

(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
2021 年 6 月 17 日 (17.06.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/114666 A1

(51) 国际专利分类号:
B25J 19/04 (2006.01) *G06T 17/00* (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2020/102934

(22) 国际申请日: 2020 年 7 月 20 日 (20.07.2020)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201911262776.X 2019 年 12 月 11 日 (11.12.2019) CN

(71) 申请人: 山东大学 (SHANDONG UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, 山东大学, Shandong 250061 (CN)。

(72) 发明人: 周乐来 (ZHOU, Lelai); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, 山东大学, Shandong

250061 (CN)。李雪(LI, Xue); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, 山东大学, Shandong 250061 (CN)。李贻斌(LI, Yibin); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, 山东大学, Shandong 250061 (CN)。田新诚(TIAN, Xincheng); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, 山东大学, Shandong 250061 (CN)。徐小龙(XU, Xiaolong); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, 山东大学, Shandong 250061 (CN)。杨苗(YANG, Miao); 中国山东省济南市历下区经十路 17923 号, 山东大学, Shandong 250061 (CN)。

(74) 代理人: 北京高沃律师事务所(BEIJING GAOWO LAW FIRM); 中国北京市海淀区彩和坊路 11 号 6 层 602 室, Beijing 100080 (CN)。

(54) Title: HUMAN BODY SAFETY EVALUATION METHOD AND SYSTEM IN HUMAN-MACHINE COLLABORATION

(54) 发明名称: 人机协作中人体安全评估方法及系统

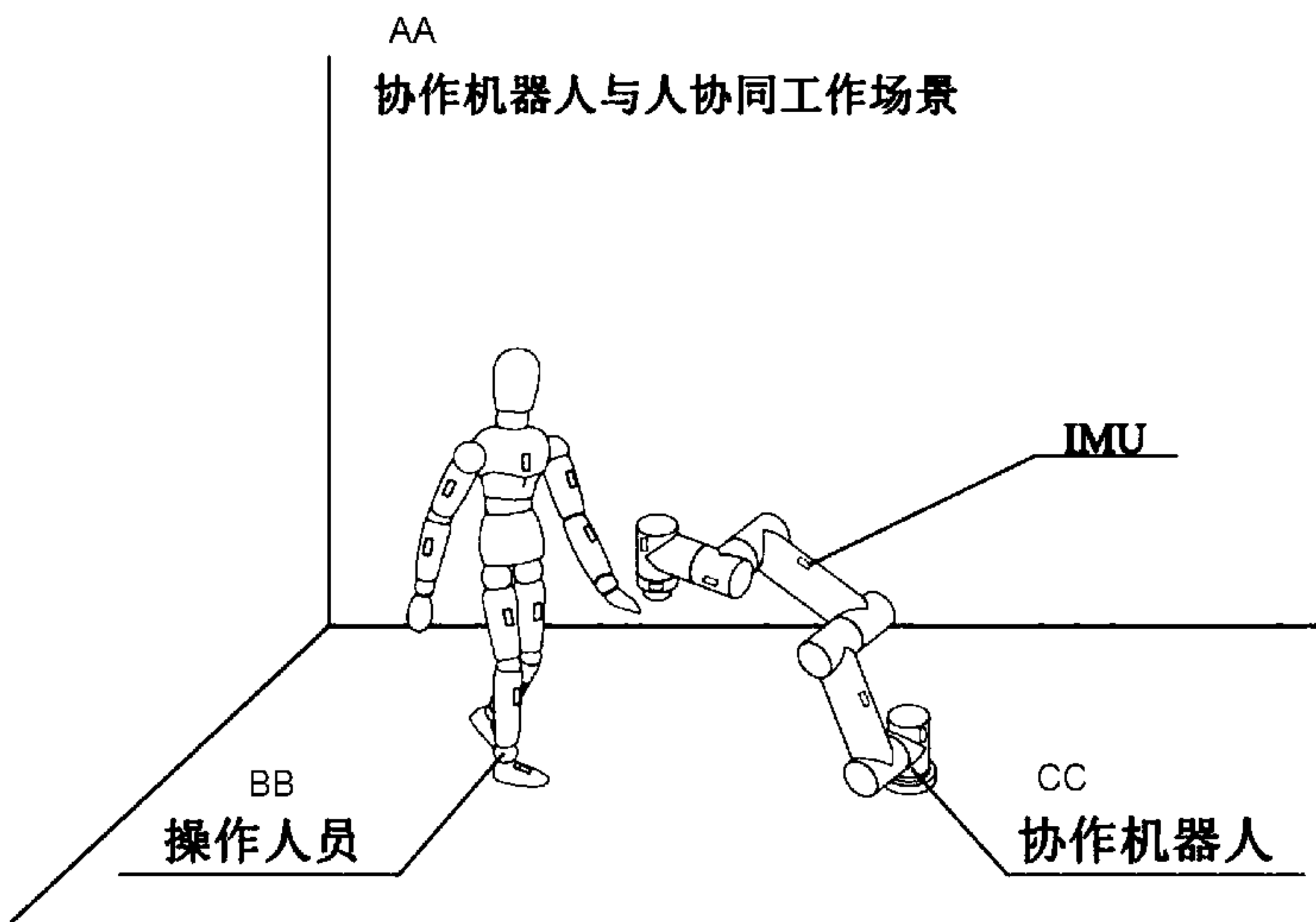


图 1

AA Cooperative working scenario of a collaborative robot and human
BB Operating personnel
CC Collaborative robot

(57) Abstract: A human body safety evaluation method and system in human-machine collaboration. Said method comprises: acquiring a pose of a human body in a global coordinate system (S1); acquiring a pose of a robot in the global coordinate system (S2); according to the pose of the human body in the global coordinate system and the pose of the robot in the global coordinate system, determining the distance between the human body and the robot and the movement speed of the robot (S3); and according to the distance between the human body and the robot and the movement speed of the robot, determining a safety level of the human body in human-machine

(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, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(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, ST, 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, KM, 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))。

collaboration (S4). During a human-machine collaboration process, a current safety state of a human body is determined by monitoring the distance between a robot and the human body and the movement speed of the robot, and a next work plan is made according to different safety states, thereby effectively avoiding the occurrence of a dangerous situation, allowing for a safe and efficient human-machine collaboration.

(57) 摘要: 人机协作中人体安全评估方法及系统, 包括: 获取人体在全局坐标系下的位姿 (S1); 获取机器人在全局坐标系下的位姿 (S2); 根据人体在全局坐标系下的位姿和机器人在全局坐标系下的位姿, 确定人体与机器人之间的距离以及机器人的运动速度 (S3); 根据人体与机器人之间的距离和机器人的运动速度, 确定人机协作中人体的安全等级 (S4)。在人机协作过程中, 通过监控机器人与人体之间的距离和机器人的运行速度确定当前人体的安全状态, 根据不同安全状态做出下一步工作计划, 有效避免危险情况发生, 使人机协作更安全更高效。

人机协作中人体安全评估方法及系统

本申请要求于 2019 年 12 月 11 日提交中国专利局、申请号为 201911262776.X、发明名称为“人机协作中人体安全评估方法及系统”的中国专利申请的优先权，其全部内容通过引用结合在本申请中。

5 技术领域

本发明涉及人机协作领域，特别是涉及在协作型机器人与人协作过程中的人体安全评估方法及系统。

背景技术

机器人行业的快速发展对人与机器人密切协作提出了新要求，逐渐催生出协作型机器人。传统工业机器人设计有围栏隔离，在机器人工作时不允许工作人员进入，或者在工作人员进入时，机器人必须停止工作，这种方法不仅浪费工作空间，而且降低了整体的工作效率。而协作型机器人，可以实现与人协同工作，不再需要防护栏进行隔离，将人的“知识、分析、决策”能力与机器人的“力量、精度、可重复性”结合在一起。协作型机器人与人共同处于同一工作空间，协作等级不断加强，二者紧密协调，不仅节省了工作空间，而且大大提高了工作效率，并且在确保人员安全的前提下，机器人能够自主提高技能，实现与人自然交互协作。

