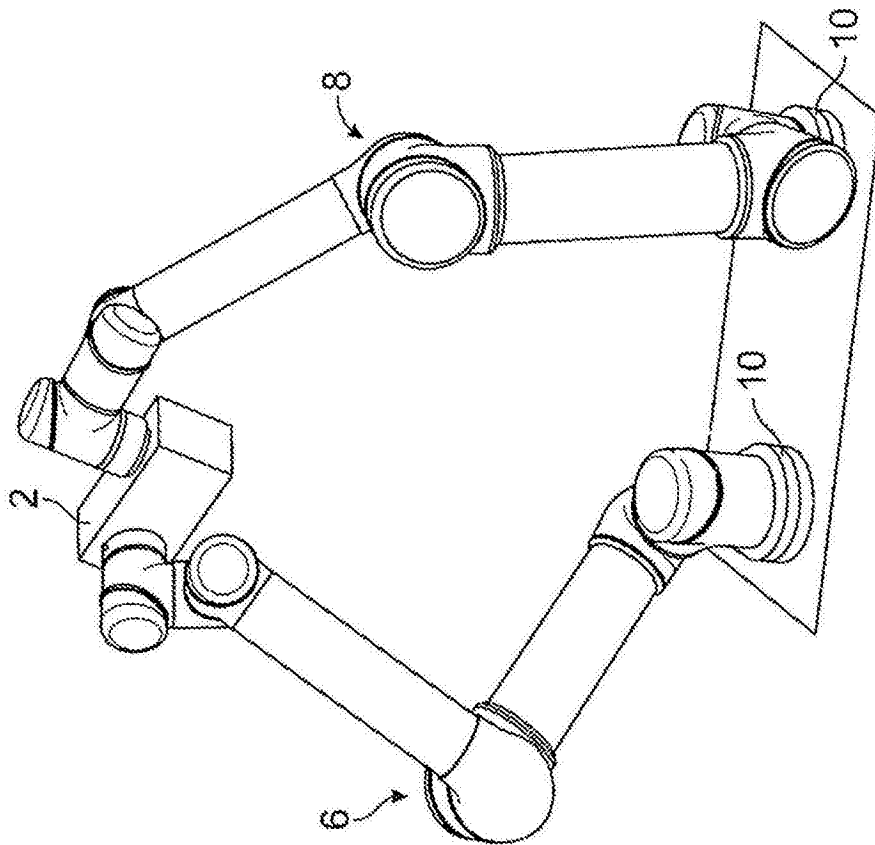


图4

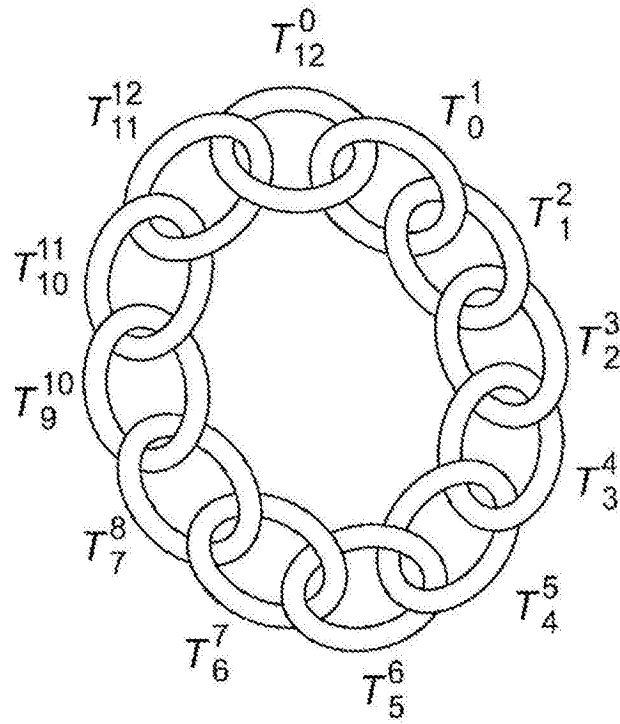


图5

