



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公告本

(11)證書號數：TW I764891 B

(45)公告日：中華民國 111 (2022) 年 05 月 21 日

(21)申請案號：106110111

(22)申請日：中華民國 106 (2017) 年 03 月 27 日

(51)Int. Cl. : **B25J9/12 (2006.01)****B25J13/00 (2006.01)****G05D1/08 (2006.01)**

(30)優先權：2016/03/29

歐盟智慧財產局

EP16162695.7

(71)申請人：瑞典商寇格尼博迪克斯有限公司 (瑞典) COGNIBOTICS AB (SE)

瑞典

(72)發明人：尼爾森 卡拉斯 NILSSON, KLAS (SE)；尼爾森 亞當 NILSSON, ADAM (SE)；
史托爾特 安德列斯 STOLT, ANDREAS (SE)；索恩莫 歐洛夫 (SE)；霍爾姆史
崔德 馬丁 HOLMSTRAND, MARTIN (SE)；尼爾森 尼可拉斯 NILSSON,
NIKLAS (SE)

(74)代理人：林衍鋒

(56)參考文獻：

CN 101449229B

CN 103302667A

DE 10143753A1

JP 5938954B2

WO 2014/065744A1

WO 2015/030650A2

審查人員：陳建志

申請專利範圍項數：30 項 圖式數：10 共 94 頁

(54)名稱

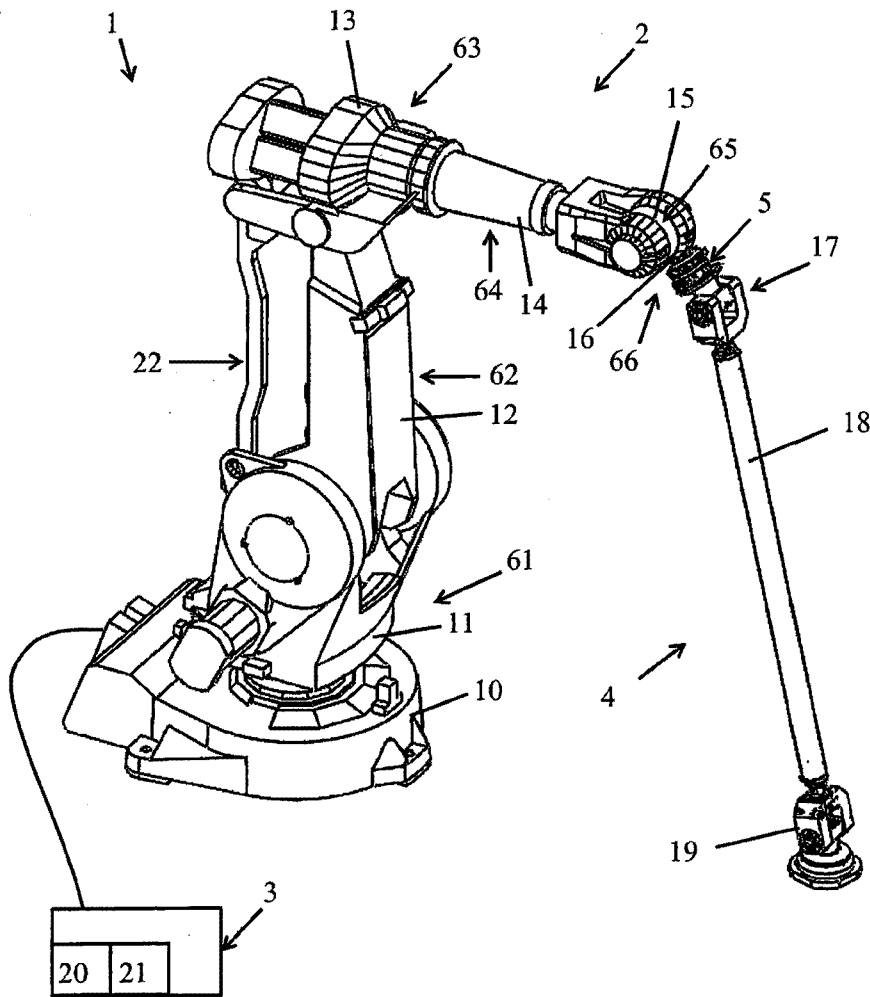
用以決定機械手幾何性質的方法、限制裝置、及系統

(57)摘要

用以決定機械手(2)幾何性質的方法及系統控制機械手(2)以執行表現出與環境、或在機械手(2)的不同連桿間的力相互作用之限制運動，以機械地形成動態鏈。鏈係可包含外圍設備和外部運動軸。限制裝置係使能有助於確定幾何性質之運動。關節統一模型與連桿順應性係有助於確定剛度參數。力相互作用係為摩擦察覺所控制，使得非幾何性質可被識別，從而使非幾何效果與幾何效果分離，以提高精度。

A method and system for determining geometric properties of a manipulator (2). The manipulator (2) is controlled to perform constrained motions exhibiting force interaction with the environment, or between different links of the manipulator (2), such that a kinematic chain is formed mechanically. The chain may include peripherals and external axes of motion. A constraining device, enables motions that facilitate the determination of geometric properties. A unified model of joint and link compliances facilitates determination of stiffness parameters. The force interaction is controlled with awareness of friction such that non-geometric properties are possible to identify, thereby enabling separation of non-geometric effects from the geometric ones, which improves accuracy.

指定代表圖：



第1圖

- 符號簡單說明：
- 1 . . . 系統
 - 2 . . . 機械手
 - 3 . . . 控制系統
 - 4 . . . 限制裝置
 - 10 . . . 基座連桿
 - 11 . . . 連桿
 - 12 . . . 連桿
 - 13 . . . 連桿
 - 14 . . . 連桿
 - 15 . . . 連桿
 - 16 . . . 連桿
 - 17 . . . 第一關節
 - 18 . . . 桿
 - 19 . . . 第二關節
 - 20 . . . 處理器
 - 21 . . . 計算機可讀存儲單元
 - 22 . . . 平行桿
 - 61 . . . 第一軸線
 - 62 . . . 第二軸線
 - 63 . . . 第三軸線
 - 64 . . . 第四軸線
 - 65 . . . 第五軸線
 - 66 . . . 第六軸線

I764891

發明摘要

※ 申請案號：106110111

※ 申請日：2017/03/27

※IPC 分類：

【發明名稱】(中文/英文)

用以決定機械手幾何性質的方法、限制裝置、及系統 / Method, constraining device and system for determining geometric properties of a manipulator

【中文】

用以決定機械手(2)幾何性質的方法及系統控制機械手(2)以執行表現出與環境、或在機械手(2)的不同連桿間的力相互作用之限制運動，以機械地形成動態鏈。鏈係可包含外圍設備和外部運動軸。限制裝置係使能有助於確定幾何性質之運動。關節統一模型與連桿順應性係有助於確定剛度參數。力相互作用係為摩擦察覺所控制，使得非幾何性質可被識別，從而使非幾何效果與幾何效果分離，以提高精度。

【英文】

A method and system for determining geometric properties of a manipulator (2). The manipulator (2) is controlled to perform constrained motions exhibiting force interaction with the environment, or between different links of the manipulator (2), such that a kinematic chain is formed mechanically. The chain may include peripherals and external axes of motion. A constraining device, enables motions that facilitate the determination of geometric properties. A unified model of joint and link compliances facilitates determination of stiffness parameters. The force interaction is controlled with awareness of friction such that non-geometric properties are possible to identify, thereby

enabling separation of non-geometric effects from the geometric ones, which improves accuracy.

【代表圖】

【本案指定代表圖】：第1圖。

【本代表圖之符號簡單說明】：

- | | |
|----|-----------|
| 1 | 系統 |
| 2 | 機械手 |
| 3 | 控制系統 |
| 4 | 限制裝置 |
| 10 | 基座連桿 |
| 11 | 連桿 |
| 12 | 連桿 |
| 13 | 連桿 |
| 14 | 連桿 |
| 15 | 連桿 |
| 16 | 連桿 |
| 17 | 第一關節 |
| 18 | 桿 |
| 19 | 第二關節 |
| 20 | 處理器 |
| 21 | 計算機可讀存儲單元 |

- 22 平行桿
- 61 第一軸線
- 62 第二軸線
- 63 第三軸線
- 64 第四軸線
- 65 第五軸線
- 66 第六軸線

【本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式】：

無。

發明專利說明書

(本說明書格式、順序，請勿任意更動)

【發明名稱】(中文/英文)

用以決定機械手幾何性質的方法、限制裝置、及系統 / Method, constraining device and system for determining geometric properties of a manipulator

【技術領域】

【0001】 本申請係涉及工業機器人之校準技術領域。本申請係涉及一種用於確定包含可呈現集中和/或分佈之彈性效應以及非線性效應，例如摩擦和齒輪箱齒隙的關節和連桿之機械手幾何性質之一種方法和一種系統，以及用於該系統和方法之一種限制裝置。本申請還包含用於確定和利用幾何性質之計算機產品。

【先前技術】

【0002】 對於在典型機器人應用中進行之自動化任務，例如製造中之工業機器人，需藉由根據編程指令之控制器將末端效應器移動至不同姿勢。末端效應器通常被稱為工具。姿勢包含位置和取向。所需或編程之刀具姿勢如同實際物理位置係可在自由空間中或與某些工件接觸，後者表示即便有相互作用力，仍需要有精確度。編程姿勢可定義為單獨到達或作為路徑的一部分，後者表示姿勢間受控運動之精度需求。

【0003】 以根據現有工具校準程序之明確定義方式，工具姿勢涉及機器人的最後連接之姿勢，因此為能簡化，我們可將以下內容限制為將工具連接到機器人之端部凸緣，或者在工具交換器用於允許編程更換工具之情況下，相當於與刀具更換凸緣，在這兩種情況下，以下係稱為機器人姿勢。

【0004】 機器人姿勢係藉由一組互連之關節和連桿機械地實現而形

成機械手，其通常設置成一臂狀，藉由每個關節之移動，將連桿端附接至下一個關節。機械關節運動通常包含由控制器控制關節馬達而驅動之關節傳動，該控制器係可控制雙臂機器人之至少一個機械手。

【0005】 從控制系統之觀點而言，機器人姿勢係為能基於測量的電機角度之一實際控制姿勢或者表示變換的伺服控制設定值之一姿勢。於此兩種情況下，由於在本申請中解釋之緣由，該姿勢係有別於實際(通常未知)之物理姿勢。軌跡產生對其而言，伺服控制係根據動態模型進行坐標變換，而使用者命令/指令之演繹通常不可能由系統使用者重新編程，因此被視為機械手控制器之系統層級。此係避免在控制系統之使用者層級，使用者輸入編程和手動命令而致使影響運動(和相關計算)。一使用者預期/編程之機器人姿勢係由機器人程序中所謂目標姿勢所表示。同樣地，手動命令如同機器人遠程控制，係為機器人系統提供此目標姿勢之簡單手段。

【0006】 為了使機器人程序員(或編程軟件)沿著直線(及機器人操作空間中之其他幾何形狀)指定運動，以使得能夠沿著沿著路徑的姿勢間之運動遵循適當之路徑，以使得能夠計算(例如獲得CAD數據)編程姿勢，並且當工件重新定位時，能夠輕鬆地更新姿勢，該控制器係包含機器人之一動態模型。該動態模型係包括關節和連桿之參數及其與機械手之幾何關係。於多數控制器中，動態模型係為一簡單模型，其基於關節和連桿係與此類型機械手之已知尺寸為理想剛性之假設。期望於特定公差範圍內取決於應用程序所產生之物理機器人姿勢良好地對應編程之機器人姿勢。

【0007】 當準確度要求很高時，此對應關係對當今的工業機器人來說，係為導致每個機器人個體偏差變化的問題。為解釋每個機器人個體之

實際幾何，所謂的動態校準係用以確定和更新動態參數。因此，主要工業品牌之機器人具有絕對精度選項，以下簡稱為AbsAcc，其實施包括於該類型機器人的控制中使用的確定參數之動態校準。實際的校準係出於複雜原因，通常於機器人交付之前，主要由機器人製造商進行。

【0008】 由於機械手不如通常於動態學中所假定般具備足夠剛性，因質量和加工力亦會產生偏差，導致於末端效應器位置之偏差。藉由使用者程序之調整來管理使用者之偏差(所謂接觸即手動調整偏差之編程姿勢)限制了機器人任務之再使用，且增加了機器人編程和調試之成本。

【0009】 例如當有效載荷於3kg與300kg之間，典型工業機械手使用AbsAcc之最終效應器精度係在三分之一至超過一毫米之範圍內。雖然無需校準之中型機械手精度可為0.5mm，而非2-3mm，然而在諸如等離子焊接，激光切割和精密組裝等許多應用中仍需更為精確之機器人。於此些應用中，若不精確度減少至五分之一則將頗有助益。對於典型之高端中型機器人而言，即表示著0.1mm之精度。

【0010】 顧及機器人之重複性通常遠低於0.1mm，有時甚至低至0.01mm，而重複性係為精度之理論和實際限制，前述將不精確度降低到五分之一之改進是有可能的。因此，需要處理剩餘之錯誤以獲得盡可能少的偏離編程姿勢之偏差。然而迄今為止，僅不太適用之昂貴且複雜的解決方案方有可能，如：

- 來自外部傳感器系統(例如激光跟踪器)之反饋表示補償任何錯誤源，唯成本高，帶寬有限。
- 更精確之力學則昂貴和/或由於重量增加僅具有有限之性能。

- 關節角度和/或轉矩之臂側檢測則昂貴且需要時不能作為增加選項，並且因連桿彎曲所致之偏差無需管理。

【0011】 由於前述問題，此些替代方案皆無法更廣泛地為產業所接受。

【0012】 為解決非剛性關節和連桿的影響，現有之AbsAcc系統一般包含關節順應性模型以考慮重力。一些先進之系統尚包含藉由與運動方向正交之關節順應性表示之連桿順應性模型，其係有益於顧及連桿端部處之軸承和軸承殼體中缺乏剛度。儘管基於此些模型和參數之控制器補償，偏差仍然存在：

1. 假設剛度為線性，而大多數傳動顯示出非線性性質，因此非線性效應被平均化(不確切地處理)，因此線性模型通常無法解釋偏差。
2. 摩擦依據傳動和機械元件以複雜之方式，根據時間變化、負荷、磨損、溫度等因素影響關節運動。然而，在控制中僅使用簡單之恆定摩擦性質(若有的話)。
3. 在使用現有之校準方法後，剛度係為固定的。亦即，因確定如此參數已經缺乏工業上適用之解決方案，而不會對每個機械手(對於不同的溫度、磨損等)校準剛度。
4. 此些模型不足以充分解釋由於連桿順應性所導致之偏差，連桿順應性係為遍布連桿幾何之順應性(及質量)影響。一般而言，除了關節自由度(DOF)外，每個連桿之此些偏差係為 5 個自由度(DOF)。
5. 現有 AbsAcc 工業產品之開發，係為具有已知有效載荷之自由空間運動提供準確度，因此不依賴於線上/內部馬達信號之反饋。未知之有效載荷與程序力量係被忽略。

【0013】基本上，任何類型之動態校準係基於，機械地或藉由作為焊接製程之激光之光學器件的其他物理手段的至少一個動態鏈之形成。通常為了校準，藉由一些用於校準之外圍設備形成一相應動態鏈，例如測量不同編程運動的實際末端效應器姿勢之激光跟踪器。然後藉由優化模型以適應具有最小殘差之測量值以獲取動態參數。由於諸如順應性和間隙之非幾何效應而導致之前開錯誤能被從各種運動中截取之過量數據'平均化'。此一平均化案例可於動態系統，測量和控制雜誌(1993) Driels, M.R. "使用被動端點運動限制校準機器人機械手"中找到。儘管意識到如此效果，且儘管物理效應模型之一般可用性，然其未考量關於偏差來源之認知，是以造成絕對精度降低。

【0014】如Moberg S.於2010年發表的"柔性機械手的建模與控制"中所述，其業已嘗試使用機械手之准靜態和動態模型開發連桿和關節之順應性模型。如文獻中第2圖所示，該文獻揭示適應關節作為具有四個連桿之彈簧質量系統Link1-Link4，三個馬達M1-M3以及不同質量和彈簧常數。然後，藉由剛度矩陣對連桿彈性進行模型建立。然而，正如Moberg所承認般，非致動關節數量及其位置之建模並不明顯。

【0015】存在幾種類型的解決方案，其處理先前提及一些類型之偏差，其中最常見的為姿勢測量和跟踪之光學系統。被稱為外部校準系統之此系統可用於末端效應器運動之線上補償，而無需偏差源之參數，或者可用於校準動態模型之參數。雖然現今之校準系統並未擷取描述因作用力引起偏轉之參數，然常見應用中之高端機器人卻較為僵硬。雖適用於生產大量機器人之大規模生產設備，前述外部校準系統之成本通常超過單一機器

人之成本。在依靠一台或幾台機器人操作之較小規模生產設備中，由於成本過高，此外部校準系統並不適用。於WO2012/076038中描述了外部校準系統之一例。

【0016】 Bennet, Hollerbach和Henri於1992年ICRA, 1992, in Nice, France 所發表文獻"雅可比矩陣直接評估之動態校準"中提出一稍微修改版本之校準系統。文獻中機器人的雅可比矩陣中之參數係藉由首先將機器人以預定之姿勢夾緊，然後致動機器人之關節予以評估。根據附接至靠近夾緊點末端連桿之外力/轉矩傳感器信息，能確定未知之動態參數。雅可比矩陣表示端點速度和關節速度間之依存關係，或相應地表示力/轉矩之依存關係。從一組如此致動獲得之數據導致一組用於計算動態參數之這般矩陣。即便進行動態校準，即使以力/力矩為基礎之方法忽略了致動器至關節之動力學，由於動態力和與工件之力相互作用而產生之偏差依然維持不變。

【0017】 由E. Able et al, Prod. Eng. Res. Devel. (258)所發表文獻"使用虛擬關節之工業機器人的笛卡爾順應性模型"一文中描述了機器人結構之建模和其參數之識別，其中假定總體彈性主要歸因於齒輪之彈性。機器人連桿與自關節至連桿之連接被認為是不靈活的。然而，為能夠測量關節順應性，於同一時間僅加載一個關節，並當測量軸(i)時，從基體連桿10至軸(i-1)之所有軸業已被夾緊一段需確定機器人任何順應性過程之時間。

【0018】 總體問題和相關方法由Khalil於"具有柔性關節和連桿機器人之靈活校準"(智能與機器人系統雜誌，第34期，第357-379頁，2002年)中揭示，然卻未提供對於機械閉合動態鏈情況，亦可包括超靜態載荷情況，如單個配置情況或當自由度小於6之機器人被夾持於環境中時之通用解決

方案。此外，關節轉矩未積極地用於獲得更準確之校準過程，且如預期般文獻中報告之精度係不足。

【0019】 獲得幾何性質之另一種方法係物理地最小化非幾何效應之影響，使得如此機械動態鏈顯示出接近於理想剛體動態之性質。這係US20130079928中所隱含之情況，其適用於具有低摩擦(無重載軸承密封和無預緊小型齒輪箱)相當僵硬之輕型機械手(無重力連桿彎曲)的特殊情況，變速箱表現出順應性能(無純粹間隙，但低轉矩下剛度降低，如諧波傳動齒輪)。然而，對於表現出更一般非幾何性質之機械手，需要克服此些假設之方法。

【0020】 因此，為藉由基於包括順應性校準模型之補償以減少偏差之目的，現有技術之局限性代表需要更準確，簡單和更便宜之方法以確定機械手之幾何形狀。

【發明內容】

【0021】 工業機器人本身具被為避免現有技術狀況限制而需要使用的設置和/或能力：

- 現代機器人控制系統係源自能先進模型控制觀點之演算和計算，其假設所涉及之模型有效參數之利用率。
- 典型機器人伺服系統之內置傳感器和控制信號係相當準確；通常精度係為可編程分辨率坐標之十倍，或校準機器人絕對精度之十倍。
- 編程運動之重複性通常比機械手之絕對精度高十倍以上。

【0022】 事實上，工業機器人系統已經使用了一些代表缺乏剛度效果之參數代表了由於校準為自測量數據進行之模型基礎優化，所以能使動態

校準更為精確。因此，需要：

- 給予適當參數的更完整之模型將解釋剩餘之偏差。
- 一種工業上適用之獲取與維護模型參數之方法，其較佳地僅使用機械手之內部傳感器。
- 基於精度模型校正名義機器人運動之方法，以及用於預測因物理/控制限制所導致之實際精度或缺乏精度之方法。

【0023】 儘管經過數十年之研究，此些需求與前述精度要求實則無法實現，而留下工業校準與準確性問題未能解決。當末端效應器對工件進行操作或接觸時，需要機械手精度，例如藉由雷射焊接連接之兩個金屬工件，代表包含機械手及一些應用裝置之動態鏈。

【0024】 前開意義在於，使用現有內部傳感器的工業應用及精確之校準方法確有非常高之需求。然而幾何和非幾何性質均需要識別。

【0025】 為能實現近可重複性之最終精度，於此基本方法係明確地確定關節和連桿之相關干擾性質，然後藉由基於模型計算以解釋此些干擾性質，且藉由馬達轉矩之主動控制以減少殘差。為表達其他模型對動態學的影響，需要比目前做法更多的自由度。

【0026】 確定剛體，如剛性連桿或機構位置狀態之獨立參數數量係被稱為自由度(DOF)。三維(歐幾里德)空間中之自由剛體具有6個自由度，3個平移與3個旋轉。一硬性或剛性之連桿係包含這樣的剛體。每一連桿動態對係藉由經常滑動之關節連接(關節可以稱為棱柱形、線性或平移關節)或接合(關節亦可稱為迴轉或旋轉關節)。此般關節限制一對連桿中一個連桿六個可能自由度中之五個自由度相對於另一個連桿，其在機械手之無奇異配置中