根据阿西莫夫机器人三定律，不管何种机器人，在任何情况和环境下都不应伤害人类及机器人自身，所以安全性是机器人在人类生产生活领域应用的首要问题和强制性约束，但机器人本身并没有安全意识，人与机器人协同工作时如果发生碰撞，处于弱势地位的操作人员安全隐患相对较大，所以必须针对协作机器人可能出现的各个风险点，进行充分的安全评估，制定相应的保护措施来确保操作人员的安全。

目前存在的人机协作中人体安全评估方法，只通过计算机机器人与人体之间的距离来判断人体的安全状况，而忽略机器人的运动速度这一重要参数对人体安全的影响，造成了人机协作中人体安全评估不准确、特定风险无法排查等现象。

发明内容

本发明提供一种人机协作中人体安全评估方法及系统，在人机协作中

使人机协作更安全更高效。

为实现上述目的，本发明提供一种人机协作中人体安全评估方法，包括：

获取人体在全局坐标系下的位姿；

5 获取机器人在全局坐标系下的位姿；

根据所述人体在全局坐标系下的位姿和所述机器人在全局坐标系下的位姿，确定人体与机器人之间的距离以及机器人的运动速度；

根据所述人体与机器人之间的距离和所述机器人的运动速度，确定人机协作中人体的安全等级。

10 可选的，所述获取人体在全局坐标系下的位姿，具体包括：

获取人体基坐标系与全局坐标系之间的第一姿态关系 R_B^G 以及惯性测量单元坐标系与全局坐标系之间的第二姿态关系 R_S^G ；

根据所述第一姿态关系和所述第二姿态关系确定人体基坐标系与惯性测量单元坐标系之间的第三姿态关系 R_B^S ；其中， $R_B^S = (R_S^G)^T R_B^G$ ， R_B^G 为
15 第一姿态关系， R_S^G 为第二姿态关系， R_B^S 为第三姿态关系， G 为全局坐标系， B 为人体基坐标系， S 为惯性测量单元坐标系；

选取人体行走时，人体脚触地所在侧的脚踝为所述人体基坐标系的原点；所述人体基坐标系的原点在人体的左脚踝和人体的右脚踝之间切换；

获取利用第一惯性测量单元测量的第一旋转矩阵；所述第一惯性测量
20 单元为多个，分别设置于人体的上身躯干、左大臂、右大臂、左小臂、右小臂、左大腿、右大腿、左小腿、右小腿、左脚背和右脚背；

根据所述人体基坐标系的原点、所述第一旋转矩阵和所述第三姿态关系，确定人体在全局坐标系下的位姿。

可选的，所述根据所述人体基坐标系的原点、所述第一旋转矩阵和所述
25 第三姿态关系，确定人体在全局坐标系下的位姿，具体包括：

在开始运动之前，人体保持校准姿势，校准过程为：在所有的第一惯性测量单元上进行，每个所述第一惯性测量单元都与一个具有预定义的坐标系的身体部分相关联，将关联后的第一惯性测量单元用于实时运动捕捉中；

获取人体在人体基坐标系下的位姿：人体肢体长度是确定已知的，将关联后的第一惯性测量单元放置在人体的上身躯干，以人体直立静止时为初始状态；人在行走时，总会保持一只脚触地，取该侧脚踝为人体基坐标系原点，人体静止时，令每个第一惯性测量单元坐标系与参照坐标系之间的第一旋转矩阵为单位矩阵，人体运动时，通过第一惯性测量单元返回的
5 四元数 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4)$ ，实时得到人体每一躯干的姿态以及位置信息；

左脚触地时，左脚踝人体基坐标系作为左小腿的参照坐标系，已知人体静止时，在人体基坐标系中左膝盖的坐标为 $P_{L1} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$ ，通过左小腿处

的第一惯性测量单元测量的第一旋转矩阵 $R_{\varepsilon 1}$ 为：

$$10 \quad R_{\varepsilon 1} = \begin{bmatrix} 1-2\varepsilon_2^2-2\varepsilon_3^2 & 2(\varepsilon_1\varepsilon_2-\varepsilon_3\varepsilon_4) & 2(\varepsilon_1\varepsilon_3+\varepsilon_2\varepsilon_4) \\ 2(\varepsilon_1\varepsilon_2+\varepsilon_3\varepsilon_4) & 1-2\varepsilon_1^2-2\varepsilon_3^2 & 2(\varepsilon_2\varepsilon_3-\varepsilon_1\varepsilon_4) \\ 2(\varepsilon_1\varepsilon_2-\varepsilon_3\varepsilon_4) & 2(\varepsilon_2\varepsilon_3+\varepsilon_1\varepsilon_4) & 1-2\varepsilon_1^2-2\varepsilon_2^2 \end{bmatrix};$$

则人体姿态发生变换后的左膝盖坐标为： $P'_{L1} = R_{\varepsilon 1}P_{L1}$ ；

以左膝盖为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，并以左膝盖为坐标系原点建立的坐标系作为左大腿处的第一惯性测量单元运动的参照坐标系；人体静止时，令左大腿处的第一惯性测量单元坐标系与左膝盖坐标系之间的第一旋转矩阵为单位矩阵，在左膝盖坐标系
15 中，左髌关节的坐标为 $P_{L2} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}$ ，通过左大腿处的第一惯性测量单元传

回的四元数表示的第一旋转矩阵 $R_{\varepsilon 2}$ ，实时得到左大腿的姿态以及位置信息；

则人体姿态发生变换后的左髌关节坐标为： $P'_{L2} = R_{\varepsilon 2}P_{L2}$ ；

20 根据所述人体姿态发生变换后的左髌关节坐标和所述人体姿态发生变换后的左膝盖坐标，得到左髌关节在人体基坐标系下的坐标：
 $P''_{L2} = P'_{L1} + P'_{L2}$ ；

以左髌关节为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，假设人在移动过程中，盆骨的姿态不发生变化，则盆骨在左髌关节坐

标系中的位置固定，同时得盆骨在人体基坐标系中的位置；

以盆骨中心作为坐标系的原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，右髋关节在盆骨坐标系中的位置固定不变，得到右髋关节在人体基坐标系中的位置；

5 以右髋关节为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，以右髋关节坐标系作为右大腿处第一惯性测量单元的参照坐标系，人体静止时，令右大腿处第一惯性测量单元坐标系与右髋关节坐标系之间的第一旋转矩阵为单位矩阵，在右髋关节坐标系中，通过右大腿处的第一惯性测量单元传回的四元数表示的第一旋转矩阵，实时得到右大腿的姿态以及位置信息，根据坐标变换，获得人体基坐标系下右膝盖位置坐标；

10 以右膝盖为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，以右膝盖坐标系作为右小腿处第一惯性测量单元的参照坐标系，人体静止时，令右小腿处第一惯性测量单元坐标系与右膝盖坐标系之间的第一旋转矩阵为单位矩阵，在右膝盖坐标系中，通过右小腿处的第一惯性测量单元传回的四元数表示的第一旋转矩阵，得到右小腿的姿态以及位置信息，根据坐标变换，获得人体基坐标系下右脚踝位置坐标；

右脚触地时，以右脚踝为原点，建立人体基坐标系，腿关节坐标系建立方法同上；

20 同时，以盆骨坐标系作为上身躯干的参照坐标系，人体静止时，令上身躯干惯性测量单元坐标系与盆骨坐标系之间的第一旋转矩阵为单位矩阵，在盆骨坐标系中，通过上身躯干处第一惯性测量单元传回的四元数表示的第一旋转矩阵，实时得到上身躯干的姿态以及位置信息，根据坐标变换，获得人体基坐标系下的肩膀位置坐标；

25 以肩膀为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，并将肩膀坐标系作为大臂运动的参照坐标系，通过大臂处第一惯性测量单元传回的四元数表示的第一旋转矩阵，实时得到大臂的姿态以及位置信息，根据坐标变换，获得人体基坐标系下手肘的位置坐标；

30 以手肘为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，并将手肘坐标系作为小臂运动的参照坐标系，通过小臂处第一惯性测量单元传回的四元数表示的第一旋转矩阵，实时得到小臂的姿态以及位置信

息, 根据坐标变换, 获得人体基坐标系下手腕的位置坐标;