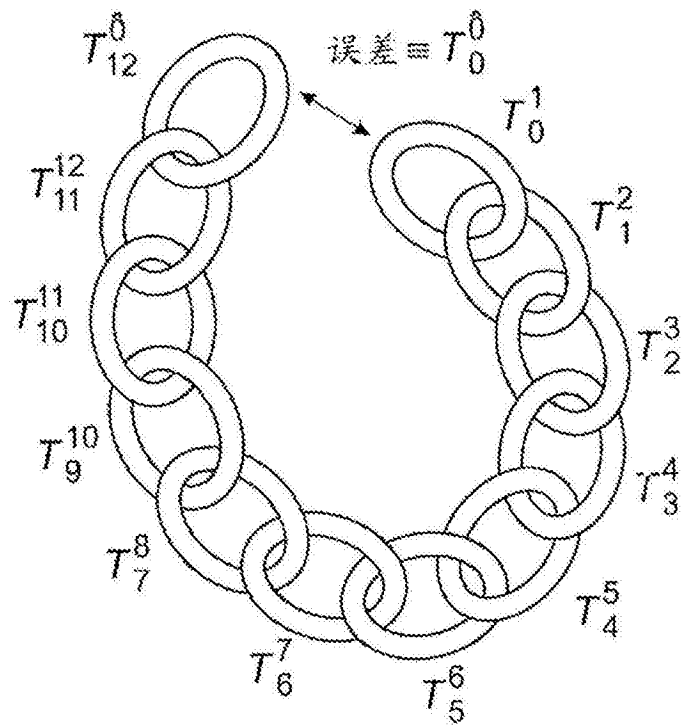


图6

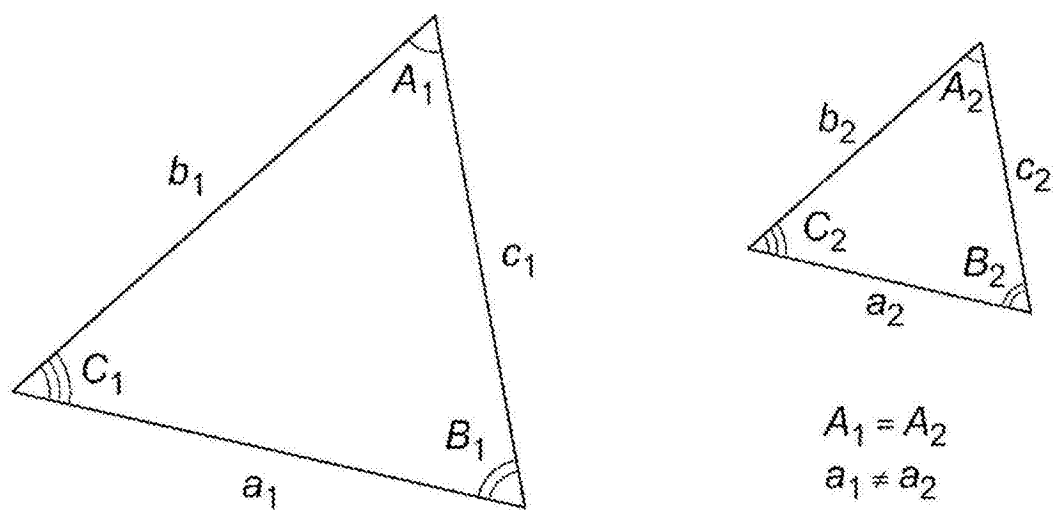


图7

