

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2013年10月10日 (10.10.2013)



(10) 国际公布号
WO 2013/149429 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06F 17/50 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2012/076205
- (22) 国际申请日: 2012年5月29日 (29.05.2012)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201210098342.2 2012年4月5日 (05.04.2012) CN
- (71) 申请人 (对除美国外的所有指定国): 天津大学 (TIANJIN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国天津市南开区卫津路92号, Tianjin 300072 (CN)。
- (72) 发明人; 及
- (75) 发明人/申请人 (仅对美国): 王太勇 (WANG, Taiyong) [CN/CN]; 中国天津市南开区卫津路92号, Tianjin 300072 (CN)。 王润 (WANG, Run) [CN/CN]; 中国天津市南开区卫津路92号, Tianjin 300072 (CN)。 刘振忠 (LIU, Zhenzhong) [CN/CN]; 中国天

津市南开区卫津路92号, Tianjin 300072 (CN)。 丁彦玉 (DING, Yanyu) [CN/CN]; 中国天津市南开区卫津路92号, Tianjin 300072 (CN)。 邵明堃 (SHAO, Mingkun) [CN/CN]; 中国天津市南开区卫津路92号, Tianjin 300072 (CN)。

(74) 代理人: 天津市北洋有限责任专利代理事务所 (BEI&OCEAN); 中国天津市南开区鞍山西道时代公寓A座603, Tianjin 300193 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

[见续页]

(54) Title: DESIGN OPTIMIZATION METHOD FOR SERIAL ROBOT STRUCTURE

(54) 发明名称: 串联机器人结构设计优化方法

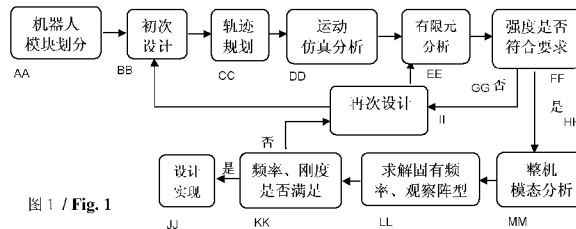


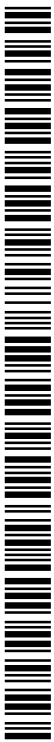
图1 / Fig. 1

- AA ROBOT MODULE DIVIDING
- BB INITIALLY DESIGNING
- CC TRACK PLANNING
- DD MOTION SIMULATION ANALYSIS
- EE FINITE ELEMENT ANALYSIS
- FF WHETHER THE STRENGTH SATISFIES THE REQUIREMENT
- GG NO
- HH YES
- II REDESIGNING
- JJ DESIGN REALIZED
- KK WHETHER FREQUENCY AND RIGIDITY ARE SATISFIED
- LL SOLVING THE NATURAL FREQUENCY, AND OBSERVING THE FORMATION
- MM COMPLETE MACHINE MODAL ANALYSIS

(57) Abstract: Disclosed is a design optimization method for a serial robot structure, including: dividing the structure of a robot into multiple modules according to the number of degrees of freedom and a transmission structure; initially designing each of the modules, i.e. primarily determining the shape, thickness and transmission mode of the module; carrying out finite element analysis for the initially designed robot structure, and optimizing the structure through the requirements of the strength, rigidity and natural frequency of the robot; judging whether each module of the robot structure satisfies the requirement of rigidity, if satisfied, continuing, otherwise redesigning same; after performing complete machine simplification for the robot, carrying out modal analysis; and analyzing the formation and frequency, if there is a place not satisfying the requirements of frequency and formation, redesigning same, and if satisfied, completing the design. The present invention adopts finite element and modal analysis for a robot structure to substitute for the conventional empirical method and simple strength checking method, so as to greatly improve the analysis accuracy. By the finite element and modal analysis for the robot structure, the requirements of strength and rigidity of the robot can be met with the minimum consumption of raw materials and cost.