从而获得人体在人体基坐标系下的完整姿态以及各个关节的位置坐标; 通过人体基坐标系和全局坐标系之间的第三姿态关系, 得到全局坐标系下的人体完整姿态以及各个关节的位置坐标。

5 可选的, 所述获取机器人在全局坐标系下的位姿, 具体包括:

获取全局坐标系下机器人基座的坐标;

获取利用第二惯性测量单元测量的第二旋转矩阵; 所述第二惯性测量单元为多个, 分别设置于机器人的基座和连杆上;

10 根据所述全局坐标系下机器人基座的坐标和所述第二旋转矩阵, 确定机器人在全局坐标系下的位姿。

可选的, 所述根据所述人体在全局坐标系下的位姿和所述机器人在全局坐标系下的位姿, 确定人体与机器人之间的距离以及机器人的运动速度, 具体包括:

15 根据所述人体在全局坐标系下的位姿和所述机器人在全局坐标系下的位姿, 确定人体与机器人之间的距离集合; 所述距离集合中包括人体中每个人体躯干分别与机器人连杆之间的距离; 所述人体躯干包括上身躯干、左大臂、右大臂、左小臂、右小臂、左大腿、右大腿、左小腿和右小腿;

选取所述距离集合中最小值作为人体与机器人之间的距离;

20 根据所述人体与机器人之间的距离确定机器人的运动速度。

可选的, 所述根据所述人体与机器人之间的距离和所述机器人的运动速度, 确定人机协作中人体的安全等级, 具体包括:

当所述人体与机器人之间的距离大于第一预设距离阈值且所述机器人的运动速度小于预设速度阈值时, 确定人体处于第一安全状态;

25 当所述人体与机器人之间的距离大于第一预设距离阈值且机器人速度大于或等于预设速度阈值时, 确定人体处于第二安全状态;

当所述人体与机器人之间的距离大于第二预设距离阈值且所述人体与机器人之间的距离小于或等于第一预设距离阈值且所述机器人的运动速度小于预设速度阈值时, 确定人体处于第二安全状态; 所述第一预设距离阈值大于所述第二预设距离阈值;

30

当所述人体与机器人之间的距离大于第二预设距离阈值且所述人体与机器人之间的距离小于或等于第一预设距离阈值且所述机器人的运动速度大于或等于预设速度阈值时, 确定人体处于第二危险状态;

当所述人体与机器人之间的距离小于或等于第二预设距离阈值且所述机器人的运动速度小于预设速度阈值时, 确定人体处于第二危险状态;

当所述人体与机器人之间的距离小于或等于第二预设距离阈值且所述机器人的运动速度大于或等于预设速度阈值时, 确定人体处于第一危险状态。

可选的, 所述第一预设距离阈值为 $L_{\max}$; 所述第二预设距离阈值为 $L_{\max}/3$; 所述预设速度阈值为 $L_{\max}/1.25$; 其中, $L_{\max}$ 为机器人外展长度的最大值。

一种人机协作中人体安全评估系统, 包括:

第一获取模块, 用于获取人体在全局坐标系下的位姿;

第二获取模块, 用于获取机器人在全局坐标系下的位姿;

距离和速度确定模块, 用于根据所述人体在全局坐标系下的位姿和所述机器人在全局坐标系下的位姿, 确定人体与机器人之间的距离以及机器人的运动速度;

人体安全等级确定模块, 用于根据所述人体与机器人之间的距离和所述机器人的运动速度, 确定人机协作中人体的安全等级。

可选的, 所述第一获取模块具体包括:

第一姿态关系和第二姿态关系获取单元, 用于获取人体基坐标系与全局坐标系之间的第一姿态关系以及惯性测量单元坐标系与全局坐标系之间的第二姿态关系;

第三姿态关系确定单元, 用于根据所述第一姿态关系和所述第二姿态关系确定人体基坐标系与惯性测量单元坐标系之间的第三姿态关系; 其中, $R_B^S = (R_S^G)^T R_B^G$, R_B^G 为第一姿态关系, R_S^G 为第二姿态关系, R_B^S 为第三姿态关系, G 为全局坐标系, B 为人体基坐标系, S 为惯性测量单元坐标系;

人体基坐标系原点确定单元, 用于选取人体行走时, 人体脚触地所在

侧的脚踝为所述人体基坐标系的原点;所述人体基坐标系的原点在人体的左脚踝和人体的右脚踝之间切换;

第一旋转矩阵获取单元,用于获取利用第一惯性测量单元测量的第一旋转矩阵;所述第一惯性测量单元为多个,分别设置于人体的上身躯干、左大臂、右大臂、左小臂、右小臂、左大腿、右大腿、左小腿、右小腿、左脚背和右脚背;

人体在全局坐标系下位姿确定单元,用于根据所述人体基坐标系的原点、所述第一旋转矩阵和所述第三姿态关系。

可选的,所述第二获取模块具体包括:

基座坐标获取单元,用于获取全局坐标系下机器人基座的坐标;

第二旋转矩阵获取单元,用于获取利用第二惯性测量单元测量的第二旋转矩阵;所述第二惯性测量单元为多个,分别设置于机器人的基座和连杆上;

机器人在全局坐标系下位姿确定单元,用于根据所述全局坐标系下机器人基座的坐标和所述第二旋转矩阵,确定机器人在全局坐标系下的位姿。

根据本发明提供的具体实施例,本发明公开了以下技术效果:

本发明通过设置的测试环境,机器人和操作人员均穿戴惯性测量单元,协作型机器人按照预定轨迹进行工作,操作人员与协作型机器人进行协作,在整个过程中,惯性测量单元采集机器人与人体的运动数据,根据采集到的数据计算人体和机器人之间的距离及机器人的运动速度,以此数据来评估协作型机器人与人体的协作程度及对人员的安全性。

本发明在人机协作过程中,通过监控机器人与人体之间的距离和机器人的运行速度确定当前人体的安全状态,根据不同安全状态做出下一步工作计划,有效避免危险情况发生,使人机协作更安全更高效。

说明书附图

为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

图 1 为本发明实施例所提供的测试系统场景示意图；

图 2 为本发明实施例所提供的人体惯性测量单元放置示意图；

图 3 为本发明实施例所提供的人体左脚触地时全身姿态推算顺序图；

图 4 为本发明实施例所提供的人体右脚触地时全身姿态推算顺序图；

5 图 5 为本发明实施例所提供的机器人惯性测量单元放置示意图。

具体实施方式

下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没
10 有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

本发明的目的是提供一种人机协作中人体安全评估方法及系统，在人机协作中使人机协作更安全更高效。

为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂，下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。
15

本发明通过设置的测试环境，机器人和操作人员均穿戴惯性测量单元(Inertial measurement unit, 简称 IMU)套装，如图 1 所示，协作型机器人按照预定轨迹进行工作，操作人员与协作型机器人进行协作，在整个过程中，多个惯性测量单元首先采集机器人和人体的旋转矩阵，之后对旋转矩阵进行滤波处理，然后利用正运动学函数，获取机器人和人体的位置信息及运动姿态，最后计算人体和机器人之间的距离及机器人的运动速度等评价参数，评估协作型机器人与人员的协作程度及对人员的安全性。具体的，对旋转矩阵进行滤波处理，使获取的旋转矩阵更加准确，然后利用正运动学函数确定人体各个关节的位置和各个躯干的姿态以及机器人各个关节的位置和各个连杆的姿态，从而获取机器人和人体的位置信息及运动姿态，
20 最后计算人体和机器人之间的距离及机器人的运动速度等评价参数，评估协作型机器人与人员的协作程度及对人员的安全性。

本发明一种人机协作中人体安全评估方法，包括：

S1，获取人体在全局坐标系下的位姿。

30 S2，获取机器人在全局坐标系下的位姿。

S3, 根据所述人体在全局坐标系下的位姿和所述机器人在全局坐标系下的位姿, 确定人体与机器人之间的距离以及机器人的运动速度。

S4, 根据所述人体与机器人之间的距离和所述机器人的运动速度, 确定人机协作中人体的安全等级。

5 S1 具体包括:

S11, 获取人体基坐标系与全局坐标系之间的第一姿态关系 R_B^G 以及惯性测量单元坐标系与全局坐标系之间的第二姿态关系 R_S^G 。

S12, 根据所述第一姿态关系和所述第二姿态关系确定人体基坐标系与惯性测量单元坐标系之间的第三姿态关系 R_B^S ; 其中, $R_B^S = (R_S^G)^T R_B^G$, R_B^G 为第一姿态关系, R_S^G 为第二姿态关系, R_B^S 为第三姿态关系, G 为全局坐标系, B 为人体基坐标系, S 为惯性测量单元坐标系。