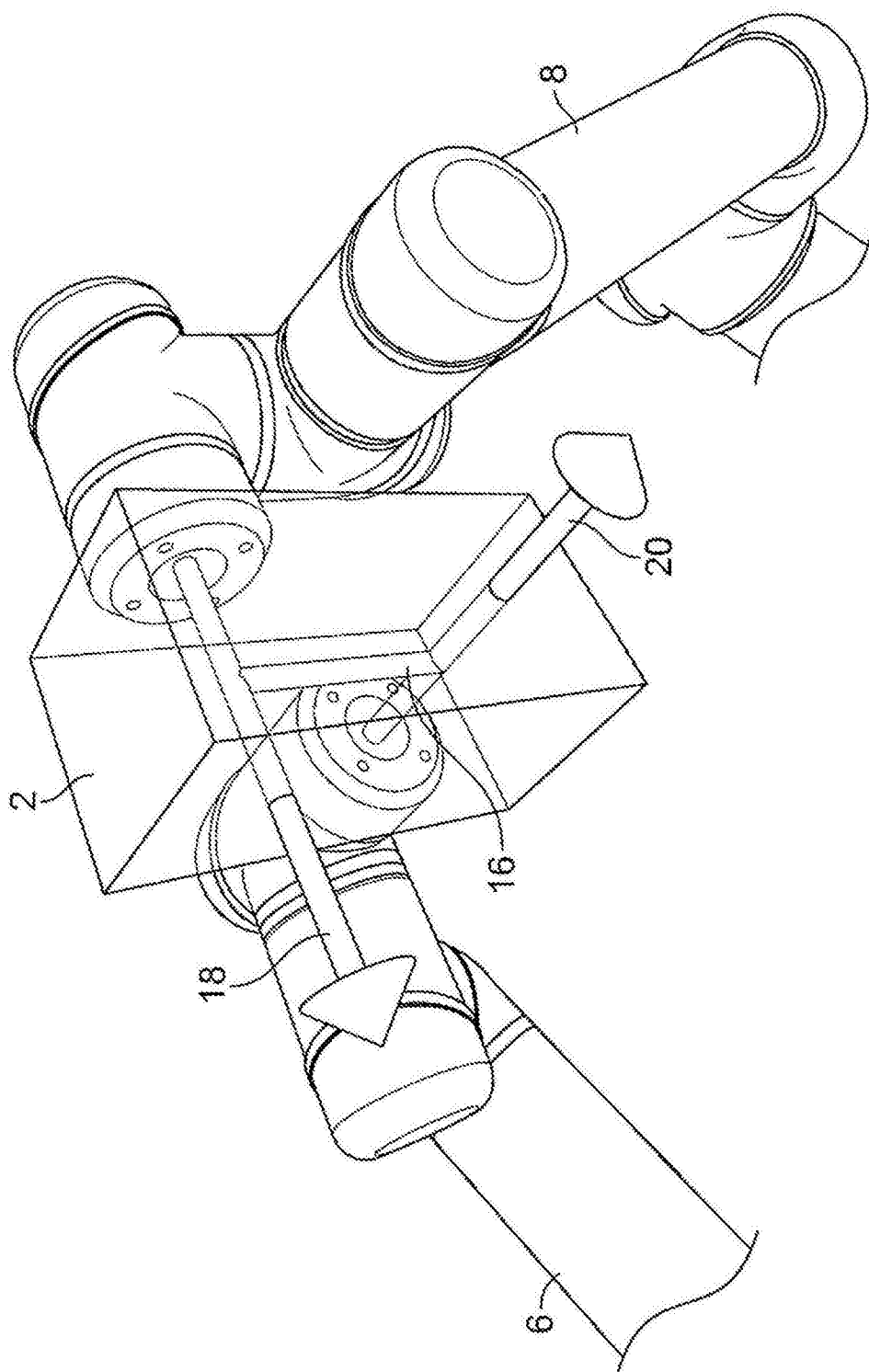


图8

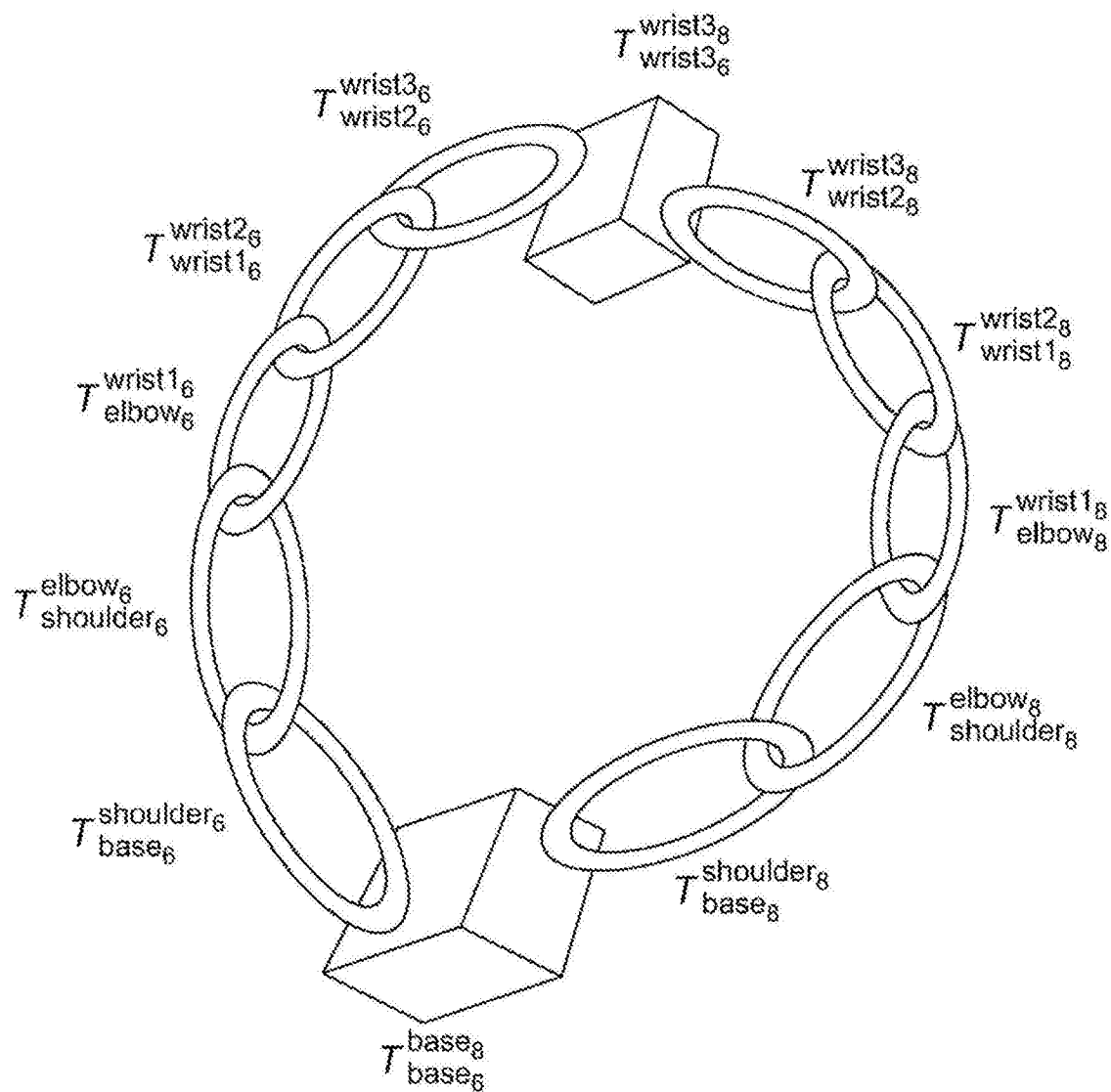


图9

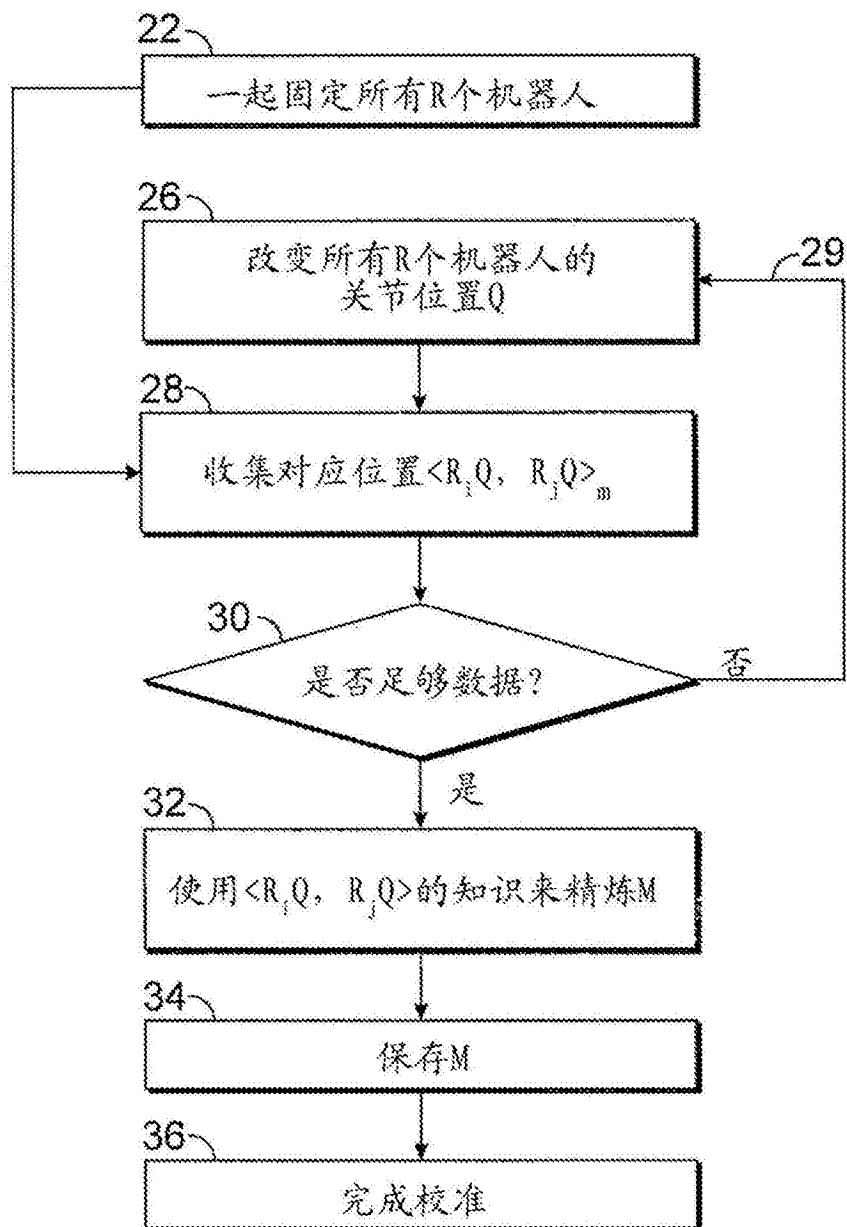