將一個自由度加至最終連桿(以工具安裝端部凸緣為最終)。藉由其連桿和關節之動態結構，機械臂自由度(機械手自由度)可被視為是指定動態配置所需之最小坐標數。

【0027】 因被視為機器人末端效應器之工具，或者等價地允許在無手動輔助之情況下改變末端效應器之工具交換器，係為在歐幾里德空間中移動之另一物理體。因包括末端效應器完全可移動性之最小值，6自由度機械手為最常見，對於正常之無奇異結構，需要上述關節中之6個。還有其他類型之關節，如球形和圓柱形關節，然此些可視為上述更簡單關節的組合，此些於下文中稱作關節。此係對應於機器人文獻中廣義關節坐標之建立概念。

【0028】 於彈性及非線性效應方面之順應性限制了動態校準之準確性，因為此些影響未明確地管理，反而需要模型和相關參數。於此，假設動態處理彈性效應(與僅適用於剛體動態的控制器之當前實施相反)。幾何性質之概念則涉指相應之剛體性質，其可視為描述無載荷彈性機械手之性質。然後，方法是利用確定非幾何性質之兩種互補方式：

1. 由於關節傳動之性質，機械手關節周圍之偏差已為廣知許久。近日，WO2014065744 揭示如何可不使用外部傳感，甚至自動由機器人本身藉由夾緊末端效應器至環境中獲得該性質。
2. 由於連桿順應性或非線性效應，已為如軸承中之間隙亦與各別關節運動正交之其他偏差建立模型，而可能基於力相互作用進行校準。此外，WO2015030650 中，此些模型之參數亦可藉由第 1 項中提及之夾緊技術而予以確定。

【0029】 此之部分方法係將這兩種方法與理論結合，然仍然存在幾個障礙：

- 雖然前開第 1 項大多數情況下能計算關節角度，當該方法無法得出於動態校準中所需足夠之精度時，仍有會間隙存在的情況。
- 動態校準處理剛體之幾何形狀，惟第 2 項適用於更真實之非剛性模型。現有方法可解決此些效應中之部分，惟僅能採用由外部測量系統識別之簡化彈性元件，與採用自機械開放動態鏈上重力效應和/或從外部致動而忽略馬達轉矩之力。

【0030】 根據第1項和第2項之夾緊通常限制未知位置處之所有末端效應器自由度，使得夾緊構造不適於動態，因為顯示出幾何信息之某種運動對於實施中可檢測的至少一些動態參數係為必要。另一方面，於無限制空間運動的情況下，將機械手置於有利之載荷條件下仍有所限制。中間替代方案將係因應前開第1項和第2項關節效應和連桿效應，同時尚允許某些機械限制之自由空間運動，其可為空間子空間，亦可為某些固定距離上之相對運動。然而，將需要廣泛而精確之模型，且存在摩擦(於每個關節傳動之前、之中和之後)以及其它變化或非線性性質業已避免理論上可能之精度方面進展。

【0031】 有鑑於此，本申請之目的係解決所提及現有技術之至少一些缺陷。本申請之另一個目的係提供使用現有之內部傳感器來確定機械手之幾何性質的產業適用且精確之方法。

【0032】 藉由獨立項次之方法和系統以及附屬項次之實施例，能至少部分地實現此些目的和其他目的。

【0033】 根據第一方面，本申請係關於一種用以決定一機械手至少一幾何性質的方法，其影響該機械手之末端效應器運動。該機械手設置成由一控制系統所控制，以移動該機械手之一末端效應器至目標姿勢。該機械手更包含至少兩個軸，其至少一軸具有至少一伸縮性。該方法係包含藉由一限制裝置限制該機械手的運動，以物理地限制該機械手的運動在至少一個自由度，從而實現一受限的機械手運動與對應地該至少一個軸的一受限的馬達運動。該方法更包含命令該機械手接近一組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行包括非零受限的馬達運動之該受限的機械手運動。該方法更包含執行該受限的機械手運動的摩擦感知控制一段時間，同時監測與一馬達轉矩和該至少一個軸的馬達角度相關的量。該方法更包含執行對一彈性動態模型之一組動態參數之識別，該模型包括表示該至少一伸縮性之至少一個已知量，該識別係基於該監測的量和該機械手的彈性性質；並且基於所識別的該動態模型之該組動態參數，確定該機械手之該至少一幾何性質。

【0034】 該方法提供了一種易於處理的方式來確定動態鏈之幾何性質，例如工業機器人之幾何性質，因其使用嵌入於動態鏈中之傳感器，明確地管理非幾何性質以改善高於現有技術之精度。所使用之傳感器係可為僅嵌入於動態鏈中之傳感器。

【0035】 根據一些實施例，限制該機械手的運動包含將該機械手的一連桿連接至該限制裝置。該連桿可以被稱為末端效應器，即機械手之端部，然後藉由端部凸緣直接連接至該限制裝置。該連桿可以替代地經由工具交換器或經由為此目的而增加之一些其它夾持裝置連接至限制裝置。因

此，該方法無需於應用中使用工具交換器，不限於將限制裝置附接到機械手之端部凸緣。相反地，可使用末端效應器或機械手連桿上之其他點。此外，藉由將限制裝置之連接組合到不同的連桿，並將方法之結果相結合，可實現幾何性質之驗證和故障機器元件之確定。

【0036】 根據一些實施例，該組目標姿勢包含該末端效應器複數個不同的取向和位置。藉由使用多個姿勢且每個姿勢受到限制，其限制相對每個限制裝置係為已知，利用馬達信號(可選擇性地與外部傳感器組合)，能形成一組方程式，使得所有或選定之子集獲取幾何性質。

【0037】 根據一些實施例，該至少一個軸包含至少一個摩擦效應。由於摩擦性質並非屬於幾何的，因此確定此些參數並非本發明之目的。然當確定幾何效應時，摩擦效應存在問題(識別之精度、殘差與收斂)，因此對於確定摩擦性質之已知技術和將此些效果與識別幾何性質分開係有其價值，從而提高幾何參數和補償之機械手運動精度。

【0038】 根據一些實施例，該方法包含藉由以包含該至少一個軸的間隙之往復運動控制該至少一個軸，以執行該摩擦感知控制。至於摩擦力，齒隙和無效運動都存在問題，特別是與沿著關節傳動之不同機械元件相關摩擦力之結合。包括往復運動之摩擦感知控制藉由控制每個關節以獲得可預測之摩擦效應以避免此些問題。

【0039】 根據一些實施例，該方法包含由於該受限的機械手運動之至少一個無限制方向的存在，命令該機械手接近該組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行該受限的機械手運動，以及控制該至少一個軸線，從而實現完全展開之摩擦，以執行該摩擦感知控制。因此，

摩擦效應係使得摩擦為已知且能被補償，因此不損害幾何性質之識別。一般而言，摩擦感知控制之目的在於實現明確定義之摩擦力/轉矩，其能與明確管理之效應分離。

【0040】 根據一些實施例，該方法包含由於該至少一個伸縮性影響該至少一個軸線，(A2)命令該機械手接近該組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行該受限的機械手運動，以及控制該至少一個軸線於包含對應於任何(可能非零)間隙中間之中點的一往復運動，同時忽略摩擦效應，以(A3)執行該摩擦感知控制。此忽略摩擦效應表示儘管摩擦力非零，然對幾何識別影響而言，實際上與藉由將馬達定位於靜止狀態導致關節中點位置，使摩擦不存在(為零)相同。

【0041】 根據一些實施例，該方法包含由於該至少一個伸縮性影響該至少一個軸線，命令該機械手接近該組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行該受限的機械手運動，以及控制該至少一個軸線於包含一重力載荷點的一往復運動，使得該至少一個軸線到達該重力載荷點，以執行該摩擦感知控制。再次，其目的係為實現明確之摩擦力/轉矩，然對於該實施例之益處在於，若所有機械手重力自馬達側平均地平衡，可減小限制裝置上實際上接近零施力之載荷。

【0042】 根據一些實施例，該方法包含藉由該控制系統自動執行該方法的一個或多個步驟。相對於早期現有之幾何校準方法，要求專家主動執行校準，代表機器人可在適合於使用者程序管理、適用於當前應用時自行執行校準，從而於生產過程中執行所揭示方法係欠缺穩定/可管理。

【0043】 根據一些實施例，機械手運動係指藉由一工具交換器安裝到

該機械手的一端部凸緣上之末端效應器運動，其中末端效應器性質係為先前已知，其中限制該機械手的運動係包含將該機械手對接至提供機械介面之該限制裝置，作為該工具交換器。該方法可包括分離所述末端效應器(藉由工具交換裝置和如將末端效應器放置於所謂工具支架)，之後藉由工具交換裝置對接機械手至限制裝置以限制該機械手之運動，該裝置提供機械介面作為工具交換器。然後，該工具交換器中之一部分可為限制裝置之一部分。從而，無需機械手或其末端效應器之增加或修改。從而，末端效應器之運動由端部凸緣之運動予以定義。在一些實施例中，末端效應器涉指到機械手之最終連桿或端部。最終連桿、端部或機械手係為可與環境互動的機械手之一部分。並且於此，末端效應器之運動由端部凸緣之運動予以定義。

【0044】 根據一些實施例，該至少一個幾何性質係與該機械手之一外圍設備相關，該外圍設備包含被該機械手之運動影響之至少一連桿。目前處理機械手本身之AbsAcc選項，係於製造機器人時或藉由使用便攜式設備之執行專家進行校準。然而，外圍設備的校準與所謂外軸係超出機器人提供商之支援範圍。於此，所揭示之方法係以連貫方式支援包含外圍設備。

【0045】 根據一些實施例，該限制裝置之彈性性質係為已知。是以，實現一已定義之力/轉矩依存幾何根據該方法之一般步驟係為可管理的。彈性的或幾何的、用於機械手或用於外圍設備的已知性質能設置為固定之已知值。根據前述實施例之機械手可包含未知之外圍設備。然而，對於被動外設和(非致動的，如被動的)限制裝置亦為另一種選擇：藉由利用從馬達轉矩計算出之力，可補償被動伸縮性之幾何效應而不涉及剛度校準，而減低

確定幾何性質優化問題之程度：儘管有外部伸縮性效應，此能避免次優化地或等效地減少所需夾緊姿勢之數量。

【0046】 根據一些實施例，限制該機械手的運動係包含將該機械手夾緊到至少一個夾緊點，該至少一個夾緊點之位置和/或取向係為未知。然後夾緊點位置形成一些(最多6個)附加之未知幾何參數，其可由揭示方法予以確定。此係有益於允許限制裝置的球桿變體之任意位置。

【0047】 根據一些實施例，限制該機械手的運動係包含將該機械手夾緊至複數個夾緊點，該些夾緊點之位置和/或取向係為未知，該些夾緊點間之相對變換係為已知。例如於本地可運輸之單元，如藉由重量保持於地板上之托盤，儘管該托盤位置係為未知，而夾緊點間之已知相對姿勢可用作為與前述實施例之限制裝置。

【0048】 根據一些實施例，限制該機械手的運動係包含偏移安裝在該機械手之一工具交換器，使得該工具交換器之旋轉軸線與該工具交換器連接的該機械手之連桿之該旋轉軸線不平行。換言之，該工具交換器耦合表面之前表面不與機械手之端部凸緣前端面平行。在實際常見其平行之情況下，無法確定最終軸之幾何性質馬達偏移(通常為第六個)，而係藉由夾緊至提供角度偏移之限制裝置，然後將該裝置夾緊至固定點工作區，方完成非平行旋轉軸(且可如於機器人手腕修復後，確定最終之馬達偏移)。此係能藉安排提供一在機械手端部凸緣(或機械手任何其它連桿)與工具交換器間的偏移角度之偏移件予以實現。若作為應用一部分使用之工具交換機業與端部凸緣不平行，其係一種可增加操縱性和可伸縮性但由於重新取向精度有限而現在已較少使用之設置(現在已用本發明解決)，最終的馬達偏移能直接

識別且獲得整個優化問題之更多方程式。

【0049】 根據一些實施例，該至少一個夾緊點的位置或取向之至少一個參數係為未知。關於前述三個實施例之洞察，機器人工作空間可設置成使得一些尺寸係為已知並且直接對應於一些幾何性質，而其他參數係為未知且可為識別，已知和未知物可為相同之夾緊點。例如，在通常重新定位機器人之系列生產行業中常見之情況為，可將夾緊點放置於鋼樑頂部，該鋼樑雖以剛性方式延伸至機器人之底板，但其代表扭轉圍繞梁(眾所周知在固態力學中，所謂開放型材，如I型或U型梁具有較低之扭轉剛度，然其對機器人程式設計人員/安裝人員而言往往係為未知)。扭轉剛度可包括欲辨識之兩個旋轉未知剛度參數，從而可確定幾何參數，而相同夾緊點可具有已知之其他四個幾何參數(相對於彼此，或絕對相對於在修復後重新校準情況下之機器人)。

【0050】 根據一些實施例，一個伸縮性係為至少一連桿之性質。雖然根據WO2015030650確定無外部感測器系統之連接剛度參數係為可行，但該方法與系統假定夾緊點僅以機器人幾何性質之精度所限制之精度係大致已知，其於精確定義之載荷情況中係為足夠。為能強化，該實施例將彈性和幾何模型結合至使用與非幾何(例如連接伸縮性)和幾何性質相同夾緊點組合之相關解。

【0051】 根據一些實施例，該方法包含利用馬達轉矩以確定作用於該限制軸線的至少一個連桿上之至少一等靜壓力。為能分離非幾何參數與幾何參數，為能更好地識別後者，需要根據其物理效應以計算和管理沿著機械手機械結構之力/轉矩。對於具有六個自由度或更多之非單一構造機械

手，其所揭示方法係最為明顯，且因更好地分離不同軸之性質，此非標誌性構造係為較佳。雖然夾緊(在此非標準配置中)之機械手可能會出現(對於經驗豐富的機械工程師)，然因處於超靜態載荷情況下，(摩擦感知)控制實際上表示等靜壓載荷情況。摩擦感知控制與作用關節之動態選擇均可用以改善精度。

【0052】 根據一些實施例，該些軸之至少一個連桿係被超靜態加載。儘管等壓載荷為較佳，然從應用的角度而言，超靜態載荷情況可能是最實際的。範例可為缺乏2個自由度限制裝置(為簡單起見)之4個自由度機器人(常見於和拾夾板裝載與取放應用中)，於單一構造操作之機械手(如具有銑削工具之6個自由度機器人對準帶有關節6，使其成為CNC相容的5個自由度之機器)，亦可用於校準或具有被動可鎖定自由度之特殊機器。由於管理彈性效應之基本方式，揭示之方法亦適用於此案例。

【0053】 根據一些實施例，該限制裝置係包含一球桿機構。隨後桿長度可配置成使得在達到工作空間足夠部分用於準確地識別所有之幾何參數。可於每個桿之每一端構建一個球窩關節，使得手腕可對所有手腕參數進行足夠之重新取向以為準確識別。雖然球窩關節係為被動，其可包括感測以避免不準確建模而惡化所識別參數之精度。不考慮與嚴格沿著桿方向低摩擦球桿實施載荷相關之見解，可使用球桿機構以獲得剛度參數，惟於此為簡潔起見而省略。

【0054】 根據一些實施例，該方法包含迭代步驟A2至A4，其中直到調整該至少兩個軸上之載荷，對於每次迭代A2中之該組目標姿勢係為相同或改變，使其致使低於對應於一特定機器人精度之預定水平的該識別之一

殘差。

【0055】 根據第二方面，本申請係關於依據於此揭示的該方法任何步驟所確定之該至少一個幾何性質，其係用於更新該機械手之額定動態參數。

【0056】 根據第三方面，本申請係關於依據於此揭示的該方法任何步驟所確定之該至少一個幾何性質，其係用於更新該機械手之一機器人程序或該機械手之運動控制參數。

【0057】 根據第四方面，本申請係關於一電腦程序包含當該控制系統執行該程序時，使該控制系統依據於此揭示的該方法任何步驟執行該方法之指令。

【0058】 根據第五方面，本申請係關於一電腦可讀取媒體係包含當該控制系統執行該程序時，使該控制系統依據於此揭示的該方法任何步驟執行該方法之指令。

【0059】 根據第六方面，本申請係關於一種用以決定一機械手至少一幾何性質的系統，其影響該機械手之運動。該機械手設置成由一控制系統所控制，以移動該機械手之一末端效應器至目標姿勢。該機械手包含至少兩個軸，其至少一軸具有至少一伸縮性。藉由一限制裝置限制該機械手的運動，以物理地限制該機械手的運動在至少一個自由度，從而實現一受限的機械手運動與對應地該至少一個軸的一受限的馬達運動。該控制系統係進一步設置成：

【0060】 命令該機械手接近一組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行包括非零受限的馬達運動之該受限的機械手運動；

【0061】 執行該受限的機械手運動的摩擦感知控制一段時間，同時監

測與一馬達轉矩和該至少一個軸的馬達角度相關的量；

【0062】 執行對一彈性動態模型之一組動態參數之識別，該模型包括表示該至少一伸縮性之至少一個已知量，該識別係基於該監測的量和該機械手的彈性性質，並且

【0063】 基於所識別的該動態模型之該組動態參數，確定該機械手之該至少一幾何性質。

【0064】 藉由該系統亦可實現與該方法所提及之相同積極效果。

【0065】 根據一些實施例，該限制裝置係設計成具有至少一個夾緊點，以用藉由將該機械手夾緊至該至少一個夾緊點，以限制該機械手的運動。

【0066】 根據一些實施例，該限制裝置係包含設計複數個夾緊點之一約束件，其中該些夾緊點間之相對變換係為已知。

【0067】 根據一些實施例，該限制裝置係包含具有一個夾緊點之一工具交換器。

【0068】 根據一些實施例，該工具交換器係支撐複數個對接方向。

【0069】 根據一些實施例，該限制裝置係包含安裝以偏置該工具交換器之一偏移件，使得該工具交換器之旋轉軸線與該工具交換器連接的該機械手之一連桿之該旋轉軸線不平行。

【0070】 根據一些實施例，該至少一個夾緊點之相應位置和取向係為未知。

【0071】 根據一些實施例，該限制裝置係包含一球桿機構。

【0072】 根據第七方面，本申請係關於一種限制裝置，係用於於此揭

示的一系統或一方法，其中該限制裝置包含至少一個夾緊點。

【0073】 根據一些實施例，該限制裝置係包含具有一個夾緊點之一限制件。

【0074】 根據一些實施例，該限制裝置係包含複數個夾緊點，其中該些夾緊點間之相對變換係為已知。

【0075】 根據一些實施例，該限制裝置係包含至少兩個夾緊點，其一夾緊點位在一第一平面，另一夾緊點位在一第二平面，其中該第一平面和該第二平面係不平行。從而最終軸(包括端部凸緣)之運動可導致腕軸之重新取向，使得腕之幾何形狀能自馬達端識別，同時仍適合於工具附件(使用者應用程序內)。在更換夾緊點時，其他軸度以外之其他軸線通常皆處於其他位置，惟通常不足以能夠精確識別此些軸之幾何形狀。

【0076】 根據一些實施例，該限制裝置係包含至少兩個夾緊點，該至少兩個夾緊點係分開與該機械手的手腕連桿之至少一半長度相對應之一距離。從而，亦可識別最終軸之幾何性質。此外，手腕性質之識別係為完好的。

【0077】 根據一些實施例，該限制裝置係包含設計有兩相對之非平行附接邊之一角度偏移件。

【0078】 根據一些實施例，該限制裝置係包含具有兩延長附接邊之一延長偏移件。

【0079】 根據一些實施例，該限制裝置係包含具有一個夾緊點之一工具交換器，其中該工具交換器係支撐複數個對接方向。

【0080】 根據一些實施例，該工具交換器係包含一工具更換器和一與

其配合之一工具連接器。

【0081】 根據一些實施例，該限制裝置係設置成自動地安裝於該機械手和該機械手工作空間中的固定點之間。例如，限制裝置可由工具交換器鎖定機構氣動地附接，並由機器人控制器加以控制。

【0082】 藉由該方法及系統，非線性非幾何性質，亦即參數和表示性質之模型係處非可逆之情況，如藉由適配之機械手運動避免其影響所管理之齒輪箱和關節摩擦。否則，為了平滑之非線性順應性，反轉非線性非幾何性質之影響，使得可根據馬達信號計算作用於線性順應性連桿上之臂側關節角度與轉矩。然而，在動態結構中可能存在已確定幾何性質之內力，使得描述幾何性質之參數不描述藉順應性連桿從一個關節至下一個關節之變換。

【0083】 非幾何性質之物理效應可暫時固定，如在恒定力下產生固定之變形，導致幾何性質瞬間不同，但藉由將非幾何性質(即每一連杆之部件剛度矩陣)與幾何性質(如兩軸間之角度)相關聯之連續關節旋轉可確定該真實(無載荷)幾何性質。幾何性質可為線性，在此情況下剛性參數於局部坐標係為恆定，而為所謂組件剛度矩陣之一部分。該方法提供了確定連桿與關節順應性(如下文中方程式14和15所獲得)新穎之平均方式，允許啟用自主校準之單組實驗和計算。於此之實驗係對應於單一目標姿勢。因此單組實驗係對應於單一組獨特之目標姿勢。自主校準表示藉由控制器或控制系統手段之校準機器人自身。

【0084】 於非線性且非幾何性質的情況下，該方法包括兩個備選方案。於第一個替代方案中，方程式(方程式14和15)藉使用函數(方程式10)而

非線性情況之剛度常數來擴展，從而擴展了方法自主性以管理非線性之情況。第二種方案係藉由調整從監測馬達信號獲得之資料，使得每一載荷情況對應於線性情況，於單獨步驟中手動或自動地管理非線性之效應。分析未建模效應時，該第二備選方案將有所助益。為了簡潔，下述主要表現於線性順應性方面。