具体的, 获取人体基坐标系与全局坐标系之间的姿态关系 R_B^G 时, 简单起见, 所建立的人体基坐标系与全局坐标系姿态一致。人体基坐标系与全局坐标系中的姿态关系表示为 R_B^G , 惯性测量单元坐标系与全局坐标系之间的姿态关系表示为 R_S^G , 人体基坐标系与惯性测量单元坐标系之间的姿态关系表示为 R_B^S , 通过坐标系之间的变换:

$$R_B^G = R_S^G R_B^S, \text{ 可得 } R_B^S = (R_S^G)^{-1} R_B^G = (R_S^G)^T R_B^G。$$

S13, 选取人体行走时, 人体脚触地所在侧的脚踝为所述人体基坐标系的原点; 所述人体基坐标系的原点在人体的左脚踝和人体的右脚踝之间切换。

S14, 获取利用第一惯性测量单元测量的第一旋转矩阵; 所述第一惯性测量单元为多个, 分别设置于人体的上身躯干、左大臂、右大臂、左小臂、右小臂、左大腿、右大腿、左小腿、右小腿、左脚背和右脚背。

S15, 根据所述人体基坐标系的原点、所述第一旋转矩阵和所述第三姿态关系, 确定人体在全局坐标系下的位姿。

具体的, 人体惯性测量单元的放置位置如图 2 所示, 使用的第一惯性测量单元和第二惯性测量单元均为 XSENS MTwAwinda, 选取行走时静止一侧脚踝为人体基坐标系原点, 人行走时, 人体基坐标系原点在左右脚之间切换, 首先通过脚踝位置推算出盆骨的位置, 再根据盆骨位置推算全身各躯干的位姿; 上半身放置 5 块惯性测量单元, 分别置于上身躯干、左

右大臂（左大臂和右大臂）和左右小臂（左小臂和右小臂），用于获取上半身的位姿信息；下半身放置 6 块惯性测量单元，分别置于左右大腿（左大腿和右大腿）、左右小腿（左小腿和右小腿）和左右脚背（左脚背和右脚背），用于获取下半身的位姿信息，放置在人体上的惯性测量单元位置
5 固定不发生变化。

在开始运动之前，受试者（人体）保持校准姿势，这个校准过程是在所有的惯性测量单元上进行的，其中每个惯性测量单元都与一个具有预定义的坐标系的身体部分相关联，将其用于实时运动捕捉中。

获取人体的姿态，人体肢体长度是确定已知的，对惯性测量单元进行
10 标定之后放置在人体身躯干上，以人体直立静止时为初始状态。人在行走时，总会保持一只脚触地，取该侧脚踝为人体基坐标系原点，人体静止时，令每个惯性测量单元坐标系与其参照坐标系之间的旋转矩阵为单位矩阵；人体运动时，通过惯性测量单元返回的四元数 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4)$ ，可以实时得到身体每一躯干的姿态以及位置信息。左脚触地时全身姿态的推算顺序如
15 图 3 所示，右脚触地时全身姿态的推算顺序如图 4 所示。

现以左脚触地为例，来说明完整人体姿态获取的过程：

左脚踝人体基坐标系(左脚踝坐标系)作为左小腿的参照坐标系，已知
人体静止时，在人体基坐标系中左膝盖的坐标为 $P_{L1} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$ ，通过左小腿

处的第一惯性测量单元测量的四元数表示的旋转矩阵 $R_{\varepsilon 1}$ 为：

$$20 \quad R_{\varepsilon 1} = \begin{bmatrix} 1-2\varepsilon_2^2-2\varepsilon_3^2 & 2(\varepsilon_1\varepsilon_2-\varepsilon_3\varepsilon_4) & 2(\varepsilon_1\varepsilon_3+\varepsilon_2\varepsilon_4) \\ 2(\varepsilon_1\varepsilon_2+\varepsilon_3\varepsilon_4) & 1-2\varepsilon_1^2-2\varepsilon_3^2 & 2(\varepsilon_2\varepsilon_3-\varepsilon_1\varepsilon_4) \\ 2(\varepsilon_1\varepsilon_2-\varepsilon_3\varepsilon_4) & 2(\varepsilon_2\varepsilon_3+\varepsilon_1\varepsilon_4) & 1-2\varepsilon_1^2-2\varepsilon_2^2 \end{bmatrix}$$

则人体姿态发生变换后的左膝盖坐标为： $P'_{L1} = R_{\varepsilon 1}P_{L1}$ 。

以左膝盖为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，并以此坐标系作为左大腿惯性测量单元运动的参照坐标系。人体静止时，令左大腿惯性测量单元坐标系与左膝盖坐标系之间的旋转矩阵为单位

矩阵，在左膝盖坐标系中，左髌关节的坐标为 $P_{L2} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}$ ，通过左大腿惯性测量单元传回的四元数表示的旋转矩阵 $R_{\varepsilon 2}$ ，可以实时得到左大腿的姿态以及位置信息。

则人体姿态发生变换后的左髌关节坐标为： $P'_{L2} = R_{\varepsilon 2} P_{L2}$ 。

5 同时可得左髌关节相对于人体基坐标系的坐标： $P''_{L2} = P'_{L1} + P'_{L2}$ 。

以左髌关节为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，假设人在移动过程中，盆骨的姿态不发生变化，则盆骨在左髌关节坐标系中的位置固定，同时可得盆骨在人体基坐标系中的位置。

10 以盆骨中心为坐标系的原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，右髌关节在盆骨坐标系中的位置固定不变，同时可得右髌关节在人体基坐标系中的位置。同一个人体左髌关节到盆骨的距离，右髌关节到盆骨的距离是已经的，根据距离和左髌关节位置坐标，则能求出盆骨坐标和右髌关节坐标。

15 以右髌关节为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，以右髌关节坐标系作为右大腿惯性测量单元的参照坐标系，人体静止时，令右大腿惯性测量单元坐标系与右髌关节坐标系之间的旋转矩阵为单位矩阵，在右髌关节坐标系中，通过右大腿惯性测量单元传回的四元数表示的旋转矩阵，可以实时得到右大腿的姿态以及位置信息，根据坐标变换，获得人体基坐标系下的右膝盖位置坐标。

20 以右膝盖为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，以右膝盖坐标系作为右小腿惯性测量单元的参照坐标系，人体静止时，令右小腿惯性测量单元坐标系与右膝盖坐标系之间的旋转矩阵为单位矩阵，在右膝盖坐标系中，通过右小腿惯性测量单元传回的四元数表示的旋转矩阵，可以实时得到右小腿的姿态以及位置信息，根据坐标变换，获得
25 人体基坐标系下的右脚踝位置坐标。

右脚触地时，以右脚脚踝为原点，建立人体基坐标系，腿关节坐标系建立方法同上。

同时，以盆骨坐标系作为上身躯干的参照坐标系，人体静止时，令上

身躯干惯性测量单元坐标系与盆骨坐标系之间的旋转矩阵为单位矩阵,在盆骨坐标系中,通过上身躯干惯性测量单元传回的四元数表示的旋转矩阵,可以实时得到上身躯干的姿态以及位置信息,根据坐标变换,获得人体基坐标系下的肩膀位置坐标。

5 以肩膀为坐标系原点建立坐标系,坐标系姿态与人体基坐标系一致,并将肩膀坐标系作为大臂运动的参照坐标系,通过大臂惯性测量单元传回的四元数表示的旋转矩阵,可以实时得到大臂的姿态以及位置信息,根据坐标变换,获得人体基坐标系下手肘的位置坐标。

10 以手肘为坐标系原点建立坐标系,坐标系姿态与人体基坐标系一致,并将手肘坐标系作为小臂运动的参照坐标系,通过小臂惯性测量单元传回的四元数表示的旋转矩阵,可以实时得到小臂的姿态以及位置信息,根据坐标变换,获得人体基坐标系下手腕的位置坐标。