图10

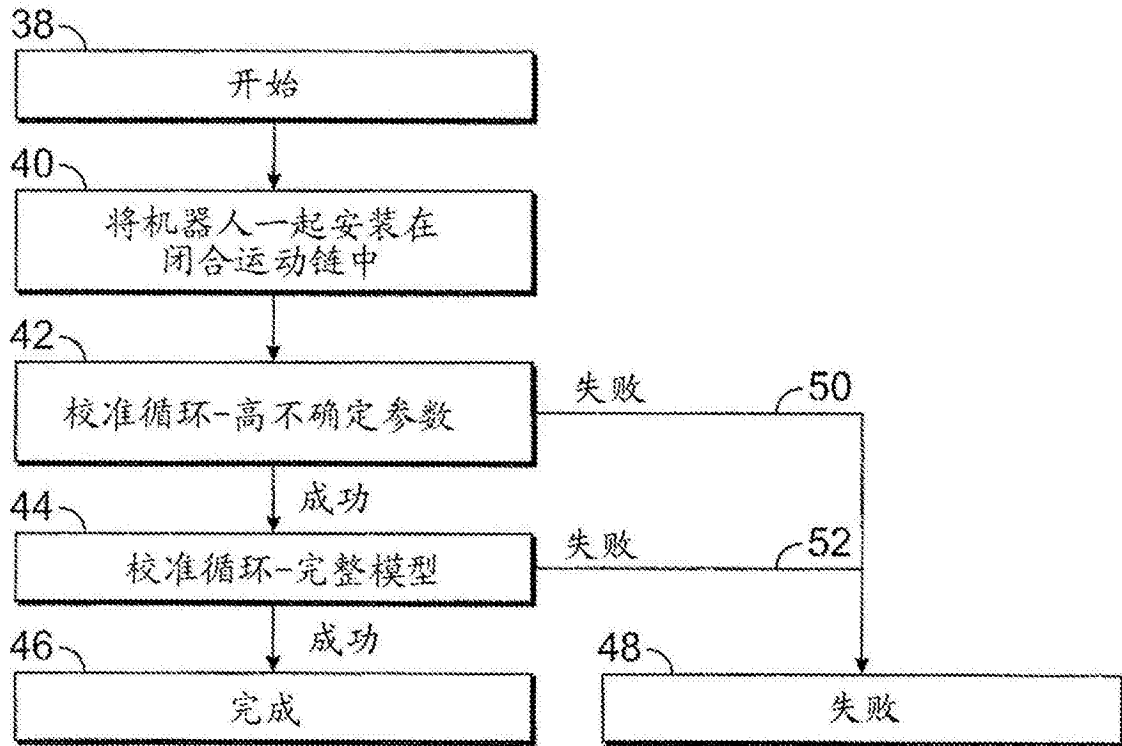
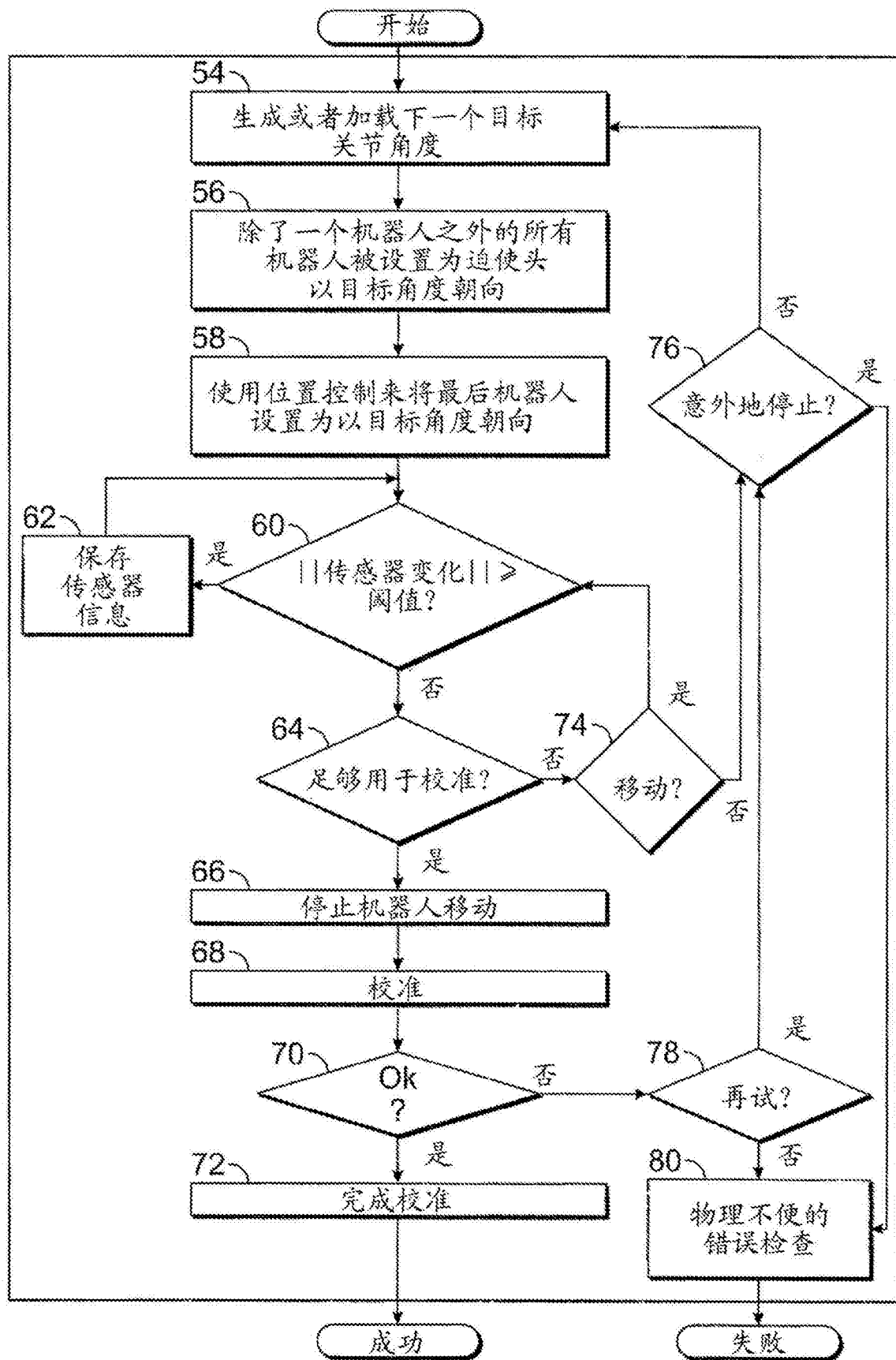