【0085】 總言之，本發明係建立於結合：

- 廣泛且創新地使用容易獲得之內部控制器信號，特別是馬達轉矩。
- 適合之模型和形式能實現小彈性偏差和動態結構之精確建模，從而支援參數識別。
- 以機械可行方式限制運動之原則，使得該方法可應用於標準(非先驗儀器化)之機器人。
- 一種指揮和控制策略而非從現有耗時方法之平均，避免已知、未知數影響：靜態摩擦對非零力之影響以及任意放置夾緊點之位置。

【0086】 用於控制器配置之設備與軟體設置，使得處理校準能自動化且集成於應用中，甚至在使用者層級之系統和程式設計。

【圖式簡單說明】

【0087】

第1圖係顯示根據本申請一實施例用於確定機械手之幾何性質的系統。

第2圖係為第1圖之部分放大圖，包含一機械手腕部，一設想工具交換器與一由萬向關節實現具有球窩關節之球桿。

第3-6圖係顯示一限制裝置之不同實施例。

第7圖係顯示第1圖中機械手之動態鏈，對應在一定結構中剛性體之例

子且顯示關節和連桿。

第8圖係蓋括該方法之相關步驟，可為迭代地作為一個整體，其中步驟A2和A3可包括迭代和複數個姿勢。

第9a-9c圖係顯示混合關節和連桿之力和變形的最小形式，從一維(1D)至二維(2D)，使得因複雜度而由方程式所描述之三維(3D)例子能更容易理解及為技術人員應用。

第10圖係顯示從物理夾緊實驗獲得之馬達監測信號，利用如第1圖所示之機器人且為方程式15提供數據。

【實施方式】

定義

【0088】 **機器人**：一機械手和控制器之組合，其係配置為控制機械手之一個或多個軸之移動。

【0089】 **機械手**：一機械手臂，包含形成一個或幾個動態鏈之一個或多個軸。

【0090】 **軸(複數：軸)**：一關節和一連桿，包含用於致動和任何傳動系統之馬達。該馬達可為伺服馬達，遵循來自控制之的設定點。

【0091】 **連結**：以關節相連之一個或幾個連桿。

【0092】 **剛度**：物體的剛性，被定義為 $k = \frac{F}{\delta}$ 具有一個自由度之彈性物體，其中 F 係施加於物體之力， δ 係沿同一自由度之力產生的位移，或者 $k = \frac{M}{\theta}$ 定義旋轉剛度，其中 M 係為應用力矩或力矩，並且 θ 係由施加力矩產生之旋

轉位移，或 $k = \frac{M}{\delta}$ 描述轉矩如何產生平移，或 $k = \frac{F}{\theta}$ 描述力如何產生旋轉位移。

【0093】 **順應性**：純彈性效應情況下剛度之倒數。局部地用於機械手之一個軸線，如可藉連桿之伸縮性來形成順應性，因與尺寸(如通常於固態力學中之一般假設)相比變形較小，通常可將其假設為線性。關節之順從性亦可為線性，從而形成軸之伸縮性。其亦可為非線性，其可於預期運動或正交之方向上認定為間隙或無效運動。對於總體上之機械手，即便僅涉及彈性效應，動態構型與關節傳動性質通常亦導致非線性之順應性。

【0094】 **順應性連桿**：非剛性連桿。順應性連桿的品質分佈在其連接的兩個關節之間，因此由於分佈品質之物理學，正式具有無限自由度和無限串聯諧振模式。對於目前之揭示情況，僅有最低共振頻率係為相關(以自由運動測量並用作性能限制，而非該方法之核心部分)。相應地，連桿本身之慣性可以集中質量之重心近似。此外，夾緊配置中確定之彈性動力學模型係為足以補償因過程力引起偏差之相應准靜態模型。藉此簡化，一個順應性連桿係視其具有六個額外之自由度，其指定連桿之結束(動態鏈中下一個關節之姿勢)相對於該連桿之開頭(前一關節之姿勢)。

【0095】 **部件剛度矩陣**：用於模擬部件變形之矩陣，如由於關節力和/或轉矩引起之連桿變形。剛度矩陣通常作一個線性映射，其假定相較於連桿大小和動態鏈，該連桿撓度小。非線性剛度可藉由與載荷變化元件予以實現。連桿變形可於連桿本地坐標系統中定義，之後轉換至全球坐標系統。

【0096】 **機械手剛度矩陣**：元件剛度矩陣可為恒定，然機械手剛度係隨由關節座標(具有機械手自由度元件)定義之結構而變化。於此，即便大傳

動輪系影響對平移具有相當小的影響，馬達與連桿轉平移之差異實際上可被省略。亦即，除了單個姿勢之外，電機角度給出足夠好之關節角度。對於每一單個配置，連結剛度矩陣可放在一起，從而形成更大之機械手剛度矩陣(MSM)。所述MSM亦稱為整體剛度矩陣，其亦可潛在地包括一個或多個外圍設備。

【0097】 **正交關節順應性**: 連結在任何方向上之順應性，與表示關節運動之關節自由座標描述之運動正交。正交關節遵守線性部分可併入組件剛度矩陣，而非線性的部分，如軸承間隙需要分開處理。

【0098】 **幾何性質**: 連桿形狀於其未加載狀態之性質，以及其作為藉由關節運動描述軸間之關係，係為幾何性質。此外，馬達和關節連桿側之間的理想傳動比係為一幾何性質。機械手幾何性質係為一套完整的，包括安裝於環境之所有關節幾何性質及機械手連桿。此些性質包括連結長度，旋轉軸間之角度，齒輪比，馬達偏移及關節和馬達之歸位位置。機械手之至少一個幾何性質可與機械手之軸，連桿，關節，變速器或馬達中之任何一個有關。

【0099】 **非幾何性質**: 不屬於幾何之性質，反映物理效應，如由於力引起之變形，關節傳動中之摩擦，以及由於齒輪箱運動或非線性順應性而引起之運動。雖然幾何性質(或者表現出此些性質系統或元件之狀態，由運動之廣義座標表示)在載荷變化(來自馬達之力和轉矩，重力，運動動力學和外部所謂過程力)，非幾何性質定義系統由於作用於其上之力而改變之狀態。

【0100】 **等靜壓**: 動態系統之性質，通常被視為靜定，當系統如一動態鏈處於靜態平衡，無關非幾何性質，內力和反作用力係唯一地限定。

【0101】 *超靜態*：通常稱為靜態不確定運動系統之性質，該系統通常包括至少一個機械閉合之動態鏈，其中內力取決於非幾何性質。

【0102】 *彈性動態*：動態係運動之描述，而忽略質量與力，機器人控制器中使用之運動學僅限於連接剛體/連桿之運動，亦為科學界之主導。亦即，可使用幾何性質來調整程式設計之機器人姿勢，但在產生伺服設定點時僅使用幾何性質，如使末端效應器沿著直線移動。於下文中，動態實際上係為擴展至順應性連桿，利用非幾何參數之一個子集。

【0103】 於下文中，將說明用於確定幾何性質之方法。為便於理解本方法，首先描述用於實現該方法提出之系統：

系統

【0104】 參照圖式予以說明於第1圖顯示根據一個實施例之系統1。於此，系統1包含一機械手2由具有六個旋轉關節（即下文所稱第一至第六關節）和六個可動連桿之機器人表示。動態結構係如第7圖所示，具有使得每一關節（即，旋轉中心線）與第1圖平面正交之構造。在第7圖的平面中（第7圖之平面劃分為表示第二關節，第三關節和第五關節之圓圈，分別編號為32、33和35）或在機械手2的平面中旋轉，（機械手2的平面係定義分別編號為31、34和36之第一關節，第四關節和第六關節之雙重三角形）。如此六關節之機械手2亦被視為六自由度機械手，表示如大多應用所需，其以無奇異構型（於其工作空間內）可將附接至工具安裝凸緣之末端效應器定位於六個自由度中。通常如下述，機械手2可包括任何數量之關節，即一個或多個關節，以及以數位或並行方式連接至一個或多個關節任何數量之連桿，並且本發明中數量未有特殊限定。

【0105】 每個關節係配置由如馬達(未示出)致動器直接或間接經由變速器(未示出)致動，使得馬達轉動轉換成低速運動。為簡單起見，未顯示致動器/馬達和傳動系統各軸之部分，但該方法將引用藉由傳輸對末端效應器運動影響之方程式。

【0106】 機械手2編號為11-16之每一連桿分別與由機械手2形成之動態鏈中之下一關節連接。第一關節前之基座連桿10係將第一關節連接至地板或地面。動態鏈中最後一根連桿，即連桿16，係以工具安裝凸緣(或端部凸緣)為結束。工具交換器5可安裝於工具安裝凸緣上，各種工具或末端效應器可在其工具側附接至工具交換器5。設置一定關節角度之機械手2動態鏈亦可視為機械手2之動態構造。

【0107】 每個連桿或連接與連接至其上關節和傳動系統設置以驅動關節形成軸線。因此，第一關節31和連桿11係為第一軸線61之一部分，第二關節32和連桿12係為第二軸線62之一部分，第三關節33和連桿13係為第三軸線63之部分，第四關節34和連桿14係為第四軸線64之部分，第五關節35和連桿15係為第五軸線65之部分，第六關節36和連桿16係為第六軸線66之一部分。

【0108】 系統1還包含一控制系統3，其包括一工業機器人1之控制器。控制系統3包含一處理器20與一計算機可讀存儲單元21。控制系統3係配置以控制機械手，即機械手之關節至不同之目標姿勢。

【0109】 系統1還包括一限制裝置4，其為一雙球桿機構，其藉由機械手2可選擇性地藉由工具交換器5與地面/地板閉合其連接而形成之動態鏈。於此，限制裝置4之雙球桿機構包括連接至機械手2之第一球窩關節17、一

個桿18與連接至地面/地板之第二球窩關節19。桿18以一端部附接至第一關節17以及以另一端附接至第二球窩關節19。因此，第一球窩關節17與第二球窩關節19以桿18相互連接。為允許大角度之球窩關節17和19，其最好由組合之旋轉關節構建。於下文中，第一球窩關節17可以十字接頭（Cardanic Joint）加以實施，其如下陳述具有2個自由度，第二球窩關節19可以水平自由接頭（Gimbal Joint）加以實施，其亦如下陳述具有3個自由度。

【0110】 第2圖係第1圖之部分放大圖，其包括連桿14，用以做為機械手腕、工具交換器5、和限制裝置4中所具有由十字接頭實現之第一球窩關節17之雙球桿機構。由十字接頭實現之第一球窩關節17包括一個連接連桿51、與連接連桿51一體之十字軸52、可轉動地保持十字軸52之鉸鏈53以及將此球窩關節之十字接頭連接至所述桿18之連接器54。工具交換器5係裝配於其工具側與由十字接頭實現之第一球窩關節17之配合部分，與此係為連接連桿51。

【0111】 限制裝置4的雙球桿機構可連接至任何可移動連桿(於此為標號11-16，或在任何可能之機械手的任何位置)，使得所形成動態鏈中之連桿包括識別參數之連桿，無論在應用程序中使用之完整鏈，或者在未建模之設備性質中需進一步分析之鏈的一部分。因識別包含於鏈且未知/不確定之參數動態，限制裝置4的雙球桿機構可具有不同之實施方案，僅要滿足下列要求：

【0112】 機械手運動(進行校準之其部分，或機械手連同與一個或幾個外圍設備之部分)被物理地限制著(為力/轉矩交互作用)。一般來說，可以使用雙球桿機構做為限制裝置4。

【0113】 根據限制裝置4之限制，於機械手2工作空間之某些非空子空間中係允許涉及/展示要確定幾何性質之運動。允許之運動被視為限制運動，依據所參考分析和使用之階段，可視為剛性或順應性連桿和關節之結果。

【0114】 如在第1圖所示6個自由度機械手2之標準情況下，限制裝置4與工具凸緣連接(藉由可選之工具交換器5)，實際解決方案係使限制裝置4僅限制1個自由度，從而允許連接至任何類型的連桿之任何部分為單一自由度。限制一個自由度代表允許五自由度，此又代表在這種情況下，正常限制裝置4應該具有五個關節。在限制運動期間可使用較少關節，然假定6個自由度機械手上之超靜態載荷須處理(本發明亦允許包括方程式14，但為清楚於簡潔而於此省略)。

【0115】 對於具有自由度大於6之機械手，如冗餘機械手與雙臂機械手，限制裝置4可被簡化，通常降至一單一連桿。此單一連桿可被視為第一球窩關節17之第一部分，其連接至工具交換器5或最後一根連桿16，然具有最終之關節36與連接連桿51間之偏移(於位置和/或取向中，即第2圖中不具有共同中心線之最後連桿16與連接連桿51)。藉由此偏移(未示出)，可賦予連接連桿51精確之尺寸，使得所確定幾何形狀之縮放具備良好定義，若需確定最終之關節36上之偏移，其於標準6個自由度之情況下亦有用。

【0116】 相應地，以較佳地確定標示為31(第7圖)的第一關節之幾何偏移，第二球窩關節19可放置並固定於作為操縱桿10的連桿"0"之公知位置處。(或者，可設第一關節之幾何偏移置為任意值，然後利用單獨1個自由度之校準，使用本發明或藉由任何其它校準方法予以確定。)

【0117】 限制裝置4之較佳實施例中係以五個被動關節在機械手2(或如前所述其一部分或附接至其之一個或多個週邊設備)與圖示中地板之間形成雙球桿連結，其代表第一球窩關節17和第二球窩關節19允許之球形運動具有兩個中心點。該兩球窩關節17、19中之任一個可(原則上為該方法)允許球形運動所有之3個自由度，但將為桿18留下零空間運動之1個自由度。若限制裝置4之幾何形狀係為完全已知且桿18之中心線精確地穿過第一球窩關節17和第二球窩關節19之中心點，則不會有問題。然而作為亦允許限制裝置4與其位置自動識別更的實際之解決方案，係使第一球窩關節17與第二球窩關節19中之一提供僅2個自由度(且因此其他之3個自由度)。因重量之實際原因，將3個自由度的部分放在機械手2之地板/地面/腳，因此於工具交換器5安裝2個自由度的部分。應當理解，下述方法亦適用於相反案例。根據一個實施例，第二球窩關節19可為一水平自由接頭19。第二球窩關節19的水平自由接頭包括一旋轉接頭，例如以交叉軸連接之兩個鉸鏈(未清楚地可見)。

【0118】 連接器54(參見圖2)固定所述桿18之鉸鏈53，而桿18與第二球窩關節19之水平自由接頭相應之連接係藉由第二球窩關節19之水平自由接頭的旋轉接頭而實現，較佳地以所述桿18之中心線交叉於第二球窩關節19之水平自由接頭的中心點。於下文中為描述之簡單起見，假設桿18之中心線交叉於第一球窩關節17之十字接頭的中心點。

【0119】 用於標準機械手系統1之較佳實施例表示第一球窩關節17之十字接頭的中心點係被限制在由限制裝置形成之球面上移動。以下假設限制裝置4與機械手2相比係為剛性，但可將任何外部順應性機構涵蓋於校準

中，亦可根據本發明確定限制裝置4之性質。

【0120】 外部機構可包括效應器，其係因轉矩信息之可用性而更簡單之情況，然於此假設其為被動機構。此些外部機構關節係可配備位置(角度)感測，其可用於降低系統1未建模性能之靈敏度。或者如限制裝置4中那五個可不感測之外部關節，可根據本方法進行更多實驗，以獲得用於基於成本函數(如下述方程式17)具有低殘留之解決方案。因此，機械手2被限制移動，使得第一球窩關節17之十字接頭的中心點(即第2圖中十字軸52之的中心)位於球形表面。其清楚地允許關節位置和機械手腕取向之變化，使得機械手2之幾何性質影響所形成動態鏈中關節之運動。

【0121】 儘管於此並未進一步處理，下列方法之其他意涵均應提出。

- 根據限制裝置 4 關節之機械手性質和最大角度，甚至可以控制機械手關節轉矩，使得在桿 18 方向上產生之(拉動或推動)力足夠激勵以確定非幾何性質。
- 於平行動態機械手之情況下，該系統 1 可藉由增加每個動態鏈之性質(增加至方程式 9)，以簡單方式延伸。對於第 1 圖所示的機械手，平行桿 22 係以此方式管理。

【0122】 對於任何限制裝置4之上述實施例，實際上每個關節均會有一些摩擦。然而，因限制裝置4之關節通常係為被動的(無傳輸，無致動器)，因此摩擦可藉由適當之機械設計形成。於顯著外部摩擦之情況下，其可以分別測量並以簡單方式補償，除非該關節運動是如此之慢，以致發展出靜摩擦，其應為自識別排除之情況(藉由相應數據之遺漏)。由於限制運動可在相當大之允許子空間內自由選擇，且詳細建模導致僅需相當小之數據集進

行識別，省略數據(或首先避免此些姿勢)並非問題。

【0123】 相對於限制裝置外部被動關節之邊際摩擦，機械手關節之摩擦通常甚為顯著。於機械手正常控制之應用中，藉由前饋和反饋解決方案之各種組合於控制器內管理摩擦效應，因此以機械手3之默認方式以標準(不變)方式控制之關節不會產生問題。並且採用標準控制，可監控馬達轉矩和馬達角度。

【0124】 摩擦效果可為靜態的、動態的、或兩者皆有。靜態效應包括由於缺乏剛度、由於關節傳動後之摩擦，是以機械手無法良好地達到其目標姿勢。於此情況下，由於控制器之積分動作，馬達穩定於所編程之位置。動態摩擦效應包括未落至編程位置之馬達控制，通常係因庫倫摩擦、靜摩擦、馬達轉矩脈動及馬達角度感測之量化組合。由於從頻率角度觀察到機械手之低通性質，此有限之馬達振動可能在末端效應器上幾乎不可見，但為避免機械手結構內之摩擦效應，通常需要額外小心，如禁用積分動作並降低反饋增益。另一種動態摩擦效應係運動開始和停止時之瞬變。於此情況下，摩擦效應變得難以建模/預測，因此難以自幾何識別排除。摩擦效應一般非常依賴於硬件之細節，因此很難進一步一般化。於，此摩擦感知控制涉指根據現有機械手性質之調整控制，可將所述摩擦實際排除於幾何參數識別外。

【0125】 然而，於本發明彈性存在下獲得幾何參數之限制運動中，由於馬達機轉矩和詳細模型廣泛地用於提高精度，避免摩擦影響甚為重要。對於限制裝置之外部被動關節，可藉選擇和省略某些運動以避免靜摩擦，並於正常運動補償期間之摩擦係基於提出之模型和識別而直接。

【0126】 前開具球桿機構之設置包括獲得明確之摩擦力/轉矩，從而獲得可預測之效果，其代表來自監視運動之保留數據反映以已知之力/轉矩完全展開摩擦之情況。因此，摩擦效應包括庫侖與粘性效應但無靜摩擦，因此摩擦係為未知(無額外之昂貴轉矩感測)。因此，使用球桿機構執行該方法被認為是實現良好限定摩擦力/轉矩之第一替代方案。

【0127】 實現明確定義摩擦力/轉矩之第二個替代方案係確保無載荷之靜摩擦，表示器速度和摩擦均將為零。零速度似乎與位置變化需求(為獲得幾何參數)相矛盾，然藉由將困難轉化為優點，本發明包括無球桿機構系統之替代實施例。此些實施例將於後述參照第4-6圖說明。於此所提之困難為順應性，可能為非線性，為早期動態校準系統之一主要問題。於此反而首先從WO2014065744和WO2015030650體認到，隨著機械手首先於自由空間運動中運動，然後以夾緊姿勢固定，機械手可設置為無載荷(幾乎為零之靜摩擦)與(幾乎為靜止之速度)姿勢。此姿勢由6個自由度機械手所有6個夾緊曲線之中點定義，且還適用於自由度小於6之機械手(應用超靜態模型或在夾緊中引入被動關節)或多於6個之機械手(將零空間運動之馬達角度固定至一些所需之動態構造，且馬達轉矩等於重力影響)。

【0128】 實現明確定義摩擦力/轉矩之第三個替代方案係藉摩擦感知控制達到該位置以實現於加載位置之零速度，使得從一已定義之轉矩方向達到零速度。亦即，考慮到關節與連桿性質，控制器3控制馬達沿單一方向移動，直達到與剛性無間隙位置相對應之位置。與上述第二種替代方案相比，缺點係需要更精確地了解如關節摩擦之非幾何參數，但優點在於用於識別幾何參數之夾緊姿勢不需重力加載末端效應器(如馬達轉矩需要接近零

時之第二種選擇)。當如用於銑削之末端效應器安裝於大型機器人上且工具本身(所謂的磨頭，不承受大型機器人之重力)被夾緊以獲得最佳精度時，此第三替代方案係為較佳的切割點。

【0129】 為實際獲得幾何參數，其仍允許於所描述達到載荷靜止狀態之限制目標姿勢間進行已知的(絕對的或相對的)運動。於此想法，系統對以下方法之影響，係在限制姿勢間之運動(以下稱為指令運動)無需限制，假定於指令目標姿勢下之控制被限制，且限制之位置姿勢至少相對於彼此係為已知。避免外部關節之一實施例如第3圖所示；具有工具交換器組件41和具有安裝工具交換器部件之兩種不同類型的限制件42、43之限制裝置4能以各方式設置，每一方式提供夾緊姿勢明確定義之位移，其控制無載荷靜止狀態係導致根據以下方法使用之數據點(即，馬達轉矩與馬達角度)。第3圖中之限制裝置4或其他限制裝置4之示範性實施例將更詳細地於下述圖式中說明。

【0130】 固定機械裝置如機械裝置之夾緊係將至少一個機械關節直接或間接牢固地附接於環境之過程。在機械設備具備一個自由度之情況下，其將被完全限制，無限剛性之機械裝置將無法移動其關節。固定夾緊具有六軸無奇異配置之標準工業機器人的末端效應器將限制所有機器人關節之運動。夾緊機械手的一種方法係使用標準之工具交換器，附接該工具連接器至環境以及附接該工具更換器至機械手2，然後對接工具更換器至工具連接器。