(57) 摘要:

[见续页]



WO 2013/149429 A1



(84) **指定国** (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG,

CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

本发明公开了一种串联机器人结构设计优化方法: 将机器人的结构根据自由度数和传动结构分为多个模块; 对各个模块进行初次设计, 即初步确定模块的形状、厚度和传动方式; 对初次设计的机器人结构进行有限元分析, 通过该机器人的强度、刚度和固有频率的要求来优化结构; 判断机器人结构的各个模块是否满足刚度的需要, 满足继续, 否则进行再次设计; 对机器人进行整机简化后, 进行模态分析; 对阵型和频率进行分析, 有不满足频率和阵型要求的地方, 进行再次设计, 若满足, 则设计完成。本发明采用有限元和模态分析机器人结构取代传统的经验方法和单纯的强度校核方法, 大大的提高了分析的准确性。通过对机器人结构有限元和模态分析, 原材料和成本的最小消耗来达到机器人的强度和刚度的要求。

串联机器人结构设计优化方法

技术领域

5 本发明涉及一种机器人结构设计。特别是涉及一种采用有限元和模态分析机器人结构的串联机器人结构设计优化方法。

背景技术

近年来，由于人力成本不断上升，很多企业都在寻求使用工业机器人来代替人工，同时，很多人类无法完成工作的行业和危险性较高的行业都需要机器人来代替人工来完成。
10 机器人的结构不仅会影响到机器人的运动学和动力学的特性，甚至还会影响到机器人的控制方面的特性，因此，机器人的结构设计和优化问题尤为重要，结构优化的目标无外乎是用最低的成本达到设计的要求。由于工业机器人的工作环境较为恶劣和复杂，振动和噪声的影响不能忽略不计，因此串联机器人的结构不仅仅要满足自身强度的要求，还要考虑其共振、疲劳等因素。可以通过了解机器人的固有频率和阵型，来避免机器人工作中因共振
15 因素造成的不必要的损失。

目前的机器人结构优化主要存在以下的问题：

- 1、采用传统的材料力学分析方法，通过简化模型和凭借经验公式来优化模型，虽然这种方法实践证明具有一定的可靠性，但是有时忽略了现实中很多重要的条件，不能全面的反映应力状态。
- 20 2、借助优化算法，建立目标函数，设定约束条件，通过算法的计算产生最优的解集，这种方式多为是理论上最优解，现实中往往难以达到。
- 3、利用有限元软件时，对网络划分的依赖性较高，优化的精度取决于网格的稀疏度及网格分布的优劣程度。

25 发明内容

本发明所要解决的技术问题是，提供一种结合有限元分析和模态分析的高效、可行的串联机器人结构设计优化方法。

本发明所采用的技术方案是：一种串联机器人结构设计优化方法，包括如下步骤：

- (1) 将机器人的结构根据自由度数和传动结构分为多个模块；
- 30 (2) 对各个模块进行初次设计，即初步确定模块的形状、厚度和传动方式；
- (3) 对步骤(2)初次设计的机器人结构进行有限元分析，通过该机器人的强度、刚

度和固有频率的要求来优化结构；

(4) 针对步骤(3)中的分析结果，判断机器人结构的各个模块是否满足刚度的需要，如果满足直接进入步骤(6)中，若不满足则进入步骤(5)中进行再次设计；

(5) 在再次设计中，如果有只需要局部修改的地方修改设计后返回步骤(3)的再次
5 利用有限元软件 simulation 进行分析中；如果有需要整体修改的返回到步骤(2)中；

(6) 对机器人进行整机简化后，进行模态分析；

(7) 对阵型和频率进行分析，有不满足频率和阵型要求的地方，返回到步骤(5)进行再设计，若满足，则设计完成。

步骤(1)所述的多个模块包括有：底座、基座、转台、摆臂、小臂和关节顶这六个
10 模块。

步骤(3)所述的进行有限元分析包括如下3步：

a) 利用轨迹优化求出机器人从始点到终点的运动轨迹，即机器人运动过程中各个关节的角速度变化值，将求得的数值保存为 txt 格式存储起来；

b) 将 a) 步中求出的角速度变化值导入到仿真软件 motion 中，在仿真软件 motion 中
15 设置约束、接触和引力来模拟现实的环境，从而生成各个部件在工作过程受力情况；

c) 利用有限元软件 simulation 进行分析，设定约束、添加力和划分网格，运行出结果，通过观察分析结果的应力值，得到部件刚度强度分布的情况。

步骤(6)所述的对机器人进行整机简化后，进行模态分析是，在有限元软件 simulation
20 中生成频率算例，求出机器人的固有频率和阵型，从阵型和固有频率得出机器人结构中需要改进的部分，进行再设计。