图11



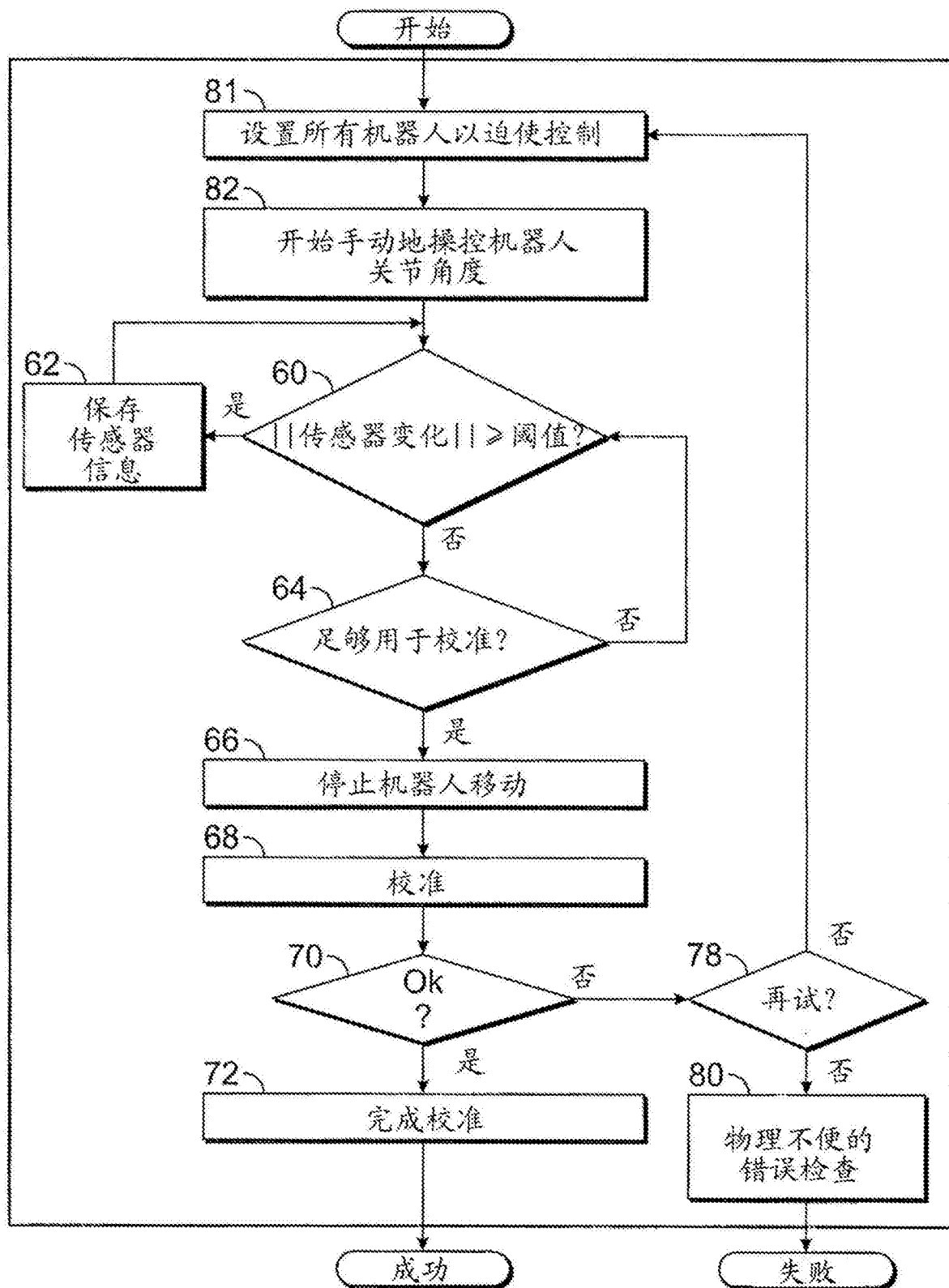


图13

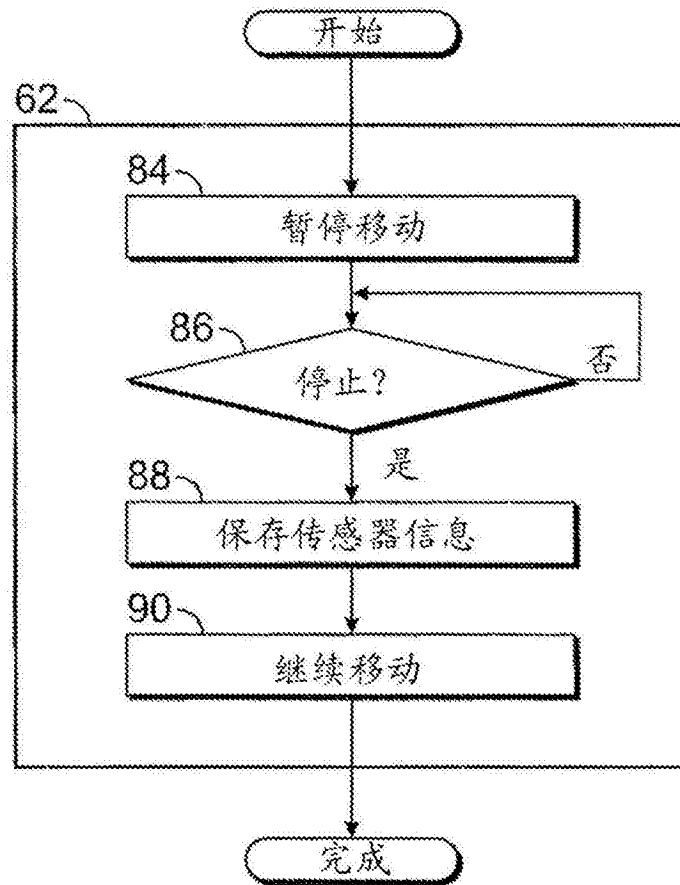


图14