【0131】 於機器人系統之正常操作期間，機器人系統之機械手將嘗試跟隨由操作者程式設計或命令之位置命令。實際位置和命令位置間之誤差

會由系統自動最小化。當命令系統至無法到達之位置，如低於地面之位置時，機械手將於地面上施加強大之致動力/力矩而導致位置誤差。機器人安全系統會在造成任何損害之前嘗試停止操作。此行為恐會增加正常運行期間於環境中固定機械臂之困難度。這能藉由限制轉矩或進入機械手之相容模式進行補救，其中位置誤差僅按比例降低。因此，執行該方法之前，機械手可設置為一順應模式。然後該方法將於順應模式中執行。抑或，可限制機械手之轉矩，於一個限制之轉矩模式中以機械手執行該方法。在一機械手中，不同關節可配置為使用不同類型之控制與相容模式，即使於執行該方法時亦可能改變。例如，當製造腕軸製成順應時，可選擇欲接近之姿勢而使具有非常高之摩擦或重力的軸能保持標準控制。

【0132】 於機械手之固定期間，係藉由位置參考下命令。命令位置很可能與空間中之真實位置略有不同。此差異將為機器人系統視為誤差，從而產生一非零轉矩。由於在標準機器人系統中僅允許定位命令，因此執行搜索以找到所得轉矩接近於零之命令位置。每個馬達位置指令均略有改變，以找到正確之搜索方向。當找到了正確方向，位置命令再小步改變，以確保安全運行。反覆進行直到所有實際轉矩接近於零。夾緊方法之進一步細節可在WO2014065744中找到。

【0133】 為識別機器人之動態參數，末端效應器之位置和/或取向須為已知。需要幾個關節位置以識別參數。藉由使用所描述之方法，和藉由已知機器人系統坐標系中之已知夾緊點位置和/或取向以限制運動，所獲得之關節值可用於校準。夾緊點能藉CAD模型之精確機械設計或外部測量系統予以測量。利用來自機器人內部關節傳感器獲得之值，可識別機械手之

動態參數。

【0134】 然而罕見的是，機器人單元包含已知之夾緊點，係使固定夾緊已知點於實踐中難以使用。因夾緊點之位置和取向係為未知，因此將機器人夾緊至單一未知點不會給出關於機器人動態參數之任何訊息。藉具有已知相對變換之多個夾緊點，可將第一夾緊點之位置和取向視為識別中之增加參數，可使用與夾緊至已知點情況相同之方法。

【0135】 使用未知夾緊點之缺點為無法識別機器人之所有動態參數。無法將夾緊位置之位置和機器人第一關節之位置與馬達偏移分開。例如，移動第一關節之旋轉軸線無法與夾緊點移動分開。因若需完整之幾何校準，則需增加方法以識別機器人第一關節之動態參數。

【0136】 具有未知夾持點但已知點間之相對變換的情況能藉多種方式實現。

1. 能以高精度製造具有多個夾緊點之物體，如板體或立方體，使夾持點間之相對變換可假定為已知足夠之精度。該實施例藉第 3-6 圖中之第二限制件 43 舉例說明。
2. 使用工具交換器 46(第 3-6 圖)，其中工具交換器可鎖定於多個不同位置，如藉其旋轉，可從相同之夾緊點獲得多個機器人構造(目標姿勢)。若工具交換器之旋轉軸線不與機械手之最後一個關節重合，如藉由於機械手和工具交換器間使用之角度偏移件(第 3-6 圖)，則會增加關節之激勵。多個夾緊配置可以藉由增加一額外偏移件、一角度偏移件 45 或延長偏移件 47(第 3-6 圖)，與首先串接之工具交換對予以實現。若工具更換器能鎖定於八(8)個不同位置(每個鎖定位位置之間旋轉 45 度)，則總可有 64 種不同之夾緊配置。舉出之實施例係顯示於第 3-6 圖。

3. 其為上述兩種備案之組合。舉出之實施例顯示於第 3-6 圖。

【0137】 因此，第3-6圖顯示多個限制裝置4，現將參照此些圖式說明不同之實施例。

【0138】 對於第3-6圖所示之雙球桿實施例，如第1圖和第2圖所示每一非限制性實施例所示，機械手2係設置為由控制系統3控制，以將機械手2之末端效應器移動至目標姿勢。機械手2具有該些軸中之至少一個軸，亦即包括至少一個伸縮性。於各實施例中，機械手2係連接至一個限制裝置4。藉由該限制裝置4限制該機械手2的運動，以物理地限制該機械手2的運動在至少一個自由度，從而實現一受限的機械手運動與對應地該機械手2之至少一個軸的一受限的馬達運動。控制系統3進一步設置以命令該機械手2接近一組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行包括非零受限的馬達運動之該受限的機械手運動。控制系統3進一步設置以執行該受限的機械手運動的摩擦感知控制一段時間，同時監測與一馬達轉矩和該至少一個軸的馬達角度相關的量。控制系統3進一步設置以執行對一彈性動態模型之一組動態參數之識別，該模型包括表示該至少一伸縮性之至少一個已知量，該識別係基於該監測的量和該機械手的彈性性質；並且基於所識別的該動態模型之該組動態參數，確定該機械手2之該至少一幾何性質。伸縮性質可藉由相應參數可預定為已知性質予以表示。

【0139】 請參考第3圖，其顯示機械手2與根據一個示例連接至限制裝置4之端部凸緣。剛性地連接限制裝置4至地板，從而機械手2(也剛性地連接至地板上)和限制裝置4造成一封閉之動態鏈。藉由該限制裝置4限制該機械手2的運動，以物理地限制該機械手2的運動在至少一個自由度，從而實現

一受限的機械手運動與對應地該至少一個軸之一受限的馬達運動。於此，該限制裝置4包括一個工具交換器組件41以及多個限制件，即第一和第二限制件42、43。工具交換器組件41和限制件係為互連。如利用控制系統3控制之氣動裝置鎖定就位限制裝置4。實現自動夾緊是對接和/或鎖定之另一種替代方案係如與花鍵具有摩擦連接。每個工具交換器係設置成具有一個鎖定裝置。鎖定裝置可為氣動式或摩擦式。氣動之鎖定裝置可包括位於空腔中之球，其利用空氣壓力鎖定就位，從而將工具更換器對準至工具連接器或相對位置。機械手2係處在被命令接近至一組目標姿勢之限制狀態。第3圖顯示了此些姿勢中之一。機械手2進行曝露於控制系統3之摩擦感知控制中，使得所期望數據，亦即馬達轉矩至量化為至少一個軸之馬達角度時，於大多數情況下可對多個軸進行檢索。所期望之數據係能確定機械手中至少一個幾何性質之數據。

【0140】 每個限制裝置4係設計成具有至少一個夾緊點，以用藉由將該機械手2夾緊至該至少一個夾緊點，以限制該機械手2的運動。夾緊點將於下文中詳細說明。

【0141】 第4a圖之機械手2示出如第3圖為限制用但處於另一目標姿勢之相同限制裝置4。限制裝置4亦為另一種配置，亦即已移動使一新目標姿勢係為可能。該運動係由該命令步驟所涵蓋。當命令該機械手2接近另一個目標姿勢時，由控制系統3控制該運動。

【0142】 第4b圖為顯示第4a圖限制裝置4之放大圖。該工具交換器組件41包括角度偏移件45，工具交換器46包括工具更換器46a與相應配合之工具連接器46b。是以一工具更換器46a和一與其配合之一工具連接器46b統稱

為一工具交換器46。工具連接器46b定義用於機械手2之一夾緊點。工具連接器46b與配合之工具更換器46a定義了相同之夾緊點。換言之，該工具交換器46包含一個夾緊點。於一些實施例中，該工具交換器組件46係支撐複數個對接方向。因此工具更換器46a與配合之工具連接器46b可仍在同樣夾緊點的同時，重新排列在新的方向。該工具交換器46可支撐如1、2、4、6、8、10或12個不同之對接取向。角度偏移件45係設置端部凸緣44與工具更換器46a之間。角度偏移件45設置以偏移該工具交換器46，使得工具交換器46之旋轉軸線不平行於連桿之旋轉軸，於此該工具交換器46係附接至第六連桿16。此外，角度偏移件45設計成具有兩個相對不平行之附接邊45a和45b(參見第4b圖)。附接邊45b係設置於端部凸緣44。另一附接邊45a設置在工具更換器46a。角度偏移件45可進一步設計為具有一個空腔，如用螺栓以使邊45b附接至端部凸緣44。角度偏移件45定義其非平行附接邊45a、45b間之角度，即15°-45°之間，如30°。附接邊45a和附接邊45b間之角度可為恆定或可變。每個附接邊亦可視為一個平面。因此附接邊45a之平面與附接邊45b之平面係不平行。該工具交換器組件41定義一個夾緊點，即為工具交換器46之夾緊點。於此，工具交換器46之夾緊部點係定義在第一平面中，亦即工具交換器46之附接平面附接邊45a定義第二平面。所述第一平面與所述第二平面係不平行。角度偏移件45係設計具有相對低之重量(相對於機械手2之其他部分)。第一限制件42包含一延長偏移件47、兩工具連接器46b以及一工具更換器46a。延長偏移件47具有兩個延長附加邊47a和47b，在本文中分別稱為第一延長附加邊47a及第二延長附加邊47b。該工具連接器46b沿第一延長附加邊47a設置，該工具更換器46a沿著兩延長附加邊中之延長附加邊47b設置。

於此，第一和第二延長附加邊47a、47b係平行的。工具更換器46a和工具連接器46b個別定義機械手2之夾緊點。夾緊點間之相對變換係精確地定義且已知。換言之，該第一限制件42係設計具有複數個夾緊點，其中該些夾緊點間之相對變換係為已知。夾緊點分開對應於代表腕連桿至少一半長度距離(具有其直線運動和所述端部凸緣間之距離，於此情況下為大多數機器人之連桿5)之機械手2。第一限制件42之工具連接器46b中之一係連接至工具交換器組件41上之工具更換器46a。於此，是以最遠側之工具連接器46b連接至工具更換器46a。

【0143】 第二限制件43包括連接至空間中一固定點，即基座48之工具連接器46b。底座48係剛性地連接至地板。第一限制件42之工具更換器46a中之一係連接至第二限制件43之工具更換器46b。

【0144】 根據一些實施例，該至少一個夾緊點之相應位置和取向係為未知。因此，對接至具有未知絕對位置和取向之夾緊點時，控制系統3可確定機械手2中之至少一個幾何性質。根據一些實施例，該至少一個夾緊點的位置或取向之至少一個參數係為未知。因此，三個坐標(X, Y, Z)可以定義位置，三個角度(α , β , γ)可以定義取向。因此，任何、一些或所有參數(X, Y, Z)和(α , β , γ)可為未知。

【0145】 根據一些實施方式，限制裝置4設置成氣動地附接於機械手2與機械手2工作空間中之一固定點。限制裝置4之所有部件因此設置具有流體管線、連接埠等，以支援限制裝置4之氣動控制，從而使得工具交換器46能夠重新取向且重新定位工具交換器組件41與限制件42、43、49。

【0146】 假設所有工具交換器可鎖定於四個不同取向上，可能唯一夾

緊姿勢之總數構成爲292，其考慮到工具交換器組件41與限制件42、43和49(第5a圖)之所有組合。

【0147】 第5a圖顯示出限制裝置4之另一例，其顯示於第5b圖中之分解部分。第5b圖中之限制裝置4類似於第4a圖和第4b圖中之限制裝置4，但包括另外之第三限制件49。除了附加之第三限制件49之外，第5b圖限制裝置4之部分與第4b圖中之限制裝置4相同。因此此些部分之說明可參考第4b圖與其相關說明內容。第三限制件49包含一工具連接器46b、一角度偏移件45以及一工具更換器46a。角度偏移件45係設置在工具連接器46b和工具更換器46a之中間或其間。同樣在第三限制件49中，角度偏移件45可設計成具有兩個相對非平行之附加邊45a、45b。工具連接器46b設置於兩相對非平行之附接邊的第一邊45a上，工具更換器46a設置於兩相對非平行之附接邊的第二邊45b上。第三限制件49之工具連接器46b係設置在第一限制件42之工具更換器46a上，第三限制件49之工具更換器46a係設置在第二限制件43之工具連接器46b上。角度偏移件45在其非平行之附加邊45a、45b間定義一角度，其可介於15°-45°之間，如30°。於平面之間該角度可為恆定的，或變化的，惟必須是已知的。該工具連接器46b定義工具連接器46b的附接平面中之一個夾緊點，而工具更換器46a定義工具更換器46a的附接平面中之另一夾緊位置。當工具連接器46b與第三限制件49之工具更換器46a組裝了角度偏移件45，該工具連接器46b的附接平面和工具更換器46a的附接平面係不平行。是以，該第三限制件49包含至少兩個夾緊點，其一夾緊點位在一第一平面，另一夾緊點位在一第二平面，其中該第一平面和該第二平面係不平行。角度偏移件45係設計具有相當低之重量(相對於機械手2之其他部分)。

【0148】 是以，限制裝置4係包含至少兩個夾緊點，其一夾緊點位在一第一平面，另一夾緊點位在一第二平面，其中該第一平面和該第二平面係不平行。平面可能涉及工具交換器的附接平面，工具更換器或工具連接器。平面亦可涉及角度偏移件的附接邊之平面。如所理解，各種組合可以實現一限制裝置4，其包含至少兩個夾緊點，其一夾緊點位在一第一平面，另一夾緊點位在一第二平面，其中該第一平面和該第二平面係不平行。

【0149】 第6a圖和第6b圖顯示第5a圖與第5a圖中在兩個不同夾緊點間之限制裝置4。兩不同夾緊點係由第一限制件42之兩工具連接器46b定義；即遠程定位之工具連接器和中間位置之工具連接器。在第6a圖中，工具交換器組件41之工具更換器46a係附接至中間位置之工具連接器。在第6b圖中，工具交換器組件41之工具更換器46a反而安裝於遠側位置之工具連接器。

【0150】 一般而言，如先前描述之任何一個角度偏移件45可設計成具有兩個相對之非平行附接邊45a、45b。角度偏移件45之尺寸係為精確已知，使得知最後軸線偏離設置多少。角度偏移件45之尺寸係為先前已知，使得知最後之軸偏移多少。角度偏移件45可具有楔形之形狀。相對之非平行附接邊45a、45b定義15°-45°之間，如30°之中間角度。

【0151】 通常，延長偏移件47設計為具有兩個延長附加邊47a和47b。延長偏移件47之尺寸確切為已知的。延長偏移件47可具有一長方體之形狀。兩個延長附加邊47a和47b可為平行邊，如長方體平行邊。

【0152】 每一夾緊位置可藉由以下事實多次使用：通常機器人能以一定之位置與取向，以不同配置，即具有不同的關節角度達到一定姿勢。此

特徵係使逆動態成為一困難問題；一典型例子即為肘部向上或向下之兩個解決方案。根據機器人類型，相同夾緊點可能存在不同數量之配置。對於具有球形手腕之工業機器人，通常可將第四關節180度轉動且繞零角度映射第五關節度角。

【0153】 對於具有多於六個關節機器人，通常能於保持末端效應器固定，即使用零空間運動時移動機器人臂。對於具有七個關節之機器人，對應於肘運動，即同於人手臂。利用零空間運動給出每夾緊點大量不同之測量點。

【0154】 控制系統3(第1圖)包括以指令配置處理器20和計算機可讀存儲單元21，以根據任何如本文將描述之實施例來執行方法。處理器20可包括一個或數個中央處理單元(CPU)。計算機可讀存儲單元21可包括一個或多個存儲單元。處理器20還可以包括在系統級上實現的一個解釋器，以為機器人終端使用者提供一種編程語言。然後存儲單元21存儲由解釋器可讀之使用者程序。若不用解釋器，則可將使用者程序編譯成CPU之一些中間代碼或機器代碼。根據控制系統3之特徵，可讓使用者在未預先準備或裝備之標準機器人上實現根據本發明之方法。在任何情況下，控制系統3係配置以控制所述機械手2。依偏好，控制系統3可為外部手動或自動操作控制器(或數位電腦)之形式，或內建於機械手2本身。控制系統3可包括用於交換如控制機械手2之控制器所使用CAD數據之電腦(未示出)。電腦亦可為控制器之主機，使得控制器為電腦之附屬設備，且由電腦進行控制。

【0155】 機械手2可包括內置之傳感器(未示出)，諸如附接至馬達軸或類似物之編碼器或旋轉變壓器，以感測關節之致動器位置，以便相對於

跨越關節空間之內部坐標系感測末端效應器位置，並使末端效應器位置與外部坐標系(通常跨越笛卡爾空間)相關聯。通常用於機械手2反饋控制之傳感器亦可根據本發明確定可用於決定關節和連桿性質(如順應性和幾何性質)之數據。如運動速度、力、或硬度之參數可於關節空間和笛卡爾空間兩者間進行轉換。以類似之方式描述致動器空間之參數，如由力或轉矩驅動之關節馬達角度可轉換成描述關節空間之參數，如從動態校準所得知之關節位置。

【0156】 實現限制運動動態鏈之一種方式係讓控制系統3(自動地或藉由手動命令)控制機械手2，使得機械手2之可移動部分，如工具交換器5到達限制裝置4附接點所在空間中之一點。於第2圖中此連接點係為第一球窩關節17之十字接頭的連接連桿51。

【0157】 機械手2進一步設置成由控制系統3控制，以移動機械手2末端效應器之目標姿勢。至少所述機械手2的該些軸中之一係包含順應性。機械手2設置成限制在至少一個方向上，使得機械手2運動限制在至少一個自由度，從而形成用於機械手運動之物理限制。

剛體動態之表示

【0158】 所獲下述方法之幾何性質可用於機械手2之動態校準。然後，控制系統3可利用機械手2之相交與平行關節偏離理想情況之一更完整模型。

【0159】 作為每個(由系統級別上之控制系統3)校準值之解決方案的替代方案，校準值可僅用於獲得對編程姿勢之調整。然後，當內插中間姿勢發散超過可接受程度時，機器人程序員須插入更多編程之姿勢。因計算

需求較低，且通常忽略諸如非線性傳輸效應之其他誤差源，此替代方案在工業系統中係為常見。於下文中，並未說明若僅針對編程姿勢考慮已知誤差校準值之補償，或者(實時)系統級別之中間插值姿勢得到補償，因以下原則於兩種情況皆適用。

【0160】 用於動態鏈之剛體動態模型可以諸多方式表示。一常見之替代方案係採用Denavit-Hartenberg (DH)參數來指定鏈，並對所涉及之計算採用均勻變換或歐拉角。雖能藉以下方法中之Denavit-Hartenberg參數，惟仍建議使用形式主義，以避免數位問題/奇異點略微不對齊之幾何形狀，延伸至彈性自由度增加之情況。

【0161】 Murray等人1994年發表之"機器人操縱的數學介紹"中描述一種形式主義，以及於此使用之較佳方法即基於旋量理論。使用旋量理論的好處在於，該表述為無奇異性，其涵蓋剛體之運動描述和力相互作用。使用旋量理論，以多次扭曲 $\{\xi_i\}_{i=1\dots n}$ 描述機器人，其中 n 係為關節數量。每個扭轉 ξ_i 與關節相關聯並描述關節如何移動機器人。在旋轉關節之情況下，描述關節 i 之扭曲 ξ_i 由下式給出

$$\xi_i = \begin{bmatrix} -\omega_i \times p_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

【0162】 其中 ω_i 係為關節之旋轉軸， p_i 則為旋轉軸上之一點。機器人之動態可藉動態參數 x_{kin} 來描述，假定螺旋理論為一組 $\{\{\omega_i, p_i\}_{i=1\dots n}, g_0\}$ 之情況下，其中 g_0 表示機器人位於其原始位置(當所有關節角度為零時)之均勻變換矩陣。例如，第1圖中機器人之動態參數係由下式給出

$$p = \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0 \\ 0.615 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0 \\ 1.32 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0 \\ 1.455 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0.855 \\ 0 \\ 1.455 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0.855 \\ 0 \\ 1.455 \end{bmatrix} \right\}$$

$$\omega = \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\}, g_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.94 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1.455 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

【0163】 其中長度單位在 p 和 g_0 為公尺。正向動態， $f(q, x_{kin})$ ，使用旋量理論由指數方程式之乘積給出

$$f(q, x_{kin}) = \prod_{i=1}^n e^{\hat{\xi}_i q_i} g_0 \quad (2)$$

【0164】 其中 q_i 表示關節 i 之關節角度，給出 $\hat{\xi}_i$

$$\hat{\xi}_i = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_i & v_i \\ 0_{1 \times 3} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

【0165】 其中 v_i 表示扭轉之前三個值 ξ_i ，即 $v_i = -\omega_i \times p_i$ ，若關節旋轉，給出 $\hat{\omega}_i$

$$\hat{\omega}_i = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{i,3} & \omega_{i,2} \\ \omega_{i,3} & 0 & -\omega_{i,1} \\ -\omega_{i,2} & \omega_{i,1} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

【0166】 其中 $\omega_{i,j}$ 表示 ω_i 之元素 j 。

【0167】 動態模型之動態參數 x_{kin} 係由機械手2，如以扭曲形式之幾何性質所組成。動態參數亦可包含如馬達偏移參數。使用機械手2之正向動態係用以計算給定關節角度 q ，和動態參數 x_{kin} 之末端效應器位置和取向。正向動態通常以一均勻變換矩陣表示，其依據

$$f(q, x_{kin}) = \begin{bmatrix} R & p \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

【0168】 其中 $R = R(q, x_{kin})$ 係說明末端效應器取向之旋轉矩陣，
 $p = p(q, x_{kin})$ 係為末端效應器之笛卡爾位置，其給定為

$$p = \begin{bmatrix} x_{ee} \\ y_{ee} \\ z_{ee} \end{bmatrix} \quad (6)$$

非幾何性質之表示

【0169】 WO2014065744 涉及確定關節之非幾何性質，而 WO2015030650 則處理連桿之非幾何性質。兩者皆假設描述為夾緊之某種限制運動，因實際解決方案係將端部凸緣對準至空間中之固定點，使得除因存在非幾何效應，如關節與連桿中之彈性外的小馬達運動以使機械手2無法移動。夾緊亦可藉僅限制1個自由度予以實現，若機械手2可移動至總體上覆蓋所有關節和所有連桿之激勵於兩個方向上。