本发明的串联机器人结构设计优化方法，采用有限元和模态分析机器人结构取代传统的经验方法和单纯的强度校核方法，大大的提高了分析的准确性。本发明先是对机器人的各个部件的进行优化，使其以最小的成本达到强度的要求，然后对整机进行模态分析，通过阵型可以看到机器人各个传动关节的刚度的境况。这样既达到了机器人结构各部件的强度，又达到了传动关节的刚度要求，使机器人结构达到最优化。本发明通过对机器人结构
25 有限元和模态分析，原材料和成本的最小消耗来达到机器人的强度和刚度的要求。

附图说明

图 1 是本发明串联机器人结构设计优化方法和流程图；

30 图 2 是采用本发明的方法分析应力结果的效果图；

图 3 是采用本发明的方法分析机器人得到的机器人前六阶模态阵型的效果图
其中 (a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f) 分别对应机器人前 6 阶的阵型。

具体实施方式

5 下面结合实施例和附图对本发明的串联机器人结构设计优化方法做出详细说明。

如图 1 所示, 本发明的串联机器人结构设计优化方法, 包括如下步骤:

(1) 将机器人的结构根据自由度数和传动结构分为多个模块, 包括有底座、基座、
转台、摆臂、小臂和关节顶六个模块;

(2) 对各个模块进行初次设计, 即初步确定模块的形状、厚度和传动方式;

10 (3) 对步骤 (2) 初次设计的机器人结构进行有限元分析, 通过该机器人的强度、刚度和固有频率的要求来优化结构; 所述的进行有限元分析包括如下 3 步:

a) 利用轨迹优化求出机器人从始点到终点的运动轨迹, 即机器人运动过程中各个关节的角速度变化值, 将求得的数值保存为 txt 格式存储起来;

15 b) 将 a) 步中求出的角速度变化值导入到仿真软件 motion 中, 在仿真软件 motion 中设置约束、接触和引力来模拟现实的环境, 从而生成各个部件在工作过程受力情况;

c) 利用有限元软件 simulation 进行分析, 设定约束、添加力和划分网格, 运行出结果, 通过观察分析结果的应力值, 得到部件刚度强度分布的情况。

(4) 针对步骤 (3) 中的分析结果, 判断机器人结构的各个模块是否满足刚度的需要, 如果满足直接进入步骤 (6) 中, 若不满足则进入步骤 (5) 中进行再次设计;

20 (5) 在再次设计中, 如果有只需要局部修改的地方修改设计后返回步骤 (3) 的再次利用有限元软件 simulation 进行分析中; 如果有需要整体修改的返回到步骤 (2) 中;

(6) 对机器人进行整机简化后, 进行模态分析;

25 所述的对机器人进行整机简化后, 进行模态分析是, 在有限元软件 simulation 中生成频率算例, 求出机器人的固有频率和阵型, 从阵型和固有频率得出机器人结构中需要需改进的部分, 进行再设计。

(7) 对阵型和频率进行分析, 有不满足频率和阵型要求的地方, 返回到步骤 (5) 进行再设计, 若满足, 则设计完成。

下面具体说明本发明的串联机器人结构设计优化方法。

30 根据串联机器人结构和传动的特点, 将机器人结构分为底座、基座、转台、摆臂、小臂和关节顶这六个模块。进行模块结构的初次设计, 初步确定各个模块的形状、厚度和传

动方式。

在 motion 仿真软件中，选择 motion 算例后添加六自由度串联机器人的六个马达，设定转动方向，转动的角速度利用插值法导入用 matlab 规划好的轨迹角速度值，设定整个环境的引力值和方向来模拟现实环境中的重力场，添加接触约束，来规避机器人部件在运

5 动过程中碰撞的现象。模拟从始点到终点的运动过程后，可以将各个部件的受力情况列出图表。下表 1 为通过仿真测量出来的机器人主要部件的受力情况。

表 1 主要部件受力列表

	底座	基座	摆臂	转台	小臂	关节顶
总和	210	127	188	123	125	123
x	0	125	153	-16	-16	0
y	0	6	82	-123	-123	0
z	-210	0	6	-26	-26	-123