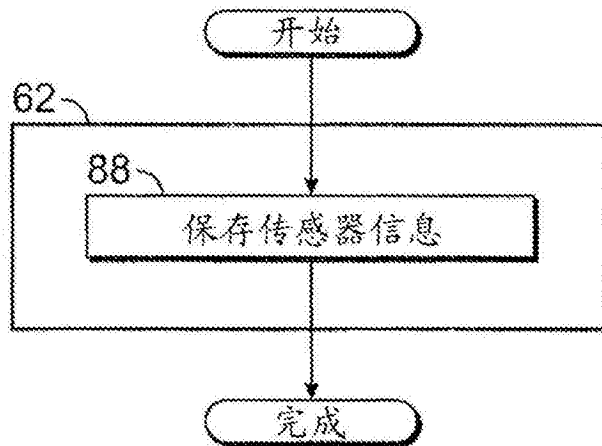


图15

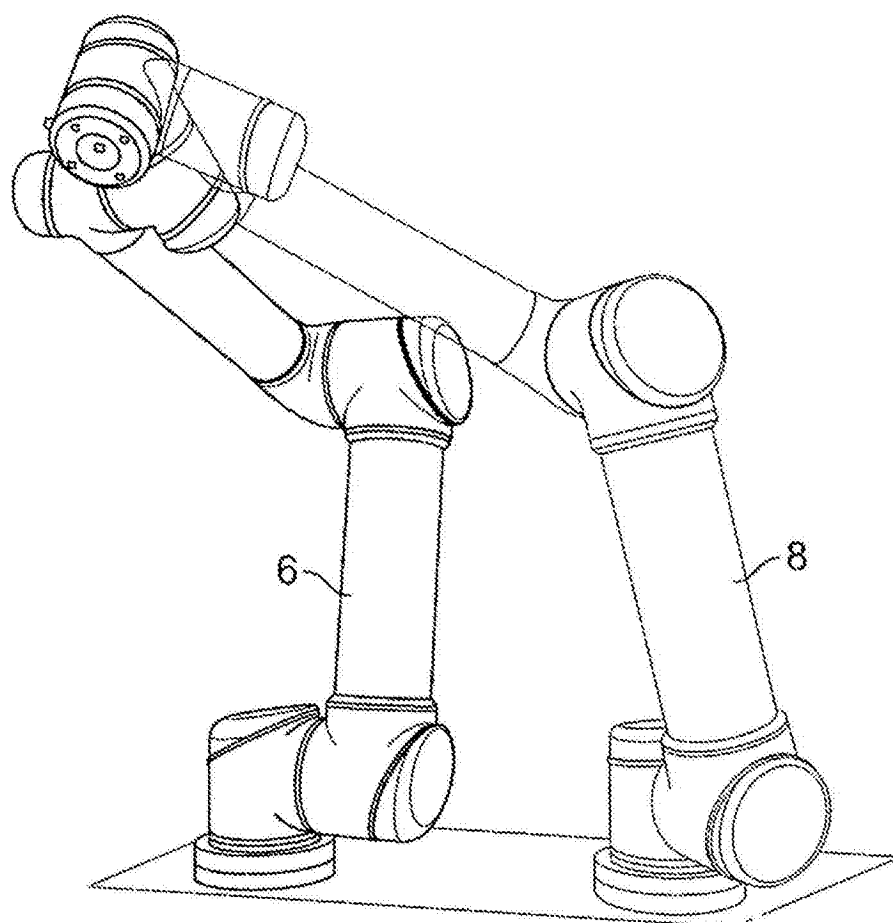


图16

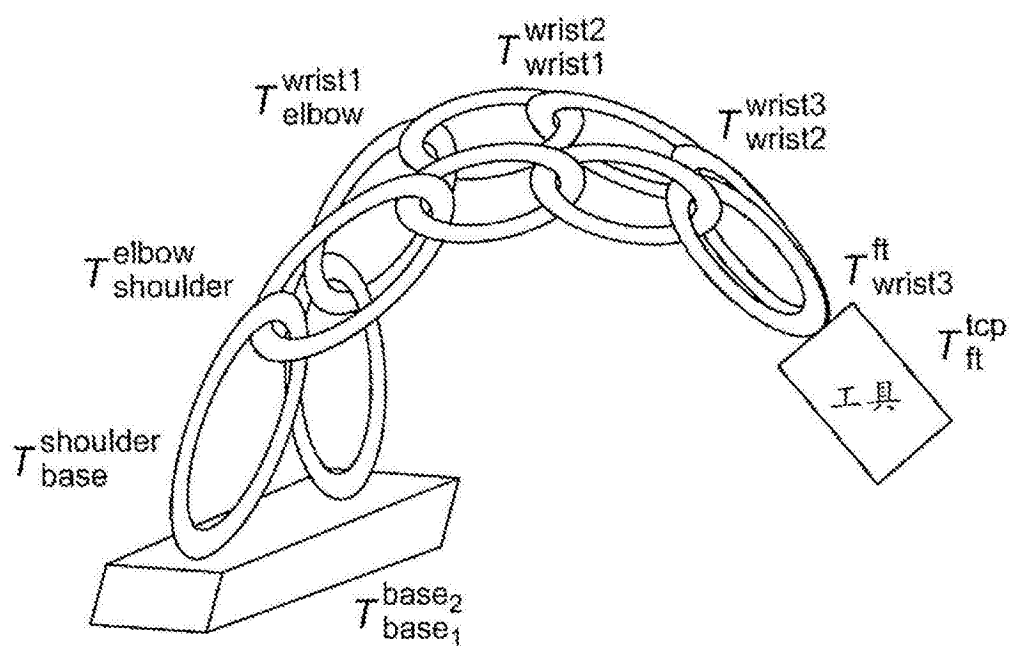