【0170】 此處原理係使用機械手2之內部傳感器以及可選之外部傳感器，且還可主動地使用內部馬達轉矩以實現用於確定性質之最佳條件。因此限制運動之最大自由度為僅限制1個自由度。此為最實用之結構，因此只有於此描述唯一之機械限制可為使用，僅要某些時間允許所有關節和關節之連接點運動，以提高機械手2之精度。

【0171】 可藉選擇適當目標姿勢以實現根據 WO2014065744 和 WO2015030650 之夾緊限制，其允許桿18(第1-2圖)上之拉/推載荷投射至確定其性質之識別，然後選擇足夠大之目標姿勢集，使能確定所有非幾何性質。

【0172】 WO2014065744 之原理，代表藉僅測量馬達信號，即可維持所述變速器所包括捕獲個體差異參數之模型，然後該模型可用以計算每個

傳動連桿側之關節角度和轉矩。於某些情況下，由於識別之非線性(如反向間隙)係非可逆，計算並無法給出可靠結果。在工業應用中，亦可於CAM(電腦輔助製造)軟件工具中確定如間隙不可逆之非線性並相應地改變配置，且相應地於此非可逆載荷情況下所獲得以下數據中省略，因能藉探索機械手2之工作空間輕易地創建許多良好載荷情況。

【0173】 WO2015030650之原理，代表可確定關節中缺乏包括正交關節順應性與非線性之順應性之剛度，並以一動態觀點予以補償。亦即，若非從一個關節到下一個關節跨越其中連桿之五自由度固定轉變，此些自由度可考慮彈性。此外，每個關節傳動之彈性增加了另一個自由度，因此原則上每一機械手自由度於標準剛體運動學方面均伴隨著6個非致動彈性自由度。通常情況下，其中一些伸縮性自由度可視為是剛性的，因此不包括在內。連桿長度之剛度係為可被忽略之伸縮性(彈性)。為能更容易理解下述方法，所述非幾何性質之表示現在將更詳細地加以解釋。

【0174】 來自WO2015030650之剛度模型係所使用模型之基礎，即具有如方程式(1)-(6)。已更新WO2015030650中之關節模型、方程式(1)-(6)，以更好地表示機械手與伺服馬達關節之行為。新模型係基於增加每一關節傳輸順應性，如於第9a圖所示之1維範例。於該範例中，兩連桿係藉由兩者間之關節連接。該系統之自由度係編號為標記B1至B5。每一連桿具有兩個自由度，表示連桿之每一端部之變形，即第一連桿與表示為B1和B2之自由度相關聯，第二連桿與表示為B4和B5之自由度相關聯。該關節模擬成表示為B2和B4之自由度間之連結。關節之馬達於B2和B3間施加轉矩(力)，關節中之傳動裝置其餘部分表示為具有B3和B4間剛度 k 之彈簧。因此，此關節具

有一個自由度，即B3。若 τ 表示來自馬達之轉矩，則關節 k 中變速器剛度與對應於第9a圖中所標記自由度之變形為 u_i ，其中 i 係為自由度之數量，關節之部件剛度關係由下方程式給出

$$\hat{F} = \begin{bmatrix} -\tau \\ \tau \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & k & -k \\ 0 & -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

【0175】 第9b圖中顯示具有兩個連桿與一個關節之2維範例。WO2015030650之第10圖中顯示相應之範例，儘管使用簡化之關節模型假定馬達轉矩係直接施加，即無WO2014065744之傳動模型，當應用於此時(從一致性觀點來看)增加了額外之自由度。關節之位置係建模為與兩個連接連桿之端部相同。然而，關節每一側上之取向可為不同，其中 θ_1 為連桿0之變形角， φ_1 為連桿1之變形角。 β_1 表示關節之額外自由度，且藉轉矩 τ 連接至 θ_1 ，從 β_1 至 φ_1 之連接係藉由如具剛度彈簧之傳動剛度 k 。2維關節模型變得完全如方程式(7)，若 u_2 表示 φ_1 ， u_3 表示 β_1 ，以及 u_4 表示 θ_1 ，因此方程式(7)係為WO2015030650中方程式(6)之新版本。第9b圖所示2維範例之全局剛度矩陣結構顯示於為WO2015030650中第11a圖新版本之第9c圖，反映馬達轉矩和變速器剛度間之更新關係。

【0176】 當組合全局剛度矩陣時，將部件剛度模型轉換為相同之坐標系。對於新的關節模型而言，同樣適用於1維與2維之情形。然而於3維情況下，由於額外自由度通常與該些坐標軸中之一不一致，因此難以在使用本方法每一關節中增加額外之自由度。雖然每一連桿皆使用全局坐標系，局部連桿坐標系係用於全局剛度矩陣。然而，藉關節連接之連桿端須於相同坐標系中進行描述，以便能連接其於全局剛度矩陣中。此係可藉

WO2015030650中之轉換(10)與連桿轉換 ${}^iL_i$ ，定義為

$${}^iL_i = \begin{bmatrix} R_{i-1,i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{i-1,i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (8)$$

【0177】 其中 $R_{i-1,i}$ 係從連桿 $i-1$ 坐標系描述所述重新取向之旋轉矩陣至連桿 i 之坐標幀， I 表示 3×3 之單位矩陣，以及零點表示 3×3 大小之零矩陣。 ${}^iL_i$ 左上角兩個旋轉矩陣轉換部件剛度矩陣，使得作用於連桿第一端之力/轉矩矢量(3個力和3個轉矩)於與力/轉矩矢量相同之坐標系中表達作用於先前連桿之第二端，因此代表作用於連桿第二端之力/轉矩矢量不應該變換且該些輸入具有一致之矩陣。同樣推理亦適用於每個連桿端部之變形。

系統之模型採取形式

$$Ku = F \quad (9)$$

【0178】 如WO2015030650所示。未知參數係由 K 中 n_a 剛度參數組成，其中 n_a 為彈性自由度，和 u 中之 n_u 變形參數，其中 n_u 等於 u 中之元素數量。剛度參數可為馬達中施加轉矩 τ 之非線性函數，其中每個剛度參數 k_i 可建模為一組基函數中之擴展，如

$$k_i = k_i(\tau) = \sum_{j=0}^{n_k} k_{i,j} \varphi_j(\tau) \quad (10)$$

【0179】 其中 $\{\varphi_j(\tau)\}_{j=1 \dots n_k}$ 係為適當之一組基函數，如多項式， n_k 為擴展項之數量且 $\{k_{i,j}\}_{j=1 \dots n_k}$ 為參數。因此，剛度參數之總數為 $n_a n_k$ 。於此，機械手2之運動限制即為夾緊，固定第一個連桿與最後一個連桿之位置和取

向，即夾緊端之變形參數變為零。因此，未知數之總數在2維情況下為 $n_a n_k + n_u - 6$ 和3維情況下為 $n_a n_k + n_u - 12$ 。由於 K 或 u 中無任何參數為已知，而存在未知之縮放，如同 K 與 u 滿足 $Ku = F$ ，亦為 αK 與 $\alpha^{-1}u$ ， $\alpha \neq 0$ 滿足關係。為能克服縮放問題，可增加額外之方程式。關節角度 q 係與電機角度 θ_q 相關為

$$\theta_q = \beta + Nq \quad (11)$$

【0180】 其中 N 係為機器人之齒輪比矩陣， β 表示代表關節剛度之額外自由度，即 $\beta_i = \tau_i / k_i$ ，其中係為關節 i 之剛度 k_i 而 τ_i 係為馬達於關節 i 中施加之轉矩。機械手2夾緊之事實代表用於加載構造機械手2之(彈性)正向動態須給出與無載荷構造(零變形構造)相同之位置和取向，該關係可表示為

$$f(q, u) = f(q_z, 0) \quad (12)$$

【0181】 其中 $f(\cdot, \cdot)$ 給出機器人之正向動態， q_z 表示無載荷情況下之關節角度(零轉矩)。在所有實際情況下，相對於機械手2之尺寸變形將變小，而允許該關係之線性近似。於卸載之情況下，自位置和方向之偏差可寫為

$$J_u + J \delta q = 0 \quad (13)$$

【0182】 其中 J 表示機器人之幾何雅可比，相對於該變形之幾何雅可比， J_u 和 $\delta q = q - q_z$ 。雅可比將會是 q 和 u 兩者之函數，然當變形很小時，近似值 $J \approx J(q_z, 0)$ 與 $J_u \approx J_u(q_z, 0)$ 係為有效，亦即因變形引起之雅可比變化係可忽略。此些新方程可用以擴展原始模型($Ku = F$)，其依據

$$\underbrace{\begin{bmatrix} K & 0 \\ P & N \\ J_u & J \end{bmatrix}}_{K_{ext}} \begin{bmatrix} u \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ \theta_q \\ Jq_z \end{bmatrix} \quad (14)$$

【0183】 其中 P 為選擇矩陣，因此 $Pu = \beta$ 。由於擴展剛度矩陣 K_{ext} 之部分現由已知參數組成，因此此組新方程式無縮放問題。

方法

【0184】 於下文中，確定影響機械手末端效應器運動的機械手至少一幾何性質之方法，如見於第1圖所示工業機器人1中之機械手2可說明。該方法可由操作員手動地命令使用機器人1，或可將其實現為包括電腦指令之電腦程序或作為包括機器人語言指令之機器人程序，當控制系統3之處理器20執行程序時，由工業機器人1自動執行。因此，控制系統3可自動執行該方法之一個，幾個或所有步驟。於此之方法主要參考包括至少兩個軸之機械手，惟應理解，機械手可包括多個確定幾何性質之軸，例如三、四、五、六、七個軸。此外，一個以上的軸，例如複數個軸具有至少一伸縮性。此外，可藉由該方法確定一個以上，即多個幾何性質。現將參考第8圖中流程圖且參考第9a-9c圖和第10圖之示例說明該方法。

【0185】 該方法係包含步驟A1藉由一限制裝置4限制該機械手2的運動，以物理地限制該機械手2的運動在至少一個自由度，從而實現一受限的機械手運動與對應地該至少一個軸的一受限的馬達運動。於此，限制機械手運動代表機械手運動受到限制裝置4預定義之限制。限制運動之利用涉指因限制機械手運動，從而藉由機械手動態相應地限制馬達運動。

【0186】 根據一個實施例，機械手2之運動或複數個運動涉指機械手2之末端效應器或端部凸緣運動，較佳為藉由一工具交換器。換言之，機械手運動可涉指藉由工具交換器安裝至機械手2端部凸緣上之末端效應器的運動。末端效應器性質係為先前已知，或以其他方式確定。限制該機械手2

的運動係將該機械手的一連桿連接至該限制裝置4。因此，機械手2之限制運動包括將機械手2對接至限制裝置4，該限制裝置4為機械手2提供機械介面，因此與工具交換器相同。因此，無需增加或修改機械手或其末端效應器。

【0187】 因順應性緣故，當確定幾何屬性(如兩個關節之精確連桿長度或平行度)時，至少於環境中無準確固定點時，機械手2須能移動，否則無法察覺錯誤。然而，根據本發明，末端效應器運動應至少局部地受到機械限制，因其提供用於控制機械手2及其部件載荷之裝置。根據一些實施例，限制該機械手2的運動係將該機械手2的一連桿連接至該限制裝置4，例如任何前述限制裝置4之一。限制裝置4可包括如第1-2圖所示之雙球桿機構或如第3-6圖所示之限制裝置4。雙球桿機構可用於限制機械手2之運動，使能監視且獲得用於確定關節性質，連桿性質和幾何性質之所有量。然而作為補充，為確定與用於確定關節和連桿性質的機械手2之馬達轉矩和馬達和/或關節角度有關之量，可藉連接機械手2之工具交換器至限制裝置4限制機械手2之運動，該裝置為限制在所有自由度中末端效應器運動之夾緊裝置。夾緊裝置可為不同於第1-6圖所示之限制裝置4。反而其可如WO2014065744或WO2015030650中所示之夾緊裝置，因此，將工具交換器5連接至夾緊裝置以提供剛性夾緊後，可鎖定具有多個平行連桿之夾緊裝置。不同之限制裝置可組合用於不同類型之參數，甚至單個機器人亦同。

【0188】 根據一些實施例，A1限制該機械手的運動係包含將該機械手夾緊到至少一個夾緊點，該至少一個夾緊點之位置和/或取向係為未知。

【0189】 根據一些實施例，A1限制該機械手的運動係包含將該機械

手夾緊至複數個夾緊點，該些夾緊點之位置和/或取向係為未知，該些夾緊點間之相對變換係為已知。例如，如先前業已說明，包括具有延長偏移件47之第一限制件42的限制裝置4可用於將機械手2夾緊至第一限制件42之夾緊點。此外，工具交換器46可用以將機械手2重新取向至其他夾緊點。

【0190】 根據一些實施例，A1限制該機械手的運動係包含偏移安裝在該機械手之一工具交換器，使得該工具交換器之旋轉軸線與該工具交換器連接的該機械手連桿之該旋轉軸線不平行。如上所述，可使用包括工具交換器組件41和/或包括角度偏移件45的第二限制件43之限制裝置4。

【0191】 當運動受限制時，該方法更包含步驟A2命令該機械手2接近一組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行包括非零受限的馬達運動之該受限的機械手運動。根據一實施例，該組目標姿勢包含該末端效應器複數個不同的取向和位置。為了確定合適之目標姿勢，可首先產生或定義在機械手2無動態錯誤之情況下應可達到之多個候選姿勢。然後，選擇候選姿勢之可達姿勢作為目標姿勢，且設置於定序朝向目標姿勢的運動之一目標姿勢列表中。然後於目標姿勢列表中之目標姿勢間，定義和計劃或生成目標姿勢間之路徑，使得機械手2可在目標姿勢之間自動移動。

【0192】 一實際方面係為夾緊點上之載荷，如由於重力，特別是與延長偏移件47之組合導致圍繞工具交換器46相對高之轉矩，從而承擔未建模偏差之風險。同樣地，倘若銑削工具用於夾緊重型機械手以便平衡重力，涉指末端效應器上之過載，從而會有損壞之風險。於此情況下，圍繞零馬達轉矩之正常夾緊可以被修改為圍繞與重力對應之轉矩，因而允許用於相

當大的機器人(即，超過150kg有效載荷之機器人)之相當小且低成本之夾緊件的存在。此係採用前提及摩擦感知控制之第三種替代方案。

【0193】 在根據第3-6圖實施例的情況下，夾緊姿勢間之運動受到較少限制，而可簡單地由力學界定。每個工具交換器46可被鎖定在至少四個及多達十二個不同的旋轉角度中。即使藉由使用特殊鎖定機構亦能實現多次旋轉，惟若不同旋轉彼此過於靠近，則需增加感測。

【0194】 然後使機械手2沿目標姿勢列表之路徑移動，同時監視與至少一個馬達轉矩和機械手2之電機角度相關的量。此些量通常用於所有軸之馬達轉矩和馬達位置。於所有參數識別前，為將相互作用力維持在可接受限度內，限制運動可能涉及對機械手2之一個或多個關節之順從控制。同樣地，能使用力予以控制動作。所述限制裝置4還能包括具有可調整剛度，使得最初使用較軟之限制時偏差更為顯著之元件。

【0195】 目標姿勢可能會有所不同，其取決於是否在監測用於確定關節性質，連桿性質或幾何性質數量時使用與否。例如，為了確定幾何性質，可以藉由限制裝置4或藉由利用總共具有大於6個自由度之一個或多個手臂的零空間以進行某些運動。限制機構可用於與外圍設備組合使用，例如軌道運動，伺服控制之末端效應器和用於定位工件之外部軸。根據一實施例，該至少一個幾何性質係與該機械手2之一外圍設備(未顯示)相關。然後，外圍設備包括受到機械手2運動影響之至少一個連桿。

【0196】 具備第3-6圖多固定夾緊之一優點(相較於球桿)為每個夾緊姿勢可用於確定非幾何與幾何性質。缺點是幾何誤差可能比使用球桿到達工作空間較大部分時更少暴露，因此更難以準確地識別。(機器人手腕上之

偏移量過長)。因此根據一實施例，建議將球桿實施例用於製造AbsAcc機器人，同時使用與第3-6圖中相同之夾緊裝置，以用於多固定點夾緊更適合於有限之校準(如僅限於馬達偏移)與修理後之重新校準。

【0197】 當限制運動且已執行每個所需目標姿勢附近之運動時，該方法包括具有至少一個關節控制之步驟A3。步驟A3包含執行該受限的機械手運動的摩擦感知控制一段時間，同時監測與一馬達轉矩和該至少一個軸的馬達角度相關的量。具有摩擦感知控制代表受限的機械手運動的控制適應於機械手性質，使得其能識別和處理摩擦。藉由建立與找出機械手2之無載荷條件，能檢索用於識別幾何性質之數據。一般而言，摩擦感知控制之目的在於實現明確定義之摩擦力/轉矩，其能與明確管理之效應分離。於此，參考先前描述之第一，第二和第三替代方案來實現明確定義之摩擦力/轉矩。

【0198】 於此，一段時間涉指一段長度足以檢索所需數量之時間段。對於具有高質量力學之機械手，具有非常低轉矩波動之馬達和具有非常低雜訊之馬達角度傳感器，一秒內即可獲得足夠之幾個數據點之監測。對於具有各種(已知或待確定)缺陷之機械手，能於研究監測數據後選擇合適之時間段。

【0199】 根據一些實施例，該方法包含藉由以包含該至少一個軸的間隙之往復運動控制該至少一個軸，以A3執行該摩擦感知控制。因此能識別齒隙，且可從機械手能開始其運動之處建立間隙之中點或端點。因此，間隙作用可與剛體參數分離，以能確定真實之幾何性質。於此之間隙被視為一非幾何性質。相反地，一些低成本機器人製造商可能會於幾何參數集中含蓋間隙。處理對於標準機器人，可以預期於運動規劃和/或運動控制中處

理間隙或如一般之無效運動之位置滯後。包含反向間隙代表包括間隙之數據，以能夠識別出間隙。

【0200】 根據一些實施例，該方法包含由於該受限的機械手運動之至少一個無限制方向的存在，A2命令該機械手接近該組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行該受限的機械手運動。再者，該方法包含控制該至少一個軸線，從而實現完全展開的摩擦，以A3執行該摩擦感知控制。根據第1圖的實施例，代表所有軸皆應移動，使得摩擦力完全發展為非零運動，因此良好地定義且處理摩擦力以能準確地識別幾何性質。根據第3-6圖中任一之實施例，由於伸縮效應允許限制運動，且摩擦感知控制定位每一軸線，使得立體未知之摩擦力從幾何識別角度來看不會對運動產生淨影響。此通常地使用減少之伺服反饋增益，能避免量化效應(由於感測，致動和控制中之有限分辨率)。

【0201】 根據一些其他實施例，該方法包含由於該至少一個伸縮性影響該至少一個軸線，A2命令該機械手接近該組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行該受限的機械手運動。此外，該方法包括藉控制該至少一個軸線於包含對應於任何(可能非零)間隙中間之中點的一往復運動，同時忽略摩擦效應，以(A3)執行該摩擦感知控制。亦即，如無摩擦般獲得相同之中點。換句話說，藉由控制該至少一個軸線於包含對應於任何(可能非零)間隙中間之中點的一往復運動，同時忽略摩擦效應，以執行該摩擦感知控制，控制至少一個軸到達中點對應於由至少一個軸產生之無摩擦、無間隙、無運動且無驅動轉矩之位置。亦即，若至少一個軸之傳動中存在間隙，則停止位置將位在該間隙之中間。相應地，在非線性剛度

引起運動失靈的情況下，對應於無載荷中點之位置將由摩擦感知控制產生。在更複雜之情況下，具有分佈於至少一個軸的三軸列上之非線性剛度，間隙和摩擦力，根據總間隙而非於零轉矩下經歷之間隙，摩擦感知控制(可藉機器元件相關知識予以調節)可包括朝向逐步變小之排列轉矩和定位。這些變化量大，然所揭示方法且可直接應用。如上所述，目的係實現明確之摩擦力/轉矩。於此，參考以前示例性之第二種替代方案予以實現明確之摩擦力/轉矩。應該調節摩擦感知控制，以避免使識別精度與狀況惡化之動態摩擦效應/瞬變。摩擦感知控制亦有益於選擇一最適合之軸子集，以用於確定某些性質及該選擇中使用控制之狀態。包含中點代表包括可識別對應於零摩擦狀態中點之數據。

【0202】 根據一些實施例，該方法包含由於該至少一個伸縮性影響該至少一個軸線，A2命令該機械手接近該組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行該受限的機械手運動，以及控制該至少一個軸線於包含一重力載荷點的一往復運動，使得該至少一個軸線到達該重力載荷點，以A3執行該摩擦感知控制。重力加載點(涉指夾緊滯後曲線上之點)係對應於由至少一個軸無摩擦，無間隙，無無效運動以及平衡重力之驅動轉矩所產生之位置。實際上摩擦力存在，因此摩擦感知控制須從一定方向(具有良好定義之摩擦力，同時從一個方向不會過頭地使運動停止(如零速))接近重力載荷點，其需要使伺服控制失諧以減慢響應。再次，其目的係為實現明確之摩擦力/轉矩，然對於該實施例之益處在於，若所有機械手重力自馬達側平均地平衡，可減小限制裝置上實際上接近零施力之載荷。因此，夾緊曲線上相應零摩擦點之名義重力加載點。顯然地，如在朝向已知或測

量表面推動末端效應器(或可能包括附加傳感器之特殊裝置)的同時，亦能使用其他轉矩之動態限制和摩擦感知控制。技術人員可以根據現有應用之諸多情況應用所揭示之方法。於此，參考以前示例性之第三種替代方案予以實現明確之摩擦力/轉矩。