15 从而获得人体在人体基坐标系下的完整姿态以及各个关节的位置坐标。通过人体基坐标系和全局坐标系之间的变换矩阵,可以得到全局坐标系下的人体完整姿态以及各个关节的位置坐标。

S2 具体包括:

20 S21, 获取全局坐标系下机器人基座的坐标; 所述基座为机器人触地的基座。具体的, 全局坐标系下机器人基座的位置固定不变, 以基座中心点为全局坐标系原点, 坐标系姿态与全局坐标系一致, 建立基座坐标系, 基座中心点在全局坐标系下的坐标由实际测量获得。

S22, 获取利用第二惯性测量单元测量的第二旋转矩阵; 所述第二惯性测量单元为多个, 分别设置于机器人的基座和连杆上。如图 5 所示, IMU1 放置在机器人基座上, 其余 5 个 IMU 放置在机器人各个连杆上, 其余 5 个 IMU 分别为 IMU2、IMU3、IMU4、IMU5 和 IMU6。

25 S23, 根据所述全局坐标系下机器人基座的坐标和所述第二旋转矩阵, 确定机器人在全局坐标系下的位姿。

30 具体的, 机器人上的惯性测量单元放置位置如图 5 所示, 本发明实例选取 6 自由度机械臂, 在基座和每个连杆上分别放置一个惯性测量单元, 用于获取机械臂的姿态信息。上述提到的获得人体上半身姿态的方法同样适用于机械臂姿态的获取, 不再赘述。以此, 获得全局坐标系下机器人的

姿态。

S3 具体包括:

S31, 根据所述人体在全局坐标系下的位姿和所述机器人在全局坐标系下的位姿, 确定人体与机器人之间的距离集合; 所述距离集合中包括人体中每个人体躯干分别与机器人连杆之间的距离; 所述人体躯干包括上身躯干、左大臂、右大臂、左小臂、右小臂、左大腿、右大腿、左小腿和右小腿。

S32, 选取所述距离集合中最小值作为人体与机器人之间的距离。

S33, 根据所述人体与机器人之间的距离确定机器人的运动速度。

10 将人体各部分躯干以及机械臂的各个连杆视为空间中的圆柱体, 利用数学公式求解圆柱体间的最短距离。具体的, 将人体每部分身体躯干各视为一个圆柱体, 机器人的每个连杆各视为一个圆柱体, 利用数学公式求解圆柱间的最短距离。

15 首先求出两个圆柱体中轴线之间的距离, 问题转换为求解空间中两条线段之间的距离。以任意两条线段为例, 人体上的一条线段 AB, 其中 A 和 B 的坐标分别为 $A(x_a, y_a, z_a)$ 和 $B(x_b, y_b, z_b)$, 机械臂上的一条线段 CD, 其中 C 和 D 的坐标分别为 $C(x_c, y_c, z_c)$ 和 $D(x_d, y_d, z_d)$ 。

定义中间变量: H、I、J、K、L、M、N、O、P 和 Q, 令 $H = x_b - x_a$, $I = y_b - y_a$, $J = z_b - z_a$, $K = x_d - x_c$, $L = y_d - y_c$, $M = z_d - z_c$,

$$20 \quad \begin{cases} N = H \cdot I \cdot L - I \cdot I \cdot K - J \cdot J \cdot K + H \cdot J \cdot M \\ O = H \cdot H \cdot L - H \cdot I \cdot K - I \cdot J \cdot M + J \cdot J \cdot L \\ P = H \cdot J \cdot K - H \cdot H \cdot M - I \cdot I \cdot M + I \cdot J \cdot L \\ Q = -x_a N + y_a O - z_a P \end{cases}$$

可以得到直线 AB 与直线 CD 之间的公垂线方程: $N \cdot x - 0 \cdot y + P \cdot z + Q = 0$,

$$\text{令 } k' = \frac{O \cdot y_c - N \cdot x_c - P \cdot z_c - Q}{N \cdot K - O \cdot L + P \cdot M},$$

可得公垂线与直线 CD 的交点 $E(x_E, y_E, z_E)$, 其中 $x_E = K \cdot k' + x_c$, $y_E = L \cdot k' + y_c$, $z_E = M \cdot k' + z_c$ 。

25 同理可得公垂线与直线 AB 的交点 $F(x_F, y_F, z_F)$ 。

若点 E 存在于线段 CD 上, 点 F 存在于线段 AB 上, 则线段 AB 与线段 CD 间的最短距离为:

$$L_{EF} = \sqrt{(x_E - x_F)^2 + (y_E - y_F)^2 + (z_E - z_F)^2}。$$

若点 E 不存在于线段 CD 上或点 F 不存在于线段 AB 上时，则使 $\min\{L_{AC}, L_{AD}, L_{BC}, L_{BD}\}$ 为直线 AB 与线段 CD 间的最短距离。

$$L_{AC} = \sqrt{(x_a - x_c)^2 + (y_a - y_c)^2 + (z_a - z_c)^2}$$

$$L_{AD} = \sqrt{(x_a - x_d)^2 + (y_a - y_d)^2 + (z_a - z_d)^2}$$

$$L_{BC} = \sqrt{(x_b - x_c)^2 + (y_b - y_c)^2 + (z_b - z_c)^2}。$$

$$L_{BD} = \sqrt{(x_b - x_d)^2 + (y_b - y_d)^2 + (z_b - z_d)^2}$$

5 则两个圆柱体之间的距离为两个圆柱中轴线之间的距离与两个圆柱体的半径之差，即两个圆柱中轴线之间的距离减去两个圆柱体的半径。

分别计算人体各部分躯干与机器人各个连杆之间的距离，搜索距离的最小值作为人体和机器人之间的距离。根据已知的机器人末端连杆的位置，对时间进行微分获得机器人的运动速度。

10 S4 具体包括：

S41，当所述人体与机器人之间的距离大于第一预设距离阈值且所述机器人的运动速度小于预设速度阈值时，确定人体处于第一安全状态，即视人体处于安全状态。

15 S42，当所述人体与机器人之间的距离大于第一预设距离阈值且机器人速度大于或等于预设速度阈值时，确定人体处于第二安全状态，即视人体处于相对安全状态。

20 S43，当所述人体与机器人之间的距离大于第二预设距离阈值且所述人体与机器人之间的距离小于或等于第一预设距离阈值且所述机器人的运动速度小于预设速度阈值时，确定人体处于第二安全状态，即视人体处于相对安全状态，其中，所述第一预设距离阈值大于所述第二预设距离阈值。

25 S44，当所述人体与机器人之间的距离大于第二预设距离阈值且所述人体与机器人之间的距离小于或等于第一预设距离阈值且所述机器人的运动速度大于或等于预设速度阈值时，确定人体处于第二危险状态，即视人体处于相对危险状态。

S45, 当所述人体与机器人之间的距离小于或等于第二预设距离阈值且所述机器人的运动速度小于预设速度阈值时, 确定人体处于第二危险状态, 即视人体处于相对危险状态。

5 S46, 当所述人体与机器人之间的距离小于或等于第二预设距离阈值且所述机器人的运动速度大于或等于预设速度阈值时, 确定人体处于第一危险, 即视人体处于危险状态。

具体的, 根据机器人的外展距离、所安装的工具的长度、机器人的工作性能以及先验经验来确定距离阈值和速度阈值, 本发明实施例中所述第一预设距离阈值为 $L_{\max}$, 所述第二预设距离阈值为 $L_{\max}/3$, 所述预设速度
10 阈值 $L_{\max}/1.25$ 。其中, $L_{\max}$ 为机器人外展长度的最大值, 第二预设距离阈值为机器人可外展长度的最大值的三分之一, 即 $0.33L_{\max}$, 而正常人的反应能力参数为 1.25 秒, 即发现前方有目标反映到大脑需 0.5 秒, 从大脑反应到手、脚后并采取措施需 0.75 秒。

通过上述方法, 可以在人机协作过程中, 通过监控机器人与人体之间的
15 的距离和机器人的运行速度确定当前人体的安全状态, 根据不同安全状态做出下一步工作计划, 有效避免危险情况发生, 使人机协作更安全更高效。