在有限元 Simulation 中对主要的六个部件进行有限元分析，举转台为例，根据实际

10 情况定义了约束和添加力的大小方向后。画分网格，在局部地区添加网格约束。图 2 为分析应力结果的效果图，从图中的可以看到在耳部上边缘处应力为最大处(605800.4N/M²)，超过材料强度，可以通过加厚和加筋来增加强度，同时在应力较安全的地方可以减小厚度来节省材料。其他的各个部件采用相同方法进行优化。

已经将简化的串联机器人建模导入到 simulation 中，创建频率算例，设置各个部件

15 之间接触面的接合，添加机器人基座与地面的固定约束。划分网格，因为固有频率和振型主要取决于结构质量和刚度分布情况，不存在类似应力集中的现象，采用均匀网格可使结构刚度矩阵和质量矩阵的元素不致相差太大。因此在进行模态分析时无需使用网格控制，正常划分网格即可，网格数值设置大小如下表 2。

表 2 网格的参数

雅可比点	最大单元	最小单元	网格品质	节总数	单元总数
4	16 mm	3.2 mm	高	164010	97143

20 由于实际的分析对象是无限维的，所以其模态具有无穷阶，但是对于运动起主导作用的只是前面的几阶模态，所以计算时根据需要计算前几阶模态。频率分析的结果如下表 3，机器人前 6 阶的阵型分别对应着图 3 中的 a~f 图。

表 3 机器人前 6 阶固有频率

阶数	1	2	3	4	5	6
固有频率	20.019	29.382	45.368	50.402	157.59	198.56

(1) 由于串联机器人的模态中，小臂伸出的质量越大，整体机构的低阶频率越低。从表中可以看出本机构的一阶模态并不算低，满足国际上对负载 12kg 机器人第一阶固有频率不低于 12Hz 的要求，说明本机构伸出的质量不算大。

(2) 从图 3 中 b、c、d、e 所示的 2、3、4、5 阶阵型相对于 a 所示的 1 阶模态可以看到，在转台与小臂连接处发生了扭曲、弯曲和弯扭的变形，因此可以判定本机构在转台与小臂处传动机构连接刚度不够，需要对此处的传动方式和结构进行再设计。

(3) 从图 3 中 e、f 所示的 5、6 阶阵型可以看出来，基座与摆臂之间的发生扭曲，说明该处连接的刚度不够，需要对零件添加筋板、增加厚度。

通过对以上的有限元分析和模态分析提出的修改意见，进行修改后，再次进行分析，从而达到了整个设计到优化过程的闭循环，保证了此种方法设计优化出来的机器人能够满足预期的要求。

权利要求

1. 一种串联机器人结构设计优化方法，其特征在于，包括如下步骤：
 - (1) 将机器人的结构根据自由度数和传动结构分为多个模块；
 - 5 (2) 对各个模块进行初次设计，即初步确定模块的形状、厚度和传动方式；
 - (3) 对步骤(2)初次设计的机器人结构进行有限元分析，通过该机器人的强度、刚度和固有频率的要求来优化结构；
 - (4) 针对步骤(3)中的分析结果，判断机器人结构的各个模块是否满足刚度的需要，如果满足直接进入步骤(6)中，若不满足则进入步骤(5)中进行再次设计；
 - 10 (5) 在再次设计中，如果有只需要局部修改的地方修改设计后返回步骤(3)的再次利用有限元软件 simulation 进行分析中；如果有需要整体修改的返回到步骤(2)中；
 - (6) 对机器人进行整机简化后，进行模态分析；
 - (7) 对阵型和频率进行分析，有不满足频率和阵型要求的地方，返回到步骤(5)进行再设计，若满足，则设计完成。
- 15 2. 根据权利要求1所述的串联机器人结构设计优化方法，其特征在于，步骤(1)所述的多个模块包括有：底座、基座、转台、摆臂、小臂和关节顶这六个模块。
3. 根据权利要求1所述的串联机器人结构设计优化方法，其特征在于，步骤(3)所述的进行有限元分析包括如下3步：
 - a) 利用轨迹优化求出机器人从始点到终点的运动轨迹，即机器人运动过程中各个关
 - 20 节的角速度变化值，将求得的数值保存为 txt 格式存储起来；
 - b) 将 a) 步中求出的角速度变化值导入到仿真软件 motion 中，在仿真软件 motion 中设置约束、接触和引力来模拟现实的环境，从而生成各个部件在工作过程受力情况；
 - c) 利用有限元软件 simulation 进行分析，设定约束、添加力和划分网格，运行出结果，通过观察分析结果的应力值，得到部件刚度强度分布的情况。
- 25 4. 根据权利要求1所述的串联机器人结构设计优化方法，其特征在于，步骤(6)所述的对机器人进行整机简化后，进行模态分析是，在有限元软件 simulation 中生成频率算例，求出机器人的固有频率和阵型，从阵型和固有频率得出机器人结构中需要需改进的部分，进行再设计。