【0203】 在典型6自由度及自由度大於6情況下，於固定夾緊或於如球形之限制運動，除非動態鏈係為單一構造，載荷例將為等靜壓。此形成典型之實施例。另一方面，根據一實施例，該些軸之至少一個連桿係被超靜態加載，反映出至少一對連桿係涉及一單一配置。如此奇點於機器人應用中經常被認為是個問題，然對於確定參數，其可作為消除單個關節傳輸影響之運動限制。在超靜態之情況下，連接力之計算係基於(14)。

【0204】 在等靜壓之情況下，可基於WO2015030650從所測量或已知之馬達轉矩計算機械手任何部分中之廣義力，並使用自WO2014065744和WO2015030650之模型以計算此些力將產生之變形。藉由補償基於順應性模型之動態模型，將得到一更為精確之動態模型，更具體而言即一彈性動態模型。於每一時刻，在每一連桿上特定載荷情況下，能簡單地藉由如WO2015030650中揭示之組件剛度矩陣以計算從一個關節至下一個關節之轉換(考慮到非幾何效應)。是以，根據一些實施例，該方法包含利用馬達轉矩以確定作用於該限制軸線的至少一個連桿上之至少一等靜壓力。

【0205】 基於獲取的量，該方法更包含一步驟A4，執行對一彈性動態模型之一組動態參數之識別，該模型包括表示該至少一伸縮性之至少一個已知量。該識別係基於機械手2之監視量與彈性性質。限制裝置4之伸縮性質可從根據所公開方法早期使用中識別之該些性質，或者由本領域技術

人員設置之任何標準(不夾緊，不使用額外儀器)而得知。因此，可藉由該方法管理力/力矩之依存幾何形狀。

【0206】 識別問題係基於測量之關節角度找出動態參數 x_{kin} ，無論從夾緊點之受限零空間運動或順應性馬達運動中獲得。該原理是除可能存在之任何額外硬件(如偏移件和工具交換器)之外，機器人之正向動態應與(未知)夾緊點相同。根據一些實施例，此係能表示為均勻變換矩陣之以下關係：

$$T_{FK}(q, x_{kin}) = T_{clamp}(x_{cp}) T_{extra}(p) \quad (15)$$

【0207】 其中 $T_{FK}(q, x_{kin})$ 表示機器人正向動態作為關節角度 q 和動態參數 x_{kin} 之函數， $T_{clamp}(x_{cp})$ 表示作為 x_{cp} 函數 a 之夾緊點，其作為六個參數向量夾緊點之簡要表示， $T_{extra}(p)$ 表示因額外硬件，可能為已知參數 p 之函數。在已知夾緊點之情況下，僅 x_{kin} 需要識別，然在未知夾緊點之情況下， x_{cp} 亦需確定。

$$\text{使 } f(T_1, T_2) = \begin{cases} p_1 - p_2 \\ \log(R_1 R_2^T)^\vee \end{cases} \quad (16)$$

【0208】 其中 p_i 表示其位置部分 T_i ， R_i 表示之旋轉矩陣部分 T_i 。採用對數和應用 $R_1 R_2^T$ 的 $\vee$ 運算符給出 T_1 與 T_2 間方向誤差之三參數表示。該函數 f 可用於設置以下成本函數：

$$J_{cost} = \sum_{i=1}^N \| f(T_{FK}(q_i, x_{kin}), T_{clamp}(x_{cp}) T_{extra}(p_i)) \|^2 \quad (17)$$

【0209】 其中 $\|f\|^2 = f^T f$ 以使 J_{cost} 成為標量數， q_i 與 p_i 為關節角度與額外測量參數之值 i ， N 表示測量之總數。動態參數被認為是解決以下優化問題之參數：

$$\min_{\text{over } x_{kin} x_{cp}} J_{cost} \quad (18)$$

【0210】 在已知夾緊點之情況下， x_{cp} 參數係為已知，且並非優化變

量之一部分。優化問題在參數中係為非線性，可用非線性優化方法求解。

由於機械手參數大致為已知，因此局部優化於此優化中不成問題。在局部優化之情況下，通常藉其不確定性範圍識別之一些參數予以檢測，實驗和識別皆能重複，如首先固定手腕取向，然後於識別主軸線時包括手腕旋轉。

【0211】 需要多種配置和載荷條件方能執行所有未知參數之識別。每個實驗給出一個關係(14)。所有的實驗均可依據於相同之方程組中進行處理

$$\begin{bmatrix} {}^1K & 0 \\ {}^1P & N \\ {}^1J_u & {}^1J \\ \vdots & \vdots \\ {}^nK & 0 \\ {}^nP & N \\ {}^nJ_u & {}^nJ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1u \\ {}^1q \\ \vdots \\ {}^nu \\ {}^nq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1F \\ {}^1\theta_q \\ {}^1J \quad {}^1q_z \\ \vdots \\ {}^nF \\ {}^n\theta_q \\ {}^nJ \quad {}^nq_z \end{bmatrix} \quad (19)$$

【0212】 其中左上標表示實驗指數， n 表示實驗之總數，即對應獨特姿勢之總數。

【0213】 可根據 WO2015030650 中揭示方法以識別未知參數。WO2015030650 中之函數 S ，方程式(12)現定義為方程式(14)之左邊與方程式(14)右邊之向量 F 。利用此些定義，WO2015030650 中方程式(13)-(16)所揭示之相同方法可用於識別。

【0214】 在一維情況下，如第9a圖所示，不可能僅憑測量馬達轉矩和馬達角度而識別所有參數。此係有三個剛性元件串聯連接，需要至少一額外的測量以識別它們。然而，在二維和三維情況下，可改變夾緊配置，從而改變機械手2之配置。此將導致剛度元件受到不同之激勵，因此剛度參數便能識別是否使用足夠之夾緊配置。

【0215】 對於六個自由度之機械手2，如顯示於第1圖，變形參數之數

量 n_u 為72， n 個實驗未知總數則為 $n_a n_k + 66 \cdot n$ ，包括未知關節角度 q (僅測量馬達角度 θ_q)。六個自由度機械手之伸縮自由度數 n_a 通常為49，若假設剛度參數為線性，則 n_k 為1，未知參數之總數將為 $49 + 66 \cdot n$ 。每個夾緊實驗給出84個方程式，因方程式數量須大於待解析未知數之數量，是以至少需 $n = 3$ 個實驗。然而，因存在干擾和建模錯誤，因而需要更多些實驗。於具有 $n = 10$ 正常情況下，方程式(19)將有840行78列。

【0216】 第10圖中顯示以工業機器人1(第1圖)執行夾緊實驗之範例。控制機械手2每個關節以於兩個位置間緩慢移動。於此實驗之任何測量數據可用於剛度識別前，須處理非線性效應。此包括能藉由將馬達轉矩之平均值為正，負關節方向運動而予以消除之摩擦。其一個例子可見第10圖中之虛線。亦即，垂直轉矩方向上漸近部分之平均值對於每個軸之每個方向形成虛線。當馬達轉矩開關時亦有一無效運動，其能視為正、負馬達轉矩之摩擦補償馬達轉矩(虛線)，且於零馬達轉矩係不相交。因此，於零轉矩處之虛線定義每一相應關節之間隙。能藉相同方式移動馬達角度以補償該效果，然對於正、負馬達轉矩都有不同之符號(換檔操作未顯示於第10圖)。若馬達轉矩和馬達角度間之關係係為線性，則僅需在(10)中基函數1具有一個項目，即線性剛度參數。然若能識別非線性行為，則需如(10)所述之非線性擴展。(14)中 θ_q 表示之摩擦補償馬達轉矩和轉動馬達角度係用於剛度識別。

【0217】 因此，根據一個實施例，該方法包括自動確定機械手2之連桿和關節之順應性分佈。根據一實施例，該方法包括藉在提供順應性分佈相同之優化中識別非線性函數數學擴展之參數，以確定之非線性剛度。

【0218】 在確定非幾何參數之情況下，至少基於機械手2名義幾何之初始值，確定動態參數可作為步驟A5之另一部分予以執行。如前所述，機器人1包括具有一組動態參數之動態模型，因此用於執行幾何校準之運動可直接作為該方法之一部分進行編程。

【0219】 自監測數量選擇有條件之細分，以避免已知之不確定性。監測數據的數據可能會減少。此外，複數馬達之馬達摩擦影響可被移除。然後將監視量之數據轉換至機械手2之關節側。為識別一組動態參數，應提供第一關節模型，連桿模型和對應關節數量，如關節位置和馬達轉矩。其可從先前校準中容易獲得。

【0220】 當機械手2連接至限制裝置4的雙球桿機構時，機械手2之運動將如第1圖和第2圖所示沿著球體被機械地限制。該球體將具有將限制裝置4之雙球桿機構固定於環境(更準確地說，於第二球窩關節19之水平自由接頭的中心)之中心，且球體半徑係設置為限制裝置4之雙球桿機構4之長度(從第二球窩關節19的水平自由接頭中心至第一球窩關節17的十字接頭中心)。機械手2之末端效應器定義為第一球窩關節17之十字接頭的中心，則可建立以下關係式：

$$(x_{ee} - x)^2 + (y_{ee} - y)^2 + (z_{ee} - z)^2 + l^2 = 0 \quad (20)$$

【0221】 其中 (x, y, z) 係為第二球窩關節19之水平自由接頭的中心， l 為限制裝置雙球桿機構之長度。該關係可用於校準動態參數值 x_{kin} ，藉移動機械手2至球體上之多個位置並找到與關係(20)一致之參數 x_{kin} 。此係能藉定義成本函數予以執行。

$$f_{cost}(x_{kin}, x, y, z, l) =$$

$$\sum_{i=1}^m \left((x_{ee}(^i q, x_{kin}) - x)^2 + (y_{ee}(^i q, x_{kin}) - y)^2 + (z_{ee}(^i q, x_{kin}) - z)^2 - l^2 \right)^2 \quad (21)$$

【0222】 其中 $\{^i q\}_{i=1 \dots m}$ 係自於機械手2連接至限制裝置4之雙球桿機構時已執行球面運動之實驗中，於 m 個總採樣位置中測量之關節位置。第二球窩關節19之水平自由接頭的中心位置，以及限制裝置4之雙球桿機構長度若未先前確定，則亦為可能需識別之未知參數。

【0223】 因末端效應器之取向係不受限制，成本函數僅考慮末端效應器之笛卡爾位置(Cartesian position)。然而，能藉由將傳感器嵌入限制裝置4之雙球桿機構內以測量末端效應器之取向。然後可於成本函數中增加額外之條件(21)。

【0224】 由於當機械手2以球面上的萬向中心點移動時，(21)中之參數係非確知，是以機械手2將迫留於球體上，而可能會受到較大之力。或者，當採用第3-6圖中所示多個固定點實施例中之任何一個時，夾緊可能會產生很大之力。此些力將會使機械手2變形，倘若無法處理此效應，則將降低幾何校準之精度。在(3)中之 K ，剛度識別將導致機械手2之全局剛度矩陣，且馬達轉矩將可計算(3)右側之 F 。可從(3)與機械手2基部連桿10無變形之邊界條件(即，3維情況下 u 的前六個要素須為零)以計算變形 u 。藉已知之 u ，應該使用順應性正向動態 $f_{compliant}$ ，即亦考慮機器人變形之正向動態函數。

$$f_{compliant}(q, x_{kin}, u) = \begin{bmatrix} R_u & p_u \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

【0225】 R 與 p 之下標 u 表示變形已考慮在內。現在末端效應器之笛卡爾位置由下式給出

$$p_u = \begin{bmatrix} x_{ee,u} \\ y_{ee,u} \\ z_{ee,u} \end{bmatrix} \quad (23)$$

【0226】 於此在成本函數(21)中使用末端效應器之變形位置，即用 $x_{ee,u}$ 代替 x_{ee} ，用 $y_{ee,u}$ 代替 y_{ee} ，用 $z_{ee,u}$ 代替 z_{ee} 。

【0227】 成本函數(21)中未知參數值能藉最小化獲得。標準技術能用來執行實際優化，如牛頓或高斯牛頓法。

【0228】 最小化成本函數(21)時，存在縮放不確定性。所有長度參數可以相同參數進行縮放且仍然滿足關係式(20)。為了解決方案，需假設一距離已知。實現方法係測量限制裝置4之雙球桿機構之長度。另一種可能性係測量球體上兩個不同位置間之相對距離，並使用其以固定縮放。

【0229】 剛度識別程序有賴於機械手2之動態參數以固定變形及剛度參數之縮放。當在動態校準步驟中更新動態參數時，可能需要重新識別剛度參數，即需要重新執行識別過程，但不需要新的實驗。在所有實際情況下，因能使用名義參數，動態參數變化都會很小。因此，對剛度識別方程式之影響將非常小(動態參數之小變化將導致雅可比非常小之變化)，且剛度參數之變化也將非常小。一旦剛度模型參數已更新，則可能需要重新確定動態參數。於每次迭代中，參數變化將變得越來越小，且於幾次迭代中收斂。

【0230】 為舉例說明動態參數之識別，進行第1圖中機器人之理想模擬。以高采樣率記錄機器人於球形表面上之運動，然最初為加快識別過程，僅使用少數樣品進行鑑定。然後將識別之參數插入至成本函數(21)中，並評估所有記錄之樣本。成本函數值對用於識別之樣品而言非常低，但對未用

於鑑定之樣品部分，成本函數值則非常大。將具有最大成本函數值之樣品增加至鑑定樣品中，並重新鑑定。重複此過程，直至所有記錄樣本之成本函數變低。最初使用十個樣品進行鑑定，每次迭代增加十個樣品。在總共1000個記錄之樣品中，使用50個樣品進行鑑定時，鑑定的參數係令人滿意。低成本函數表示優化問題之小殘差。根據一些實施例，該方法包含迭代步驟A2至A4，其中直到調整該至少兩個軸上之載荷，對於每次迭代A2中之該組目標姿勢係為相同或改變，使其致使低於對應於一特定機器人精度之預定水平的該識別之一殘差。

【0231】 該方法更包含一步驟A5，基於所識別的該動態模型之該組動態參數，確定順應機械手之該至少一幾何性質。此係可藉由簡單地從動態模型所識別之該組動態參數中提取至少一個幾何性質來完成。其亦可包括某些計算或估計以從所識別的該動態模型之該組動態參數，準確地確定該至少一幾何性質。

【0232】 由於存在機械手許多不同的數學表示，其中先前描述之旋量表述為其一，方程式(1)-(5)可用於描述末端效應器之運動，方程式(5)和(22)則為可能需對(21)最小化之轉換。此一轉換將導致將旋量表述轉換為DH表述。旋量表述間之映射係非一對一映射，而係導致能更新標準DH運動表述一個或多個參數之參數。

【0233】 不同品牌之控制系統3和控制器採用不同之幾何性質。由於本方法之通用特徵，能選擇並轉換所識別之幾何性質，使所確定之至少一個幾何性質能用於更新機械手2之額定動態參數。其能用於更新相同機械手2之額定動態參數，若執行該方法或用於更新相同類型的另一機械手之額定

動態參數。所確定之該至少一個幾何性質係用於更新該機械手2之一機器人程序或運動控制參數。

【0234】 以下說明關於模擬工業機器人理想情況所提出之方法。在此情況下，ABB IRB140因其無平行連桿22而較第1圖中之機器人簡單。名義扭曲參數見表1：

關節	扭曲					
1	0	0	0	0	0	1
2	-0.352	0	0.07	0	1	0
3	-0.712	0	0.07	0	1	0
4	0	0.712	0	1	0	0
5	-0.712	0	0.45	0	1	0
6	0	0.712	0	1	0	0

【0235】 表1：模擬中使用ABB IRB140模型之名義扭曲參數。長度單位為[m]。

【0236】 且給出 g^0 ：

$$g^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.515 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0.712 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

【0237】 模擬中使用之實際扭曲參數見表2(下文)。在模擬中考慮具有未知夾緊點的情況，因此不可能識別第一關節之參數，而假設其係為已知。進一步假設 g^0 與馬達偏移係為已知。

【0238】 在此模擬作業中，將第一個角度偏移件附接至機器人端部凸緣，並將第一個工具交換器附接至該角度偏移件，而此一組合即對應於第

3-6圖所示之工具交換器組件41，其中該第一個角度偏移件和該第一個工具交換器之組合變換矩陣為：

$$T_{offset1} = \begin{bmatrix} 0.86603 & 0 & 0.5 & -0.005 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.5 & 0 & 0.86603 & 0.06 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

關節	扭曲					
1	0	0	0	0	0	1
2	-0.35198	-0.00070	0.07000	0	0.99995	0.01000
3	-0.712	0	0.071	0	1	0
4	0	0.72126	0	0.99995	0	0.01000
5	-0.70847	0.07085	0.47767	0.09950	0.99504	0
6	0	0.712	-0.01	1	0	0

【0239】 表2：模擬中使用ABB IRB140模型之實際扭曲參數。長度單位為[m]。

【0240】 於該第一個工具交換器後方，增加具一工具更換器之第二個角度偏移件（如圖5b中位於下方之角度偏移件45），其具有轉換矩陣

$$T_{offset2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26A)$$

【0241】 第二個角度偏移件上之工具更換器（如圖5b中位於下方之工具更換器46a）被附接至由剛性地附接之機器人的工作空間中工具連接器（如圖5b中位於下方之工具連接器46b）所定義之夾緊點上。在此，該工具更換器和該工具連接器共同構成第二個工具交換器（如圖5b中位於下方之工具更換器46a及工具連接器46b組合而成的工具交換器，即如圖4b中的工

具交換器46)。夾緊點在機器人之基座坐標系中進行以下變換：

$$T_{cp} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0.45 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26B)$$

【0242】 假設第一個和第二個工具交換器的每一者皆能鎖定於八個不同之配置中，每一配置為繞各別工具交換器z軸之45度旋轉分開。兩個工具交換器之使用致使機器人凸緣之總共64個不同之固定夾緊點。然而，機器人可能因給定關節限制未達到所有64個位置，必須放棄22個點。

【0243】 於理想條件下進行第一次模擬，即無雜訊測量。所得之參數估計誤差為：

$$\| \hat{x}_{twist} - x_{twist} \| = 3.2713 \cdot 10^{-7}, \quad \| \hat{T}_{cp} - T_{cp} \| = 3.8032 \cdot 10^{-7} \quad (27A)$$

【0244】 其中扭曲參數估計誤差範數係為歐幾里德2範數，夾緊點變換矩陣估計誤差範數則為弗羅貝尼烏斯範數(Frobenius norm)。扭曲參數之初始估計係為表1中之名義值，其給出初始估計誤差為0.1239。具有識別參數機器人凸緣之平均位置誤差(RMS)為0.00001mm。

【0245】 在第二次模擬中，將測量雜訊加至測量之關節角度上。雜訊係為正常分佈，馬達側(齒輪箱前)標準偏差為0.5°。於此模擬中產生之參數誤差為：

$$\| \hat{x}_{twist} - x_{twist} \| = 1.438 \cdot 10^{-3}, \quad \| \hat{T}_{cp} - T_{cp} \| = 4.6454 \cdot 10^{-4} \quad (27B)$$

【0246】 雜訊顯著降低了估計性能。機器人凸緣之平均位置誤差為0.07mm。

物理實例

【0247】 馬達偏移量，即關於測量馬達角度之零關節角度定義係為幾何參數特別重要之子集。除完成幾何校準之外，無論何時需要更換機器人關節馬達或變速器，確定馬達偏移為工業機器人使用中最常見之維修情況。對應此需求，如第1-6圖所示，採用ABB IRB2400機器人進行一個範例實驗。為明確起見，雖然此範例過於簡單而忽略完整動態，從而省略使用方程式21和22優化之識別。目的是實現相對於先前馬達位置的新馬達偏移之高重複性，使得機器人可在使用後恢復其任務而無需調整程序姿勢。

【0248】 一般而言，使用如第1-2圖所示之限制裝置4可用以支援確定完整之幾何參數集合，使得在整個工作範圍內實現完全之精度，而如第3-6圖所示之限制裝置4可用來為限制裝置4所在之工作空間部分提供準確之參數。於後者情況下，兩個非幾何參數，如剛度和幾何參數，若馬達偏移，皆可於相同之夾緊姿勢集中予以識別。對維修案例進一步簡化係僅具有包括一個對接點(如由第二限制件43定義之夾緊點)之限制裝置，或等效地於工作空間中固定位置處及於機械手2上分別具有兩個配合部件（分別為46a與46b）。此係本範例中包括角度偏移件45之設置。

【0249】 同樣地，在應用中機械手不配置工具交換器的情況，若對末端效應器重量和找尋機制(在46a內未顯示)之供氣更為實用，則配合部件46a和46b可被交換(即交換位置)。利用此附加夾緊裝置，通常無需角度偏移件45，因為夾緊點憑機械手2之端部凸緣44將有些有用之偏移。

【0250】 需修復前，藉夾緊於所述工作區域之固定位置，為機器人本地定義參考姿勢(無需了解絕對外部參考中之位置)。藉由安裝新馬達同一位置之重複夾緊實驗，馬達偏移識別將以更換馬達之偏移量除以前值鎖定。

該過程進行數次以測試重複性。

【0251】 具體而言，用夾緊機構機械地使用工具更換器46a以四種不同之姿勢將機器人夾緊(A1)。此外，藉由將第四關節14轉動180度，並轉動關節五15和關節六16，以達到相同之目標姿勢，允許另外四個構造從而形成總共八個不同構造。原則上，僅用這八種配置中之一種即足夠，當使用僅允許一取向之交換器時亦此，惟藉使用所有八個配置，利用平均可減少潛在錯誤。