本发明还提供了一种人机协作中人体安全评估系统, 包括:

第一获取模块, 用于获取人体在全局坐标系下的位姿。

第二获取模块, 用于获取机器人在全局坐标系下的位姿。

20 距离和速度确定模块, 用于根据所述人体在全局坐标系下的位姿和所述机器人在全局坐标系下的位姿, 确定人体与机器人之间的距离以及机器人的运动速度。

人体安全等级确定模块, 用于根据所述人体与机器人之间的距离和所述机器人的运动速度, 确定人机协作中人体的安全等级。

25 优选的, 所述第一获取模块具体包括:

第一姿态关系和第二姿态关系获取单元, 用于获取人体基坐标系与全局坐标系之间的第一姿态关系以及惯性测量单元坐标系与全局坐标系之间的第二姿态关系。

第三姿态关系确定单元, 用于根据所述第一姿态关系和所述第二姿态
30 关系确定人体基坐标系与惯性测量单元坐标系之间的第三姿态关系; 其

中, $R_B^S = (R_S^G)^T R_B^G$, R_B^G 为第一姿态关系, R_S^G 为第二姿态关系, R_B^S 为第三姿态关系, G 为全局坐标系, B 为人体基坐标系, S 为惯性测量单元坐标系。

5 人体基坐标系原点确定单元, 用于选取人体行走时, 人体脚触地所在侧的脚踝为所述人体基坐标系的原点; 所述人体基坐标系的原点在人体的左脚踝和人体的右脚踝之间切换。

10 第一旋转矩阵获取单元, 用于获取利用第一惯性测量单元测量的第一旋转矩阵; 所述第一惯性测量单元为多个, 分别设置于人体的上身躯干、左大臂、右大臂、左小臂、右小臂、左大腿、右大腿、左小腿、右小腿、左脚背和右脚背。

人体在全局坐标系下位姿确定单元, 用于根据所述人体基坐标系的原点、所述第一旋转矩阵和所述第三姿态关系。

具体的, 在本发明实施例中, 所述第一获取模块具体包括:

15 标定单元, 用于对惯性测量单元进行标定, 得到惯性测量单元坐标系与其对应人体坐标系之间的坐标变换矩阵。

数据接收单元, 用于接收惯性测量单元返回的四元数和角速度。

位姿获取单元, 用于根据所得各个惯性测量单元的角速度以及四元数, 得到人体在人体基坐标系下的姿态及位置坐标。

20 坐标转换单元, 用于将所述人体在人体基坐标系下的位置坐标转换为人体在全局坐标系下的位置坐标。

优选的, 所述第二获取模块具体包括:

基座坐标获取单元, 用于获取全局坐标系下机器人基座的坐标。

25 第二旋转矩阵获取单元, 用于获取利用第二惯性测量单元测量的第二旋转矩阵; 所述第二惯性测量单元为多个, 分别设置于机器人的基座和连杆上。

机器人在全局坐标系下位姿确定单元, 用于根据所述全局坐标系下机器人基座的坐标和所述第二旋转矩阵, 确定机器人在全局坐标系下的位姿。

本说明书中各个实施例采用递进的方式描述, 每个实施例重点说明的

都是与其他实施例的不同之处,各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。对于实施例公开的系统而言,由于其与实施例公开的方法相对应,所以描述的比较简单,相关之处参见方法部分说明即可。

- 本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上
- 5 实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想;同时,对于本领域的一般技术人员,依据本发明的思想,在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述,本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

权 利 要 求 书

1、一种人机协作中人体安全评估方法，其特征在于，包括：

获取人体在全局坐标系下的位姿；

获取机器人在全局坐标系下的位姿；

5 根据所述人体在全局坐标系下的位姿和所述机器人在全局坐标系下的位姿，确定人体与机器人之间的距离以及机器人的运动速度；

根据所述人体与机器人之间的距离和所述机器人的运动速度，确定人机协作中人体的安全等级。

2、根据权利要求 1 所述的人机协作中人体安全评估方法，其特征在于，所述获取人体在全局坐标系下的位姿，具体包括：

10 获取人体基坐标系与全局坐标系之间的第一姿态关系 R_B^G 以及惯性测量单元坐标系与全局坐标系之间的第二姿态关系 R_S^G ；

根据所述第一姿态关系和所述第二姿态关系确定人体基坐标系与惯性测量单元坐标系之间的第三姿态关系 R_B^S ；其中， $R_B^S = (R_S^G)^T R_B^G$ ， R_B^G 为第一姿态关系， R_S^G 为第二姿态关系， R_B^S 为第三姿态关系， G 为全局坐标系， B 为人体基坐标系， S 为惯性测量单元坐标系；

20 选取人体行走时，人体脚触地所在侧的脚踝为所述人体基坐标系的原点；所述人体基坐标系的原点在人体的左脚踝和人体的右脚踝之间切换；

获取利用第一惯性测量单元测量的第一旋转矩阵；所述第一惯性测量单元为多个，分别设置于人体的上身躯干、左大臂、右大臂、左小臂、右小臂、左大腿、右大腿、左小腿、右小腿、左脚背和右脚背；

根据所述人体基坐标系的原点、所述第一旋转矩阵和所述第三姿态关系，确定人体在全局坐标系下的位姿。

3、根据权利要求 2 所述的人机协作中人体安全评估方法，其特征在于，所述根据所述人体基坐标系的原点、所述第一旋转矩阵和所述第三姿态关系，确定人体在全局坐标系下的位姿，具体包括：

25 在开始运动之前，人体保持校准姿势，校准过程为：在所有的第一惯性测量单元上进行，每个所述第一惯性测量单元都与一个具有预定义的坐标系的身体部分相关联，将关联后的第一惯性测量单元用于实时运动捕捉中；

获取人体在人体基坐标系下的位姿：人体肢体长度是确定已知的，将关联后的第一惯性测量单元放置在人体的上身躯干，以人体直立静止时为初始状态；人在行走时，总会保持一只脚触地，取该侧脚踝为人体基坐标系原点，人体静止时，令每个第一惯性测量单元坐标系与参照坐标系之间的第一旋转矩阵为单位矩阵，人体运动时，通过第一惯性测量单元返回的四元数 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4)$ ，实时得到人体每一躯干的姿态以及位置信息；

左脚触地时，左脚踝人体基坐标系作为左小腿的参照坐标系，已知人体静止时，在人体基坐标系中左膝盖的坐标为 $P_{L1} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$ ，通过左小腿处

的第一惯性测量单元测量的第一旋转矩阵 $R_{\varepsilon 1}$ 为：

$$R_{\varepsilon 1} = \begin{bmatrix} 1-2\varepsilon_2^2-2\varepsilon_3^2 & 2(\varepsilon_1\varepsilon_2-\varepsilon_3\varepsilon_4) & 2(\varepsilon_1\varepsilon_3+\varepsilon_2\varepsilon_4) \\ 2(\varepsilon_1\varepsilon_2+\varepsilon_3\varepsilon_4) & 1-2\varepsilon_1^2-2\varepsilon_3^2 & 2(\varepsilon_2\varepsilon_3-\varepsilon_1\varepsilon_4) \\ 2(\varepsilon_1\varepsilon_2-\varepsilon_3\varepsilon_4) & 2(\varepsilon_2\varepsilon_3+\varepsilon_1\varepsilon_4) & 1-2\varepsilon_1^2-2\varepsilon_2^2 \end{bmatrix};$$

则人体姿态发生变换后的左膝盖坐标为： $P'_{L1} = R_{\varepsilon 1}P_{L1}$ ；

以左膝盖为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，并以左膝盖为坐标系原点建立的坐标系作为左大腿处的第一惯性测量单元运动的参照坐标系；人体静止时，令左大腿处的第一惯性测量单元坐标系与左膝盖坐标系之间的第一旋转矩阵为单位矩阵，在左膝盖坐标系

中，左髌关节的坐标为 $P_{L2} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}$ ，通过左大腿处的第一惯性测量单元传