附图

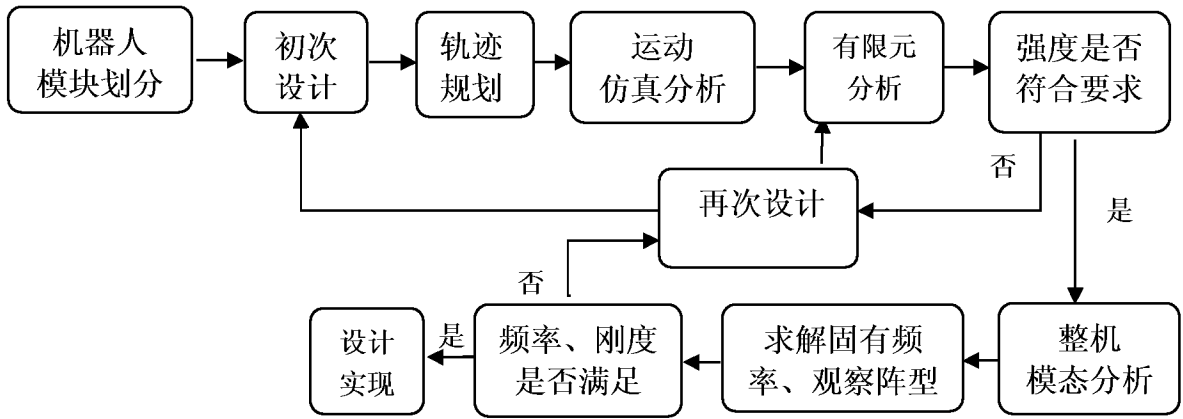


图 1



图 2

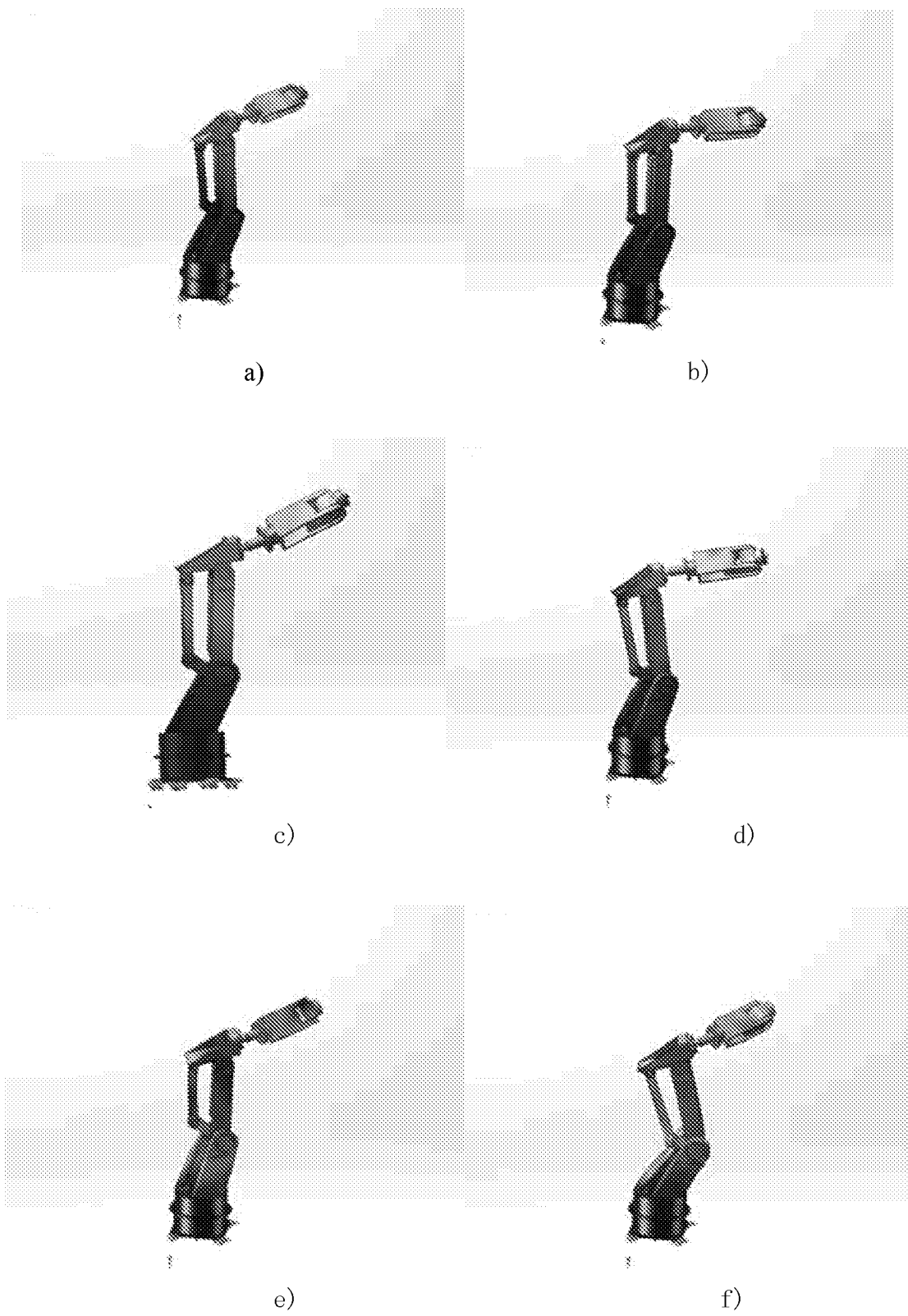


图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2012/076205

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/50 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: G06F B25J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, WPI, CNPAT, CNKI: robot, design, module, rigidity, stiffness, frequency, simulation.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 1439492 A (TIANJIN UNIVERSITY), 03 September 2003 (03.09.2003), the whole document	1-4
A	CN 101791803 A (SHANGHAI UNIVERSITY), 04 August 2010 (04.08.2010), the whole document	1-4

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>
---	---

Date of the actual completion of the international search
05 January 2013 (05.01.2013)

Date of mailing of the international search report
10 January 2013 (10.01.2013)

Name and mailing address of the ISA/CN:
State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao
Haidian District, Beijing 100088, China
Facsimile No.: (86-10) 62019451

Authorized officer
CUI, Liyan
Telephone No.: (86-10) **62411682**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2012/076205

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 1439492 A	03.09.2003	CN 1212221 C	27.07.2005
CN 101791803 A	04.08.2010	None	

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2012/076205

A. 主题的分类		
G06F 17/50 (2006.01) i		
按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类		
B. 检索领域		
检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)		
IPC: G06F B25J		
包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献		
在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))		
EPODOC, WPI, CNPAT, CNKI 机器人, 设计, 模块, 刚度, 频率, 仿真, 模拟 robot, design, module, rigidity, stiffness, frequency, simulation.		
C. 相关文件		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN1439492A, (天津大学), 03.9 月 2003 (03.09.2003), 全文	1-4
A	CN101791803A, (上海大学), 04.8 月 2010 (04.08.2010), 全文	1-4
<input type="checkbox"/> 其余文件在 C 栏的续页中列出。 <input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。		
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件		
国际检索实际完成的日期 05.1 月 2013 (05.01.2013)		国际检索报告邮寄日期 10.1 月 2013 (10.01.2013)
ISA/CN 的名称和邮寄地址: 中华人民共和国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 100088 传真号: (86-10)62019451		受权官员 崔丽艳 电话号码: (86-10) 62411682

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2012/076205

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
CN1439492A	03.09.2003	CN1212221C	27.07.2005
CN101791803A	04.08.2010	无	