【0252】 在工具交換器46內藉多個取向具有多個夾緊點之另一好處係即使一些夾緊之姿勢，所揭示方法不適合識別，該方法亦能良好運作。於此該示例中，證明八個夾緊配置中之兩個由於接近單一配置而不合適。雖然所揭示方法原理上亦接近或以奇異之配置運作，然至少對於理想機器人而言，更好地調整識別，使得於應用程序內摩擦感知控制不受因不發生奇怪載荷情況額外的摩擦和順應性效應之影響。為能獲得馬達角度完整分辨率之平滑運動，關節伺服係配置具有順應性，然其代表於奇異點附近過大之偏差(由於關節幾乎對準表現出大轉矩)。有用姿勢(於此情況下為六個)之選擇可基於名義動態自動化，且此些偏差由馬達信號維持，但於所涉及軸之轉動中簡單地觀察到這兩個配置接近於一些奇異點，因此手工排除此些姿勢。

【0253】 藉命令機械手接近所選擇六個目標姿勢(A2)中之每一個進行識別，然後於實現往復運動之同時激活所提及伺服順序進行摩擦感知控制，隨後控制於關節中點處之零轉矩零點(A3)。然後根據適用於完整運動學識別(A4)之縮放和表示，將獲得之監視馬達位置(機械地藉順應性控制)反映

彈性行為用於識別馬達偏移。然後，確定由該特定控制器3定義獲得之馬達偏移(A5)並輸入至系統中。此後，根據使用者程序之動作係與變更前之操作基本相同。

【0254】 藉於機器人工作空間中具有固定之夾緊點，揭示方法亦適用於機器人之放置，關節0之更換(機器人腳，通常包括關節1之機構)，及識別關節1之馬達偏置。對於早期方法，幾何性質係確定與保持分離之問題。於此對於所有實驗，假設夾緊點處於相同位置，針對每個關節之平均絕對誤差(MAE)，藉8組不同之實驗平均，馬達重新識別之重複性係顯示於馬達側單位為度數之下表：

關節	J1	J2	J3	J4	J5	J6
平均絕對誤差	0.05	0.19	0.07	0.02	0.08	0.08

【0255】 除了關節2，此些誤差中每一個對應於此類機器人之機器人凸緣處小於0.04mm之最大笛卡爾誤差，比一般要求要好上10倍(由於實際早期方法之限制)。所有夾緊構造對於第二軸(第1圖中之12，上表中之J2)而言並非最佳，其加載固定住的第二限制件43於其最靈活之方向上涉及軸線3之平行桿22的運動。能機械地提供關節2之更優化配置結果係足夠；我們認為其他關節係為該方法之代表。給定控制器3之性質，如由電機角度傳感器之分辨率，可能精度係存在理論之限制。於此範例中，關節四(表中之J4)達到理論上之可能極限，其他關節亦非常接近該極限。

【0256】 使用前述方法，可藉對每一機器人關節進行測量以獲得可接受之精度，用於基於轉矩或位置之馬達偏移檢測，惟該儀器價格實非揭示

方法所需。此外，在大多數機器人系統中，剩餘之錯誤要大得多且取決於維修工程師之技能。更重要的是，倘若更換了多台馬達或其他機器元件，則關節錯誤(如上表所示)將會是相加的。藉由所揭示方法，誤差不會疊加，從而實現在末端效應器之最佳精度。

【符號說明】

- | | |
|----|-----------|
| 1 | 系統 |
| 2 | 機械手 |
| 3 | 控制系統 |
| 4 | 限制裝置 |
| 5 | 工具交換器 |
| 10 | 基座連桿 |
| 11 | 連桿 |
| 12 | 連桿 |
| 13 | 連桿 |
| 14 | 連桿 |
| 15 | 連桿 |
| 16 | 連桿 |
| 17 | 第一球窩關節 |
| 18 | 桿 |
| 19 | 第二球窩關節 |
| 20 | 處理器 |
| 21 | 計算機可讀存儲單元 |
| 22 | 平行連桿 |
| 31 | 第一關節 |
| 32 | 第二關節 |
| 33 | 第三關節 |

- 34 第四關節
- 35 第五關節
- 36 第六關節
- 41 工具交換器組件
- 42 第一限制件
- 43 第二限制件
- 44 端部凸緣
- 45 角度偏移件
- 45a 附接邊
- 45b 附接邊
- 46 工具交換器
- 46a 工具更換器
- 46b 工具連接器
- 47 延長偏移件
- 47a 第一延長附加邊
- 47b 第二延長附加邊
- 48 底座
- 49 第三限制件
- 51 連接連桿
- 52 十字軸
- 53 鉸鏈
- 54 連接器

- 61 第一軸線
- 62 第二軸線
- 63 第三軸線
- 64 第四軸線
- 65 第五軸線
- 66 第六軸線
- A1-A5 步驟
- B1-B5 自由度

【生物材料寄存】

國內寄存資訊【請依寄存機構、日期、號碼順序註記】無

國外寄存資訊【請依寄存國家、機構、日期、號碼順序註記】無

【序列表】無(請換頁單獨記載)

申請專利範圍

1. 一種用以決定一機械手至少一幾何性質的方法，其影響該機械手之末端效應器運動，並受到摩擦效應的作用，其中該機械手設置成由一控制系統所控制，以移動該機械手之一末端效應器至目標姿勢，其中該機械手包含至少兩個軸，其至少一軸具有至少一伸縮性，該方法包含：
(A1)藉由一限制裝置限制該機械手的運動，以物理地限制該機械手的運動在至少一個自由度，從而實現一受限的機械手運動與對應地該至少一個軸的一受限的馬達運動；
(A2)命令該機械手接近一組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行包括非零受限的馬達運動之該受限的機械手運動；
(A3)執行該受限的機械手運動的摩擦感知控制一段時間以實現明確定義之摩擦力/轉矩，其可與該摩擦效應分離區隔，同時監測與一馬達轉矩和該至少一個軸的馬達角度相關的量；
(A4)執行對一彈性動態模型之一組動態參數之識別，該模型包括表示該至少一伸縮性之至少一個已知量，該識別係基於該監測的量和該機械手的彈性性質，其中該摩擦效應自該識別排除；
(A5)基於所識別的該動態模型之該組動態參數，確定該機械手之該至少一幾何性質。
2. 如申請專利範圍第 1 項的方法，其中(A1)限制該機械手的運動包含將該機械手的一連桿連接至該限制裝置。
3. 如申請專利範圍第 1 項或第 2 項的方法，其中該組目標姿勢包含該末端效應器複數個不同的取向和位置。

4. 如申請專利範圍第 1 項的方法，包含藉由以包含該至少一個軸的間隙之往復運動控制該至少一個軸，以(A3)執行該摩擦感知控制。
5. 如申請專利範圍第 1 項的方法，包含由於該至少一個伸縮性影響該至少一個軸線，(A2)命令該機械手接近該組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行該受限的機械手運動，以及控制該至少一個軸線於包含對應於任何(可能非零)間隙中間之中點的一往復運動，同時忽略摩擦效應，以(A3)執行該摩擦感知控制。
6. 如申請專利範圍第 1 項的方法，包含由於該至少一個伸縮性影響該至少一個軸線，(A2)命令該機械手接近該組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行該受限的機械手運動，以及控制該至少一個軸線於包含一重力載荷點的一往復運動，使得該至少一個軸線到達該重力載荷點，以(A3)執行該摩擦感知控制。
7. 如申請專利範圍第 1 項的方法，包含藉由該控制系統自動執行該方法的一個或多個步驟。
8. 如申請專利範圍第 1 項的方法，其中機械手運動係指藉由一工具交換器安裝到該機械手的一端部凸緣上之末端效應器運動，且其中末端效應器性質係為先前已知，其中限制該機械手的運動係包含將該機械手對接至提供機械介面之該限制裝置，作為該工具交換器。
9. 如申請專利範圍第 1 項的方法，其中該至少一個幾何性質係與該機械手之一外圍設備相關，該外圍設備包含被該機械手之運動影響之至少一連桿。
10. 如申請專利範圍第 1 項的方法，其中該限制裝置之彈性性質係為已知。

11. 如申請專利範圍第 1 項的方法，其中(A1)限制該機械手的運動係包含將該機械手夾緊到至少一個夾緊點，該至少一個夾緊點之位置和/或取向係為未知。
12. 如申請專利範圍第 1 項的方法，其中(A1)限制該機械手的運動係包含偏移安裝在該機械手之一工具交換器，使得該工具交換器之旋轉軸線與該工具交換器連接的該機械手之連桿之該旋轉軸線不平行。
13. 如申請專利範圍第 1 項的方法，包含迭代該命令步驟(A2)及該執行步驟(A4)，其中直到調整該至少兩個軸上之載荷，對於每次迭代中該命令步驟(A2)中之該組目標姿勢係為相同或改變，使其致使低於對應於一特定機器人精度之預定水平的該識別之一殘差。
14. 如申請專利範圍第 1 項的方法，其中所確定之該至少一個幾何性質係用於更新該機械手之額定動態參數。
15. 如申請專利範圍第 1 項的方法，其中所確定之該至少一個幾何性質係用於更新該機械手之一機器人程序或該機械手之運動控制參數。
16. 一種用以決定一機械手至少一幾何性質的系統，其影響該機械手之運動，其中該系統包含一控制系統，該機械手設置成由該控制系統所控制，以移動該機械手之一末端效應器至目標姿勢，其中該機械手包含至少兩個軸，其至少一軸具有至少一伸縮性，並受到摩擦效應的作用，其特徵在於，藉由一限制裝置限制該機械手的運動，以物理地限制該機械手的運動在至少一個自由度，從而實現一受限的機械手運動與對應地該至少一個軸的一受限的馬達運動，其中該控制系統係設置成：命令該機械手接近一組目標姿勢，對於每個目標姿勢構成一物理姿勢，其中可以執行包括非零受限的馬達運動之該受限的機械手運動；

執行該受限的機械手運動的摩擦感知控制一段時間以實現明確定義之摩擦力/轉矩，其可與該摩擦效應分離區隔，同時監測與一馬達轉矩和該至少一個軸的馬達角度相關的量；

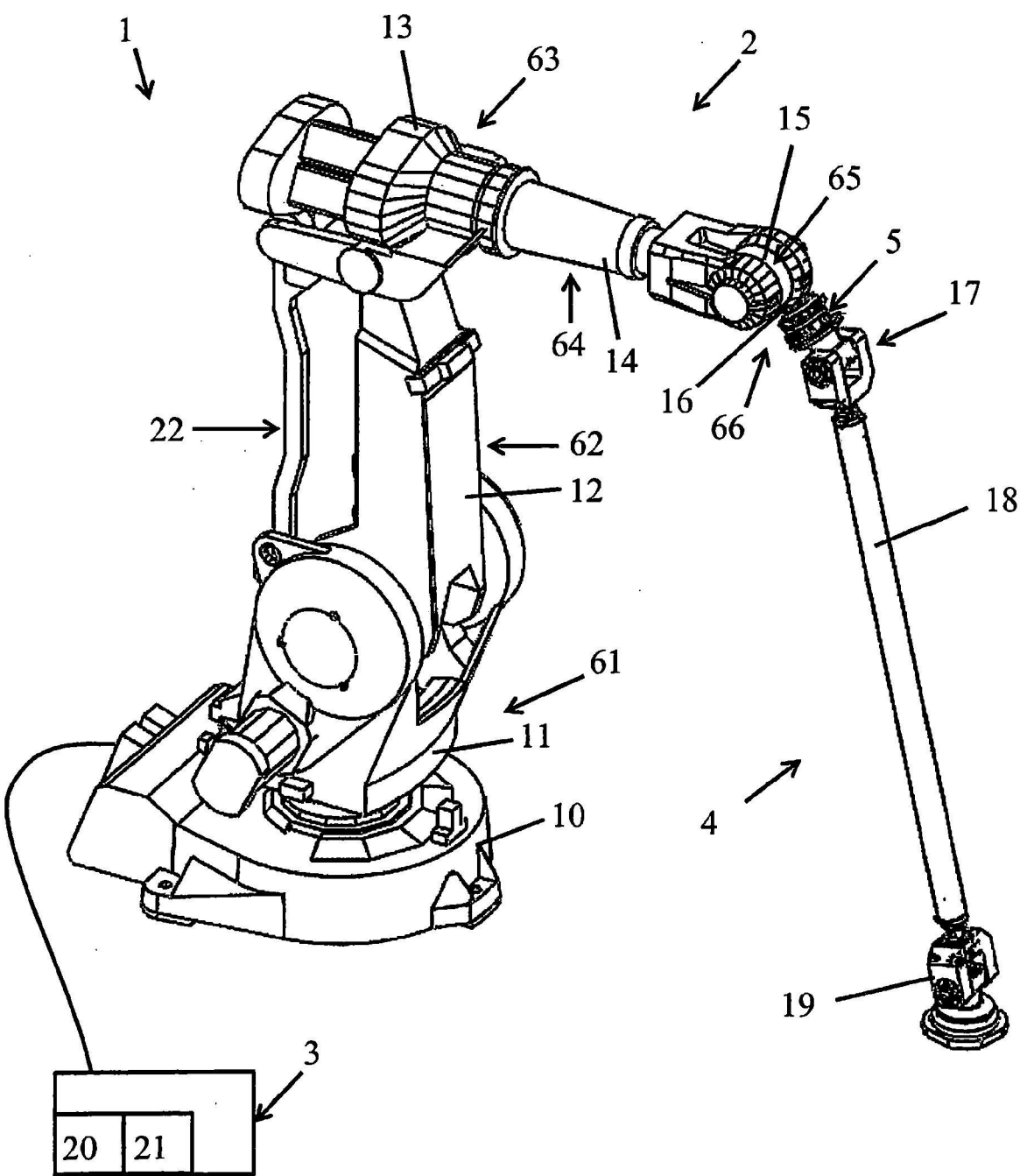
執行對一彈性動態模型之一組動態參數之識別，該模型包括表示該至少一伸縮性之至少一個已知量，該識別係基於該監測的量和該機械手的彈性性質，其中該摩擦效應自該識別排除；

基於所識別的該動態模型之該組動態參數，確定該機械手之該至少一幾何性質。

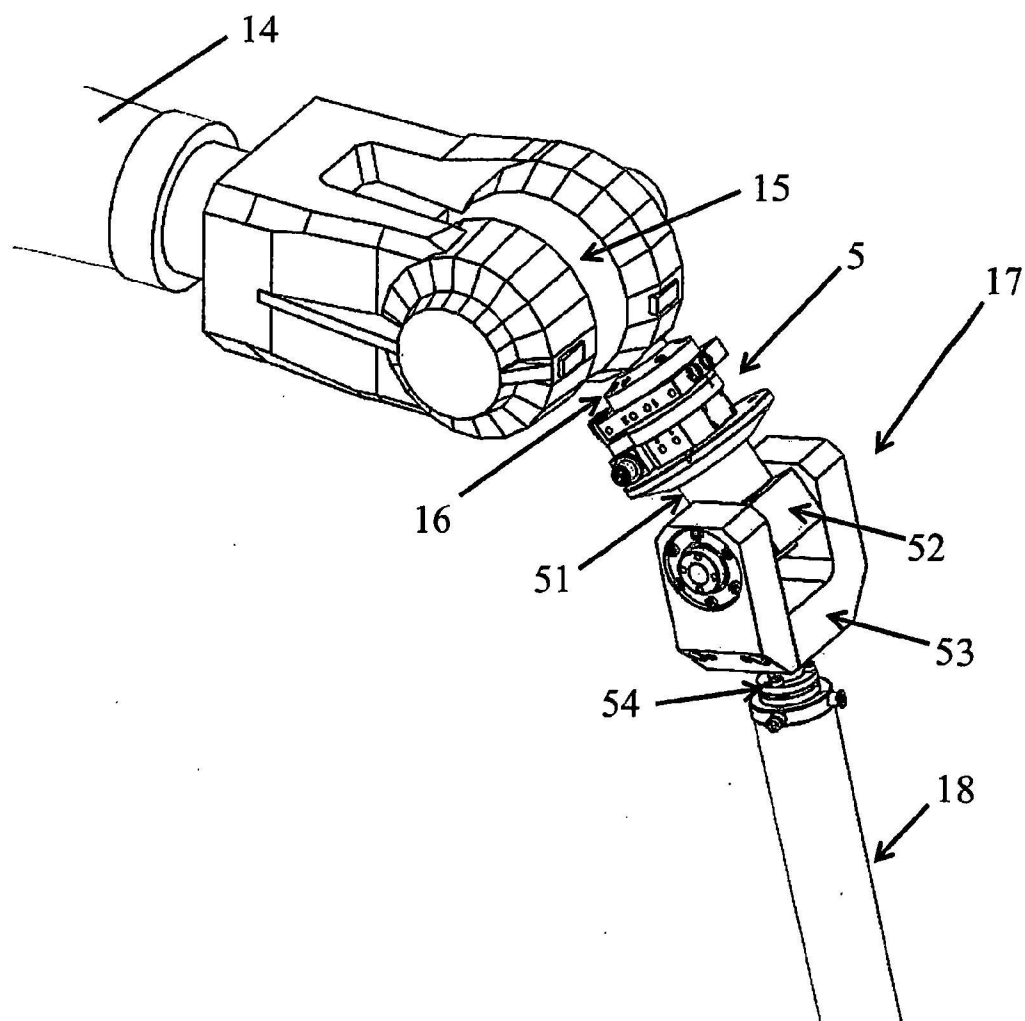
17. 如申請專利範圍第 16 項的系統，其中該限制裝置係設計成具有至少一個夾緊點，以用藉由將該機械手夾緊至該至少一個夾緊點，以限制該機械手的運動。
18. 如申請專利範圍第 16 項或第 17 項的系統，其中該限制裝置係提供一機械介面，做為具有一個夾緊點之一工具交換器。
19. 如申請專利範圍第 18 項的系統，其中該工具交換器係支撐複數個對接方向。
20. 如申請專利範圍第 18 項的系統，其中該限制裝置係包含安裝以偏置該工具交換器之一偏移件，使得該工具交換器之旋轉軸線與該工具交換器連接的該機械手之一連桿之該旋轉軸線不平行。
21. 如申請專利範圍第 18 項的系統，其中該至少一個夾緊點之相應位置和取向係為未知。
22. 一種限制裝置，係適合應用於申請專利範圍第 16 項之該系統，用於限制該機械手之運動，其中該限制裝置包含複數個夾緊點，且其中該限制裝置係設置成自動地安裝於該機械手和該機械手之工作空間中的固定點之間。

23. 如申請專利範圍第 22 項的限制裝置，其中該限制裝置提供一機械介面，做為工具交換器組件，界定第一夾緊點，以供透過夾持而安裝於該機械手上。
24. 如申請專利範圍第 23 項的限制裝置，包含該工具交換器組件的一工具連接器或工具更換器。
25. 如申請專利範圍第 22 項至第 24 項中任一項的限制裝置，包含工具交換器的一工具連接器或工具更換器，用以將該限制裝置安裝於該機械手之工作空間中的該固定點。
26. 如申請專利範圍第 22 項的限制裝置，其中該限制裝置提供角度偏移，且其中該限制裝置係設置成透過夾持而安裝於該固定點。
27. 如申請專利範圍第 22 項的限制裝置，其中該限制裝置設有鎖定機構，用以將該限制裝置鎖固於該機械手及該固定點。
28. 如申請專利範圍第 22 項的限制裝置，其中該限制裝置包含具有至少一個夾緊點之一限制件。
29. 如申請專利範圍第 22 項的限制裝置，其中該限制裝置係包含設計有相對之非平行的第一附加邊與第二附加邊之一角度偏移件。
30. 如申請專利範圍第 22 項的限制裝置，其中該限制裝置係包含具有第一延長附加邊與第二延長附加邊之一延長偏移件。