回的四元数表示的第一旋转矩阵 $R_{\varepsilon 2}$ ，实时得到左大腿的姿态以及位置信息；

则人体姿态发生变换后的左髌关节坐标为： $P'_{L2} = R_{\varepsilon 2}P_{L2}$ ；

根据所述人体姿态发生变换后的左髌关节坐标和所述人体姿态发生变换后的左膝盖坐标，得到左髌关节在人体基坐标系下的坐标：
 $P''_{L2} = P'_{L1} + P'_{L2}$ ；

以左髌关节为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，假设人在移动过程中，盆骨的姿态不发生变化，则盆骨在左髌关节坐

标系中的位置固定，同时得盆骨在人体基坐标系中的位置；

以盆骨中心作为坐标系的原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，右髋关节在盆骨坐标系中的位置固定不变，得到右髋关节在人体基坐标系中的位置；

5 以右髋关节为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，以右髋关节坐标系作为右大腿处第一惯性测量单元的参照坐标系，人体静止时，令右大腿处第一惯性测量单元坐标系与右髋关节坐标系之间的第一旋转矩阵为单位矩阵，在右髋关节坐标系中，通过右大腿处的第一惯性测量单元传回的四元数表示的第一旋转矩阵，实时得到右大腿的姿态以及位置信息，根据坐标变换，获得人体基坐标系下右膝盖位置坐标；

10 以右膝盖为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，以右膝盖坐标系作为右小腿处第一惯性测量单元的参照坐标系，人体静止时，令右小腿处第一惯性测量单元坐标系与右膝盖坐标系之间的第一旋转矩阵为单位矩阵，在右膝盖坐标系中，通过右小腿处的第一惯性测量单元传回的四元数表示的第一旋转矩阵，得到右小腿的姿态以及位置信息，根据坐标变换，获得人体基坐标系下右脚踝位置坐标；

右脚触地时，以右脚踝为原点，建立人体基坐标系，腿关节坐标系建立方法同上；

20 同时，以盆骨坐标系作为上身躯干的参照坐标系，人体静止时，令上身躯干惯性测量单元坐标系与盆骨坐标系之间的第一旋转矩阵为单位矩阵，在盆骨坐标系中，通过上身躯干处第一惯性测量单元传回的四元数表示的第一旋转矩阵，实时得到上身躯干的姿态以及位置信息，根据坐标变换，获得人体基坐标系下的肩膀位置坐标；

25 以肩膀为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，并将肩膀坐标系作为大臂运动的参照坐标系，通过大臂处第一惯性测量单元传回的四元数表示的第一旋转矩阵，实时得到大臂的姿态以及位置信息，根据坐标变换，获得人体基坐标系下手肘的位置坐标；

30 以手肘为坐标系原点建立坐标系，坐标系姿态与人体基坐标系一致，并将手肘坐标系作为小臂运动的参照坐标系，通过小臂处第一惯性测量单元传回的四元数表示的第一旋转矩阵，实时得到小臂的姿态以及位置信

息, 根据坐标变换, 获得人体基坐标系下手腕的位置坐标;

从而获得人体在人体基坐标系下的完整姿态以及各个关节的位置坐标; 通过人体基坐标系和全局坐标系之间的第三姿态关系, 得到全局坐标系下的人体完整姿态以及各个关节的位置坐标。

5 4、根据权利要求 1 所述的人机协作中人体安全评估方法, 其特征在于, 所述获取机器人在全局坐标系下的位姿, 具体包括:

获取全局坐标系下机器人基座的坐标;

获取利用第二惯性测量单元测量的第二旋转矩阵; 所述第二惯性测量单元为多个, 分别设置于机器人的基座和连杆上;

10 根据所述全局坐标系下机器人基座的坐标和所述第二旋转矩阵, 确定机器人在全局坐标系下的位姿。

5 5、根据权利要求 1 所述的人机协作中人体安全评估方法, 其特征在于, 所述根据所述人体在全局坐标系下的位姿和所述机器人在全局坐标系下的位姿, 确定人体与机器人之间的距离以及机器人的运动速度, 具体包
15 括:

根据所述人体在全局坐标系下的位姿和所述机器人在全局坐标系下的位姿, 确定人体与机器人之间的距离集合; 所述距离集合中包括人体中每个人体躯干分别与机器人连杆之间的距离; 所述人体躯干包括上身躯干、左大臂、右大臂、左小臂、右小臂、左大腿、右大腿、左小腿和右小
20 腿;

选取所述距离集合中最小值作为人体与机器人之间的距离;

根据所述人体与机器人之间的距离确定机器人的运动速度。

25 6、根据权利要求 1 所述的人机协作中人体安全评估方法, 其特征在于, 所述根据所述人体与机器人之间的距离和所述机器人的运动速度, 确定人机协作中人体的安全等级, 具体包括:

当所述人体与机器人之间的距离大于第一预设距离阈值且所述机器人的运动速度小于预设速度阈值时, 确定人体处于第一安全状态;

当所述人体与机器人之间的距离大于第一预设距离阈值且机器人速度大于或等于预设速度阈值时, 确定人体处于第二安全状态;

30 当所述人体与机器人之间的距离大于第二预设距离阈值且所述人体

与机器人之间的距离小于或等于第一预设距离阈值且所述机器人的运动速度小于预设速度阈值时，确定人体处于第二安全状态；所述第一预设距离阈值大于所述第二预设距离阈值；

5 当所述人体与机器人之间的距离大于第二预设距离阈值且所述人体与机器人之间的距离小于或等于第一预设距离阈值且所述机器人的运动速度大于或等于预设速度阈值时，确定人体处于第二危险状态；

当所述人体与机器人之间的距离小于或等于第二预设距离阈值且所述机器人的运动速度小于预设速度阈值时，确定人体处于第二危险状态；

10 当所述人体与机器人之间的距离小于或等于第二预设距离阈值且所述机器人的运动速度大于或等于预设速度阈值时，确定人体处于第一危险状态。

7、根据权利要求6所述的人机协作中人体安全评估方法，其特征在于，所述第一预设距离阈值为 $L_{\max}$ ；所述第二预设距离阈值为 $L_{\max}/3$ ；所述预设速度阈值为 $L_{\max}/1.25$ ；其中， $L_{\max}$ 为机器人外展长度的最大值。

15 8、一种人机协作中人体安全评估系统，其特征在于，包括：

第一获取模块，用于获取人体在全局坐标系下的位姿；

第二获取模块，用于获取机器人在全局坐标系下的位姿；

20 距离和速度确定模块，用于根据所述人体在全局坐标系下的位姿和所述机器人在全局坐标系下的位姿，确定人体与机器人之间的距离以及机器人的运动速度；

人体安全等级确定模块，用于根据所述人体与机器人之间的距离和所述机器人的运动速度，确定人机协作中人体的安全等级。

9、根据权利要求8所述的人机协作中人体安全评估系统，其特征在于，所述第一获取模块具体包括：

25 第一姿态关系和第二姿态关系获取单元，用于获取人体基坐标系与全局坐标系之间的第一姿态关系以及惯性测量单元坐标系与全局坐标系之间的第二姿态关系；

第三姿态关系确定单元，用于根据所述第一姿态关系和所述第二姿态关系确定人体基坐标系与惯性测量单元坐标系之间的第三姿态关系；其

中, $R_B^S = (R_S^G)^T R_B^G$, R_B^G 为第一姿态关系, R_S^G 为第二姿态关系, R_B^S 为第三姿态关系, G 为全局坐标系, B 为人体基坐标系, S 为惯性测量单元坐标系;

5 人体基坐标系原点确定单元, 用于选取人体行走时, 人体脚触地所在侧的脚踝为所述人体基坐标系的原点; 所述人体基坐标系的原点在人体的左脚踝和人体的右脚踝之间切换;

10 第一旋转矩阵获取单元, 用于获取利用第一惯性测量单元测量的第一旋转矩阵; 所述第一惯性测量单元为多个, 分别设置于人体的上身躯干、左大臂、右大臂、左小臂、右小臂、左大腿、右大腿、左小腿、右小腿、左脚背和右脚背;

人体在全局坐标系下位姿确定单元, 用于根据所述人体基坐标系的原点、所述第一旋转矩阵和所述第三姿态关系。

10、根据权利要求 8 所述的人机协作中人体安全评估系统, 其特征在于, 所述第二获取模块具体包括:

15 基座坐标获取单元, 用于获取全局坐标系下机器人基座的坐标;