图17

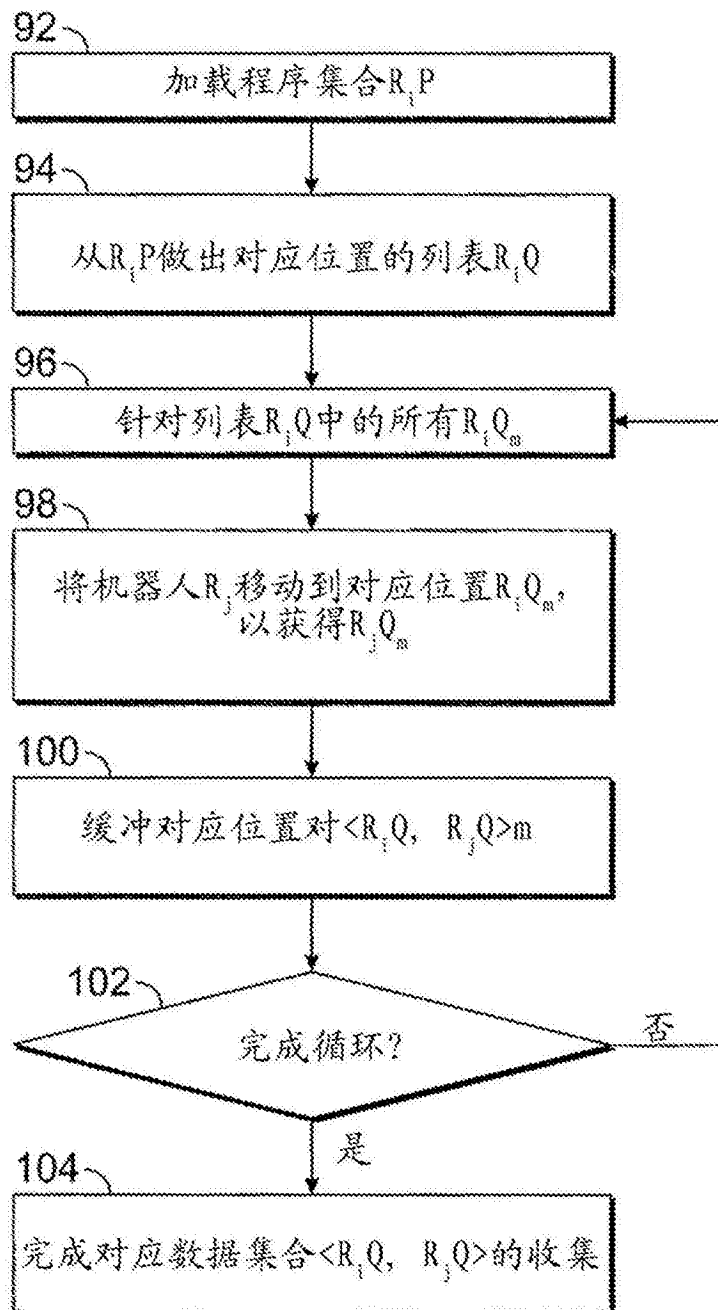


图18

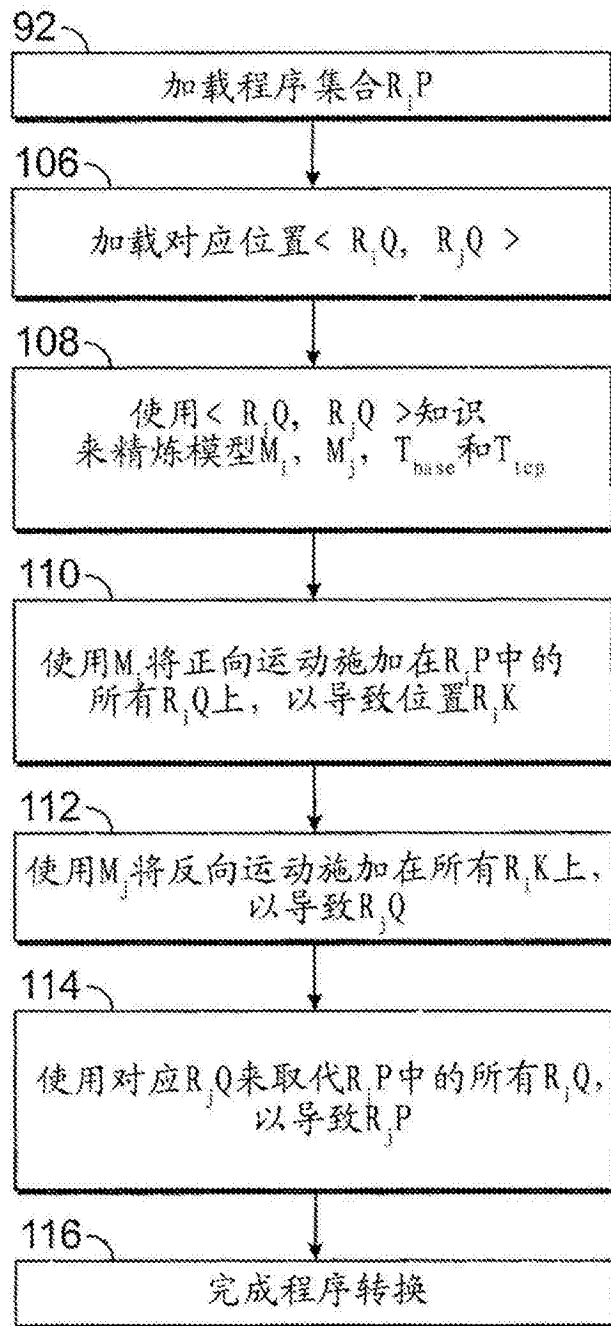


图19

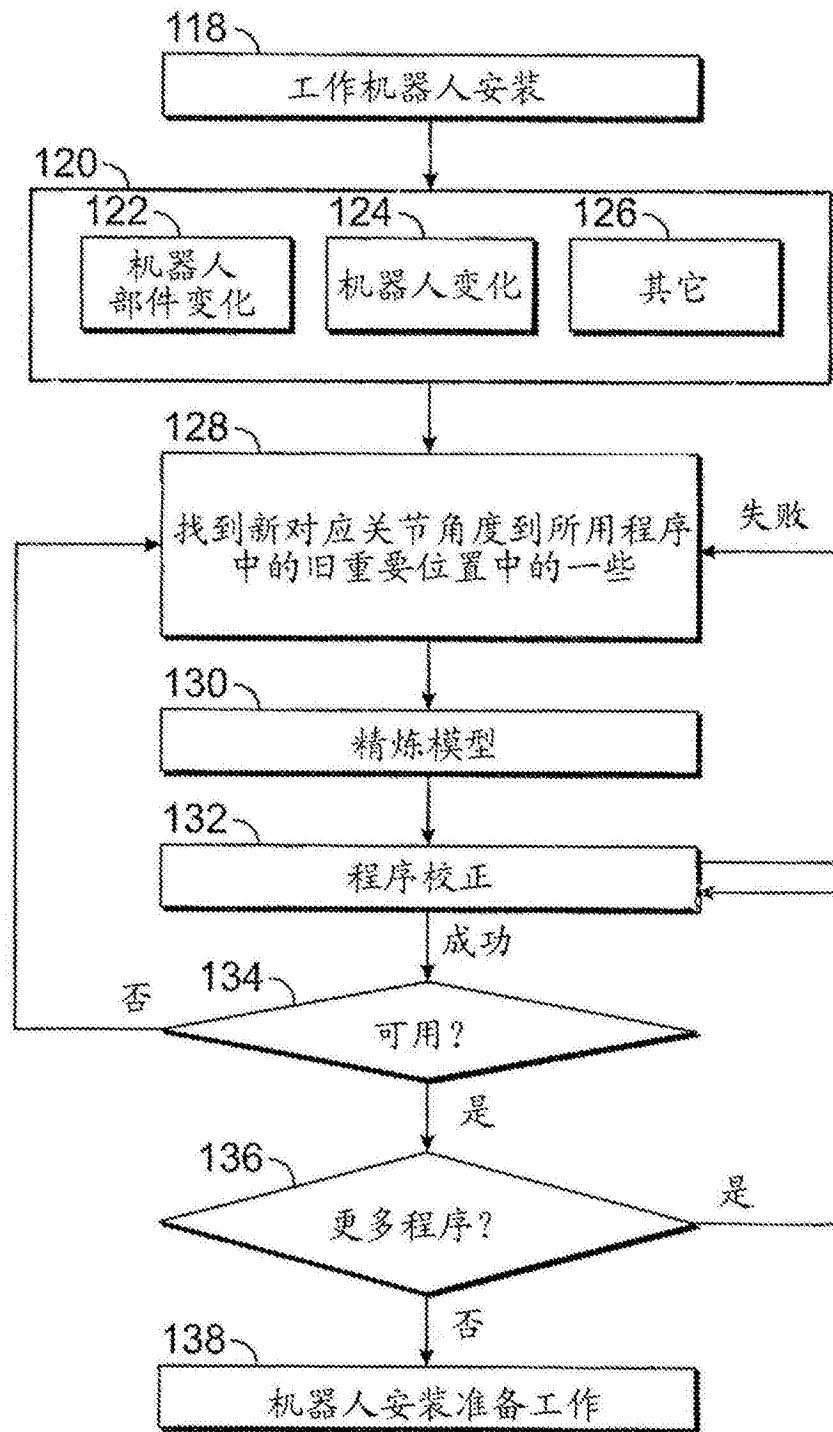