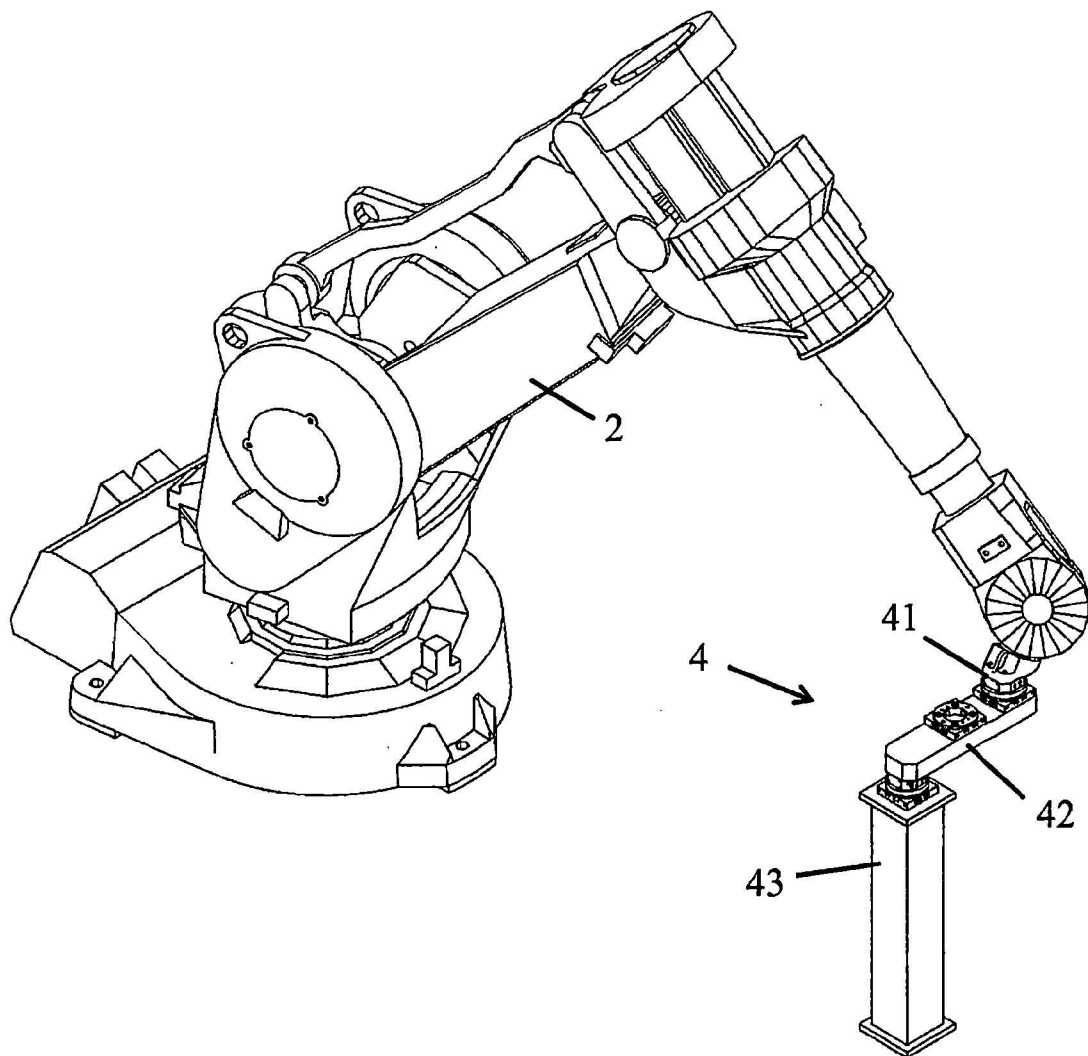
圖式



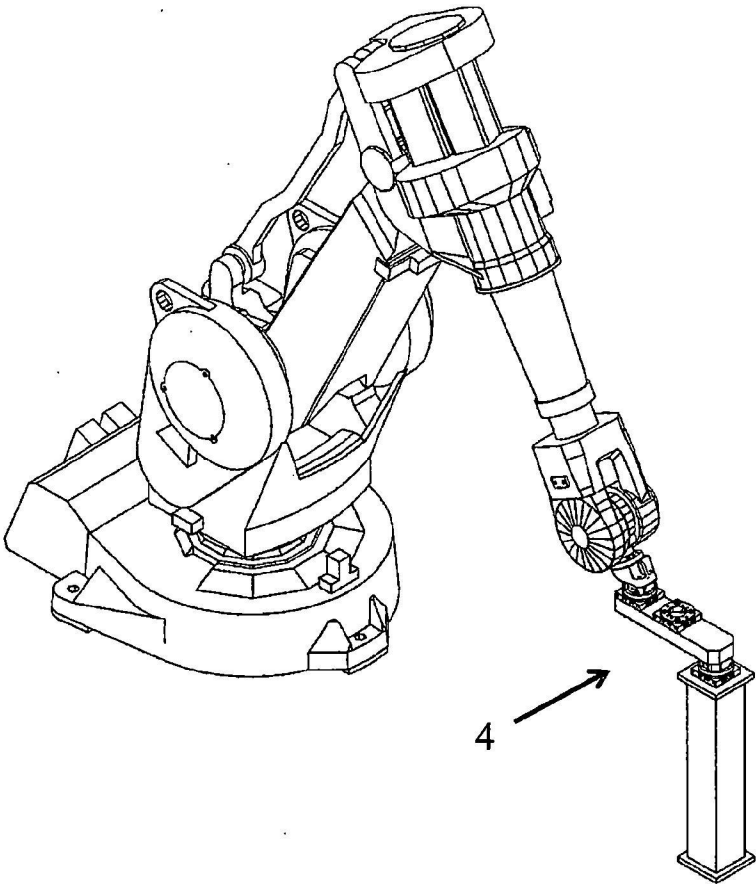
第1圖



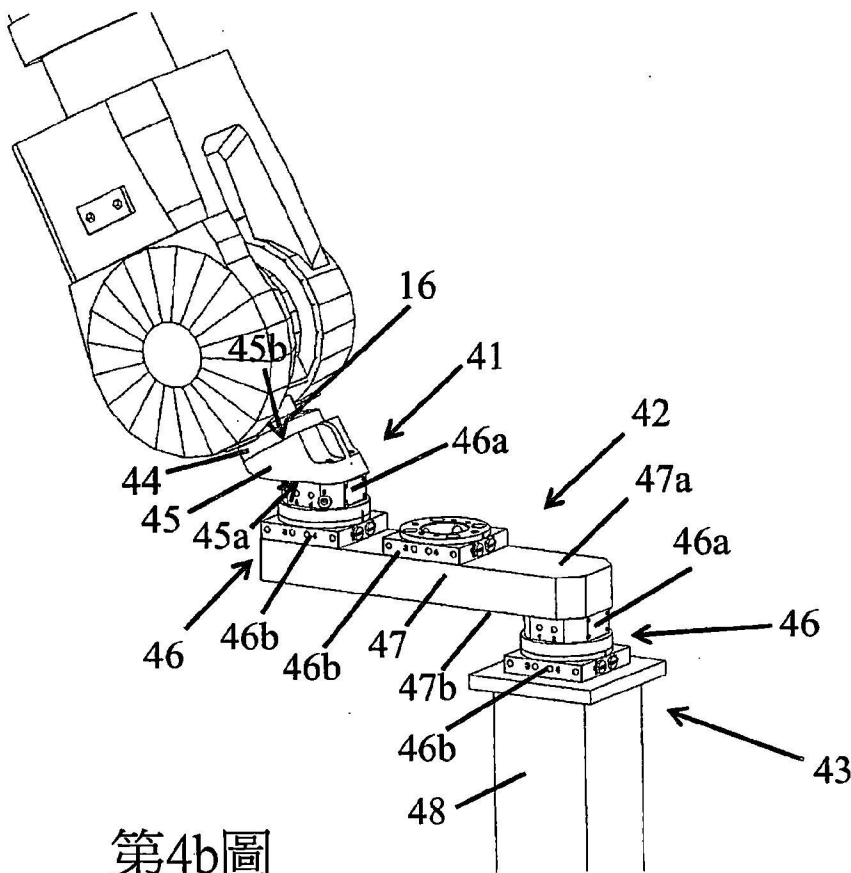
第2圖



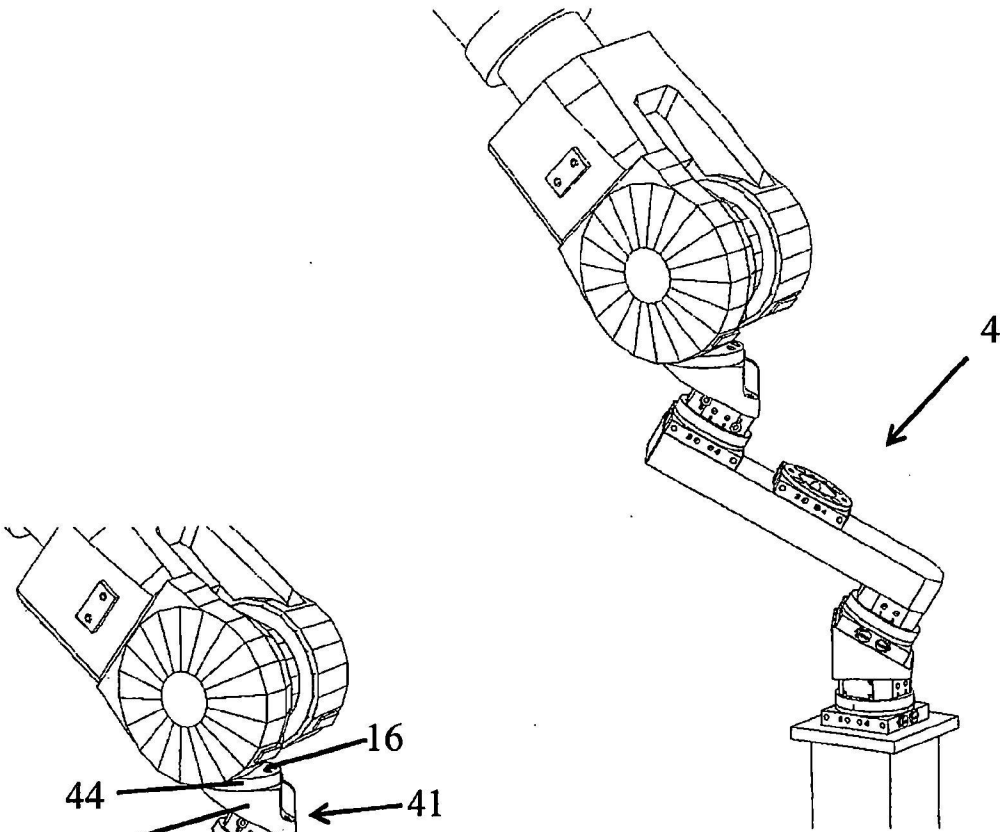
第3圖



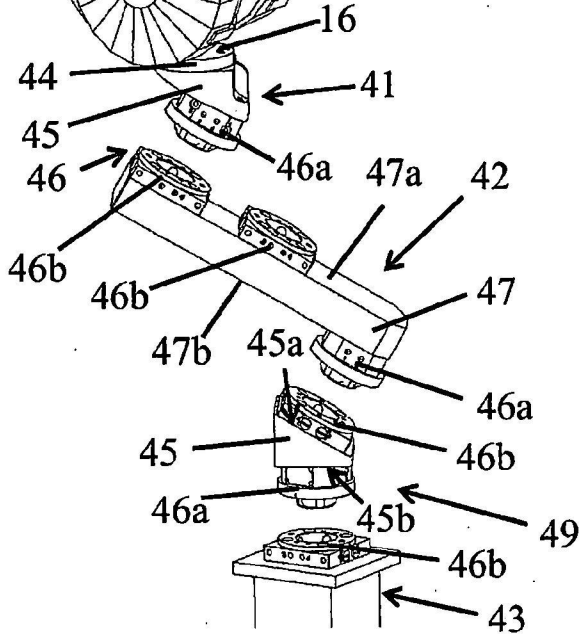
第4a圖



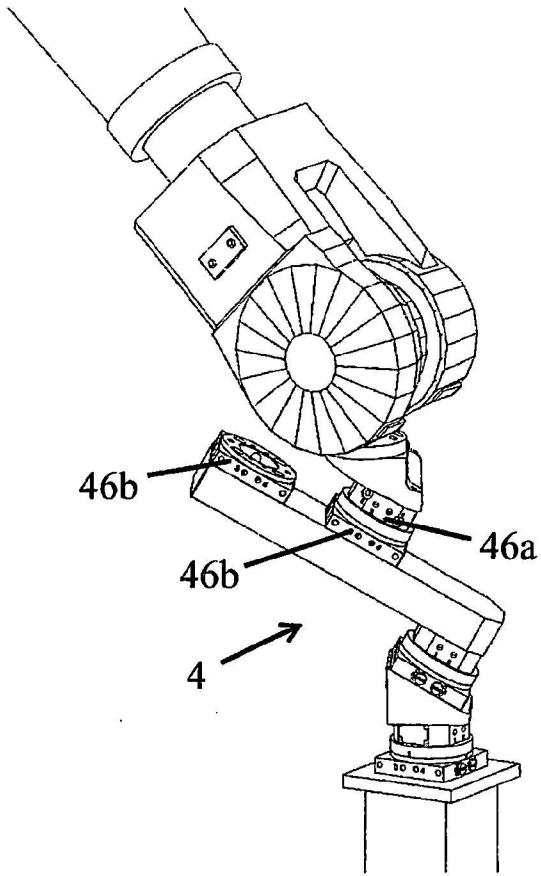
第4b圖



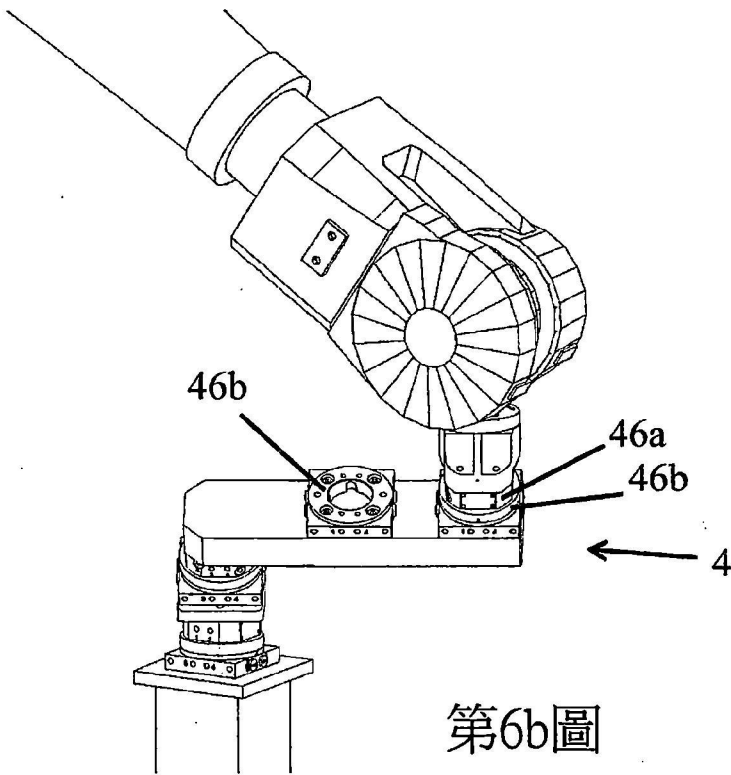
第5a圖



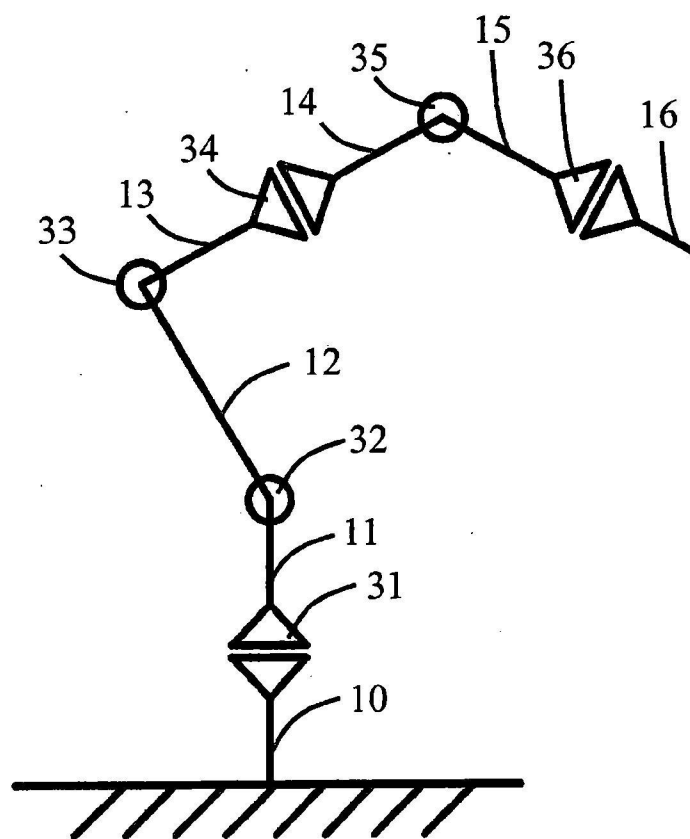
第5b圖



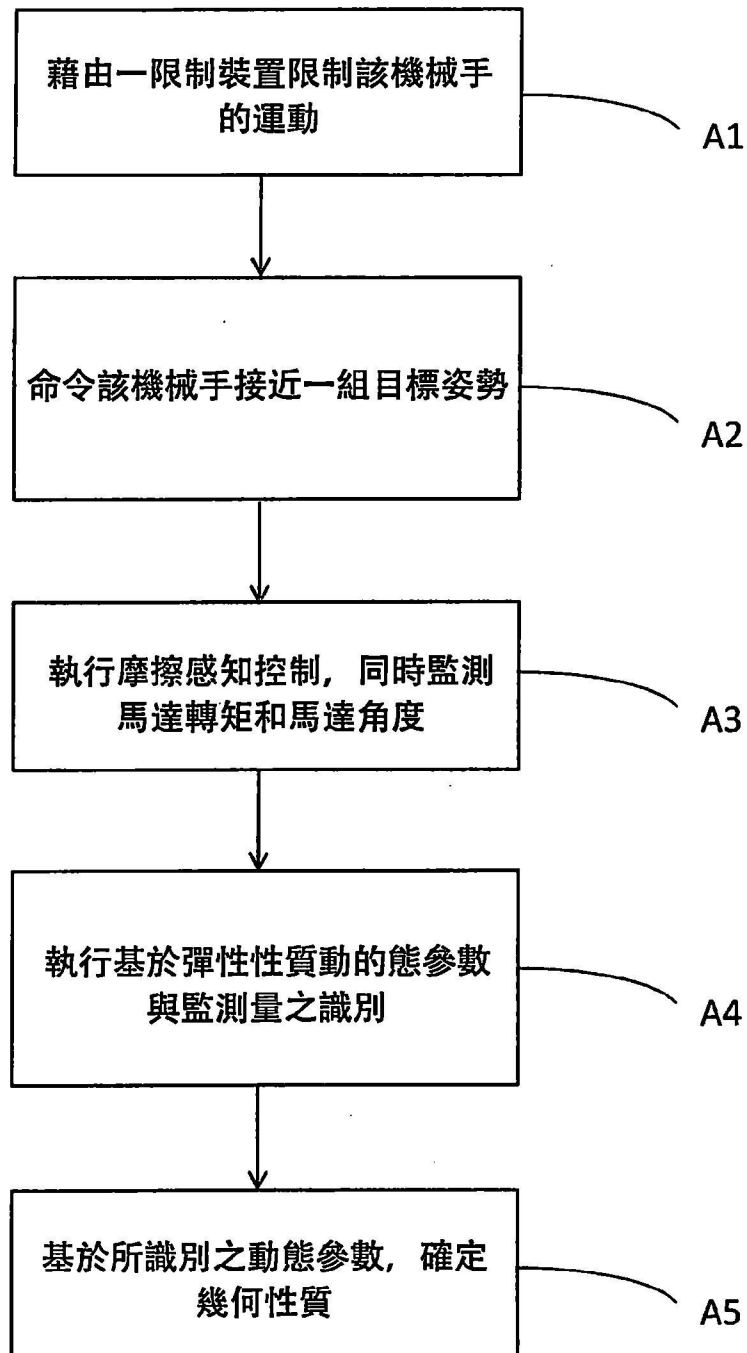
第6a圖



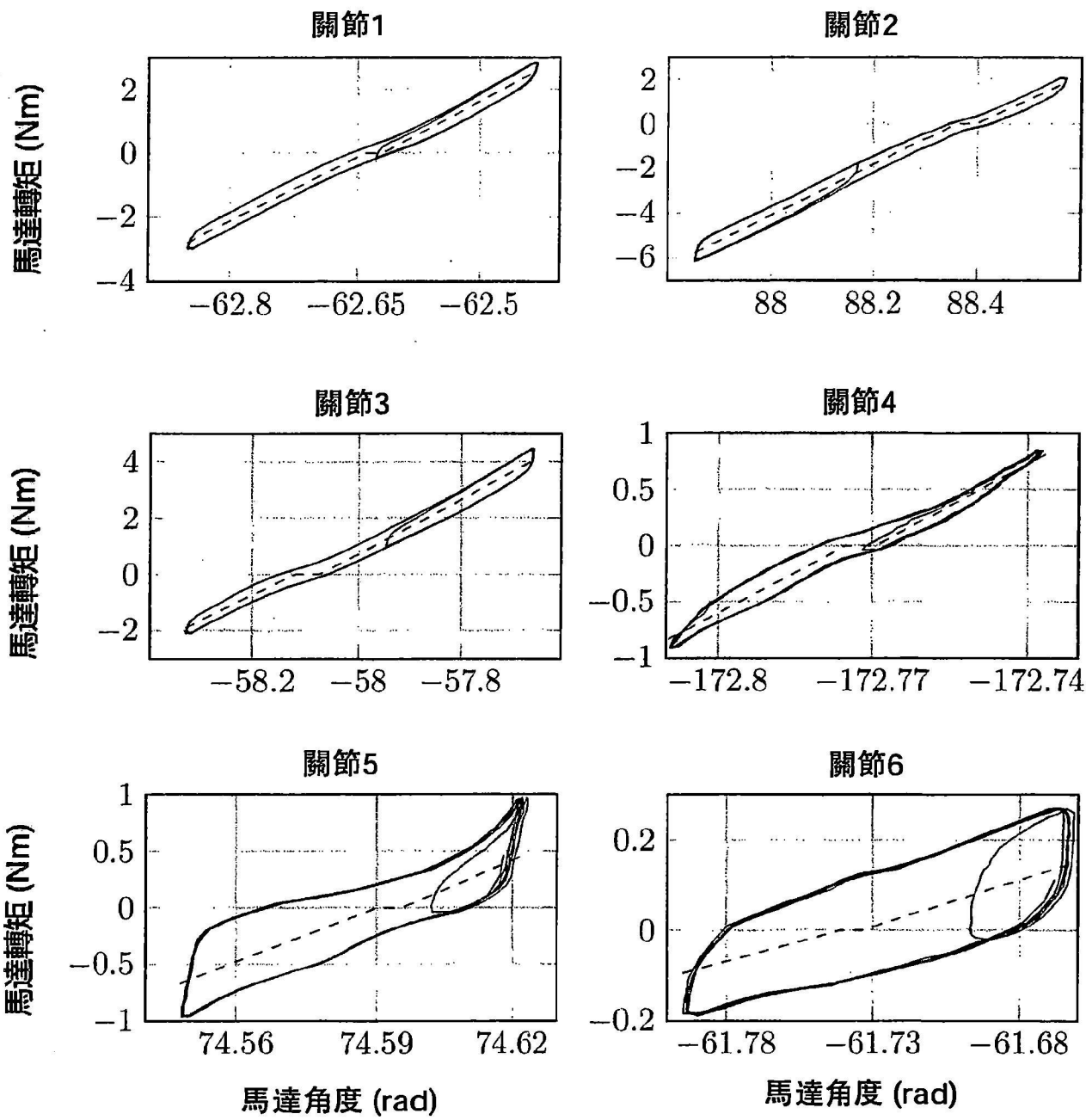
第6b圖



第7圖



第8圖



第10圖