图20

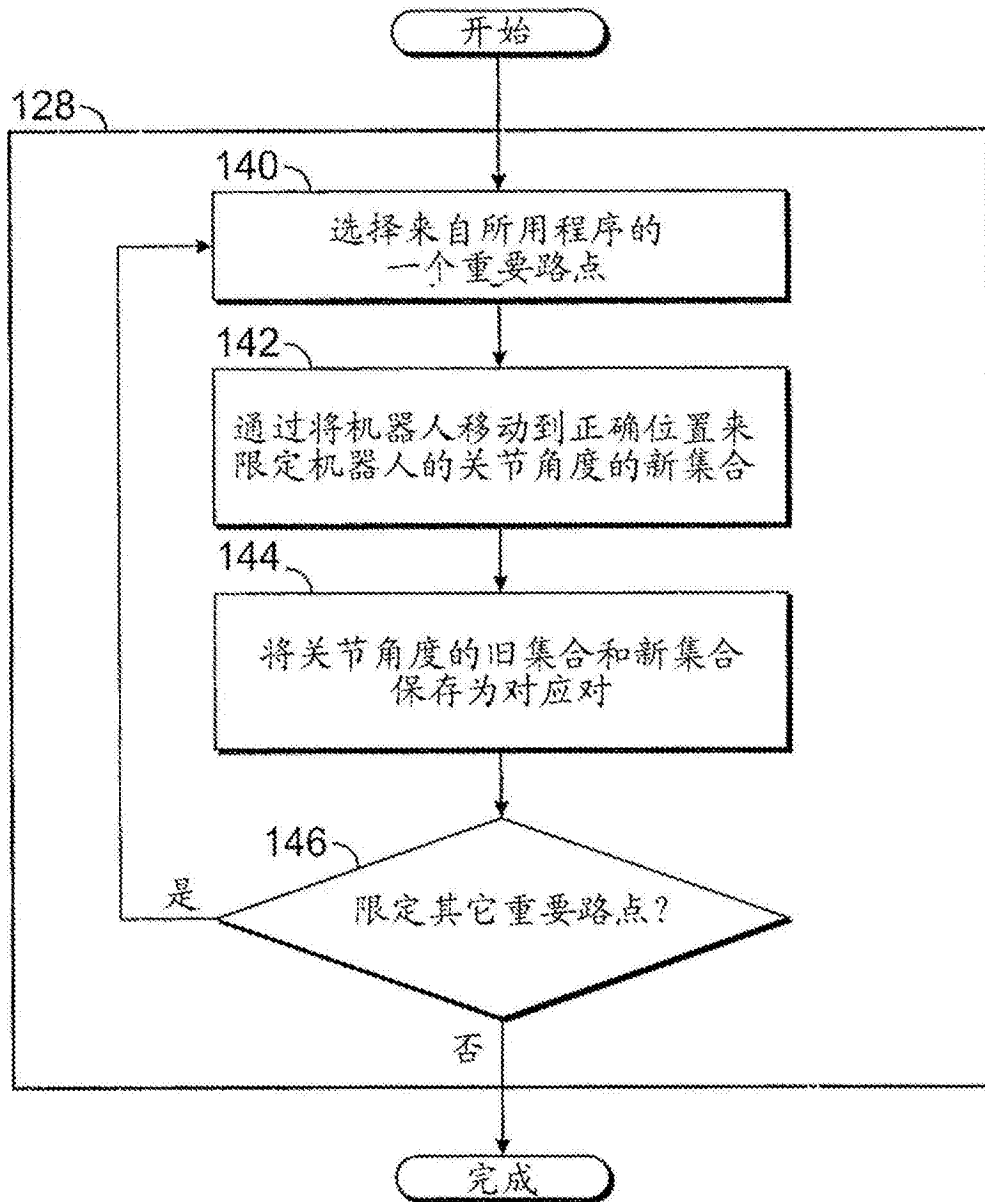


图21

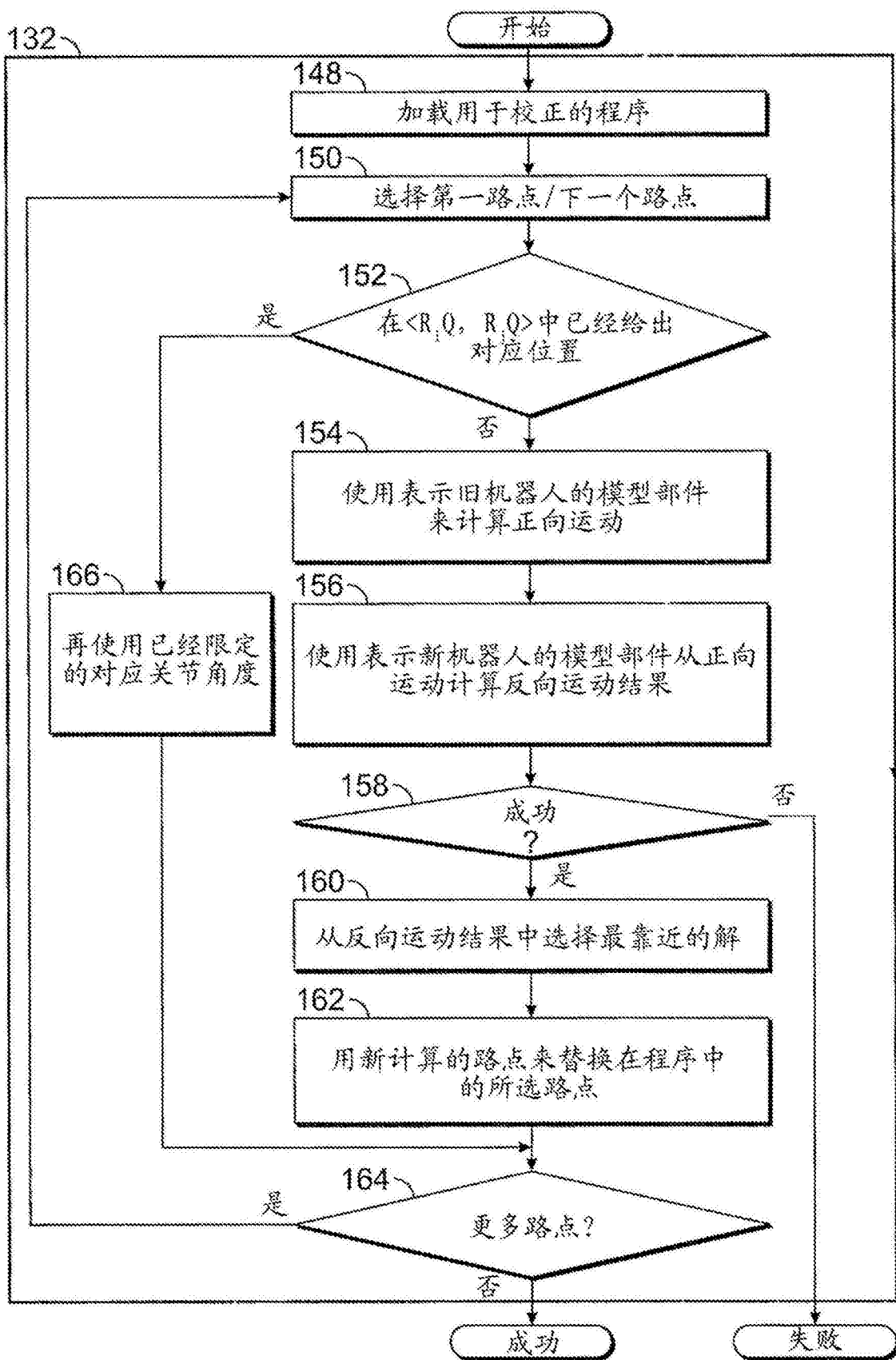


图22