第二旋转矩阵获取单元, 用于获取利用第二惯性测量单元测量的第二旋转矩阵; 所述第二惯性测量单元为多个, 分别设置于机器人的基座和连杆上;

20 机器人在全局坐标系下位姿确定单元, 用于根据所述全局坐标系下机器人基座的坐标和所述第二旋转矩阵, 确定机器人在全局坐标系下的位姿。

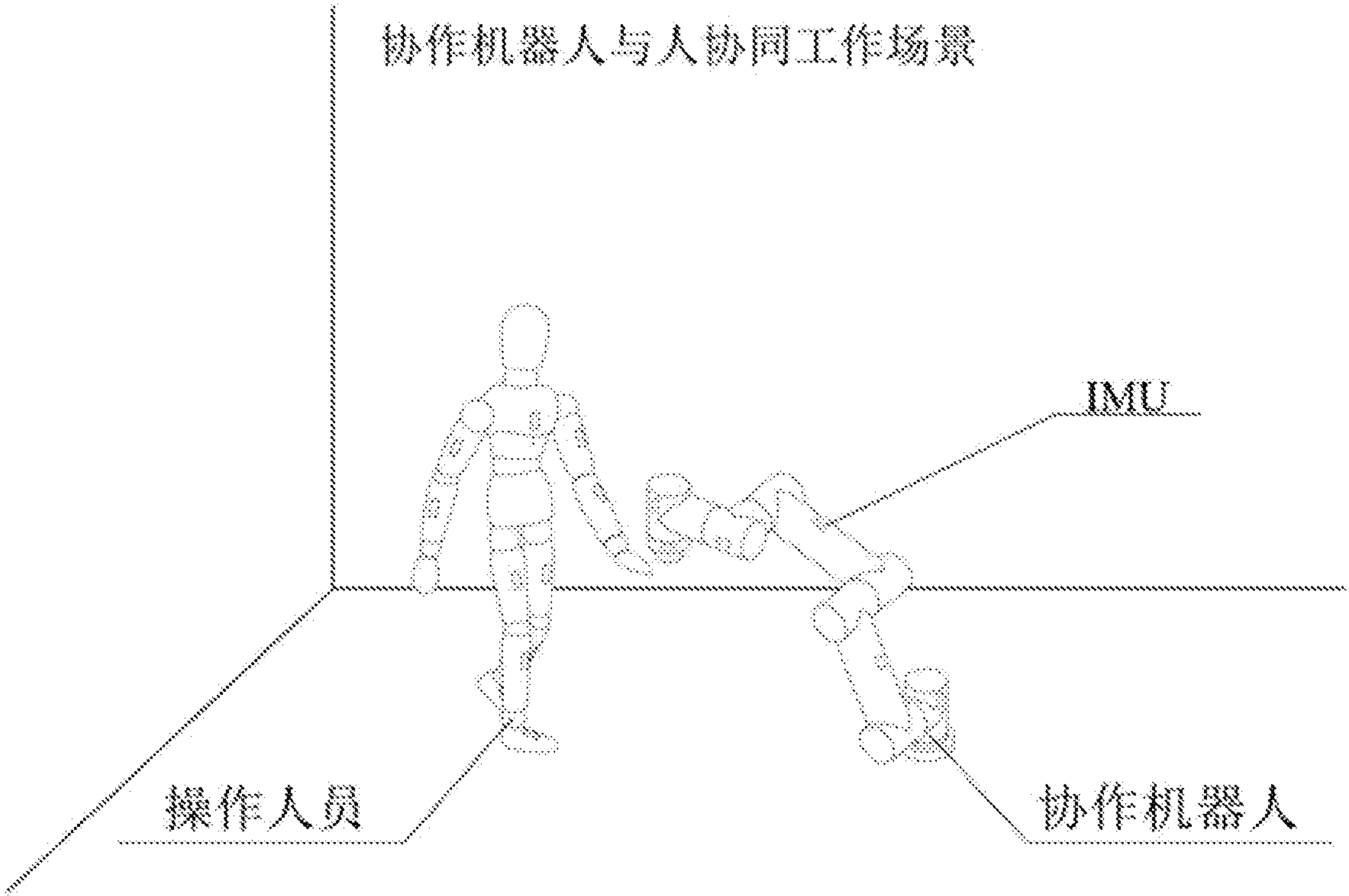


图 1

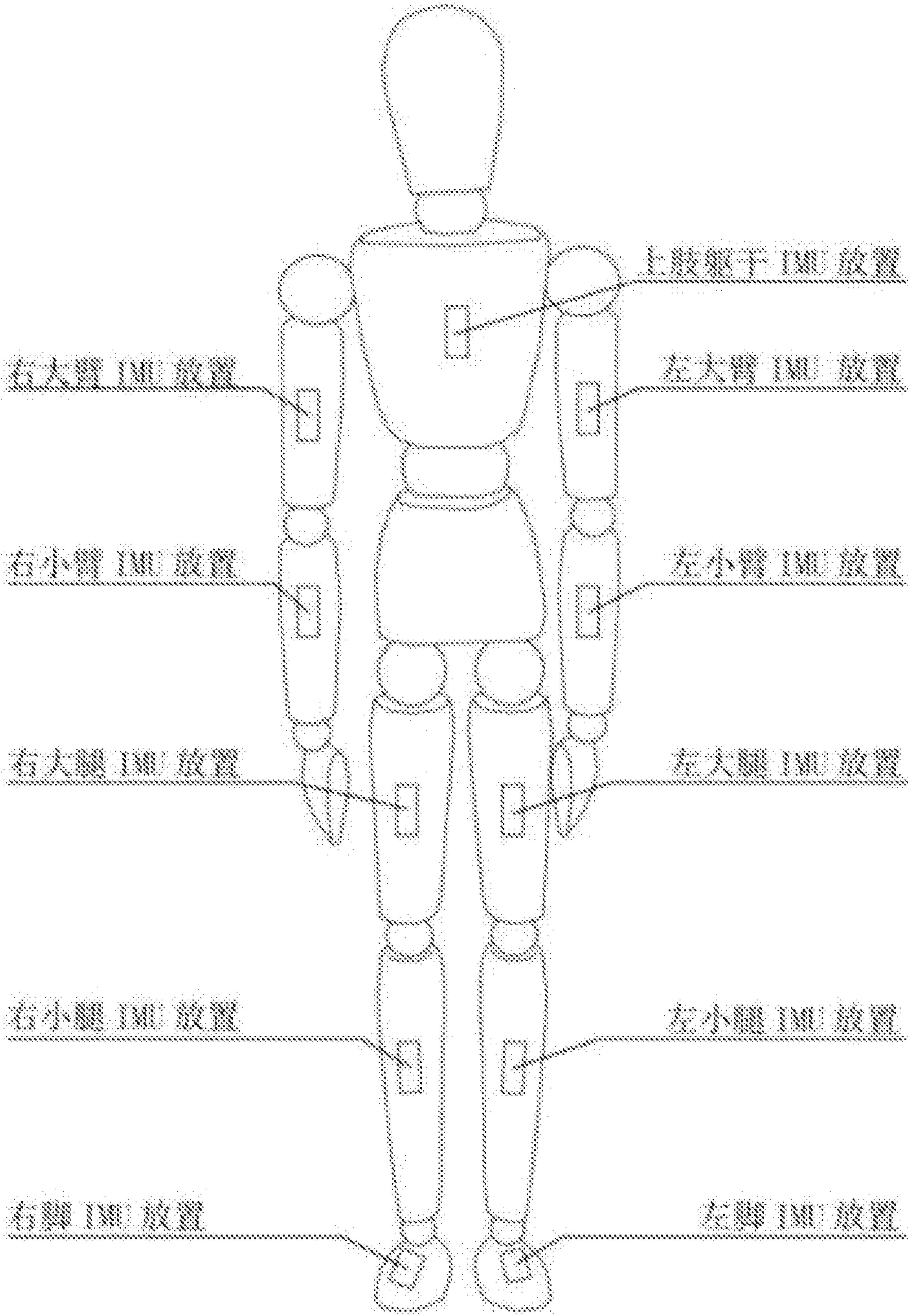


图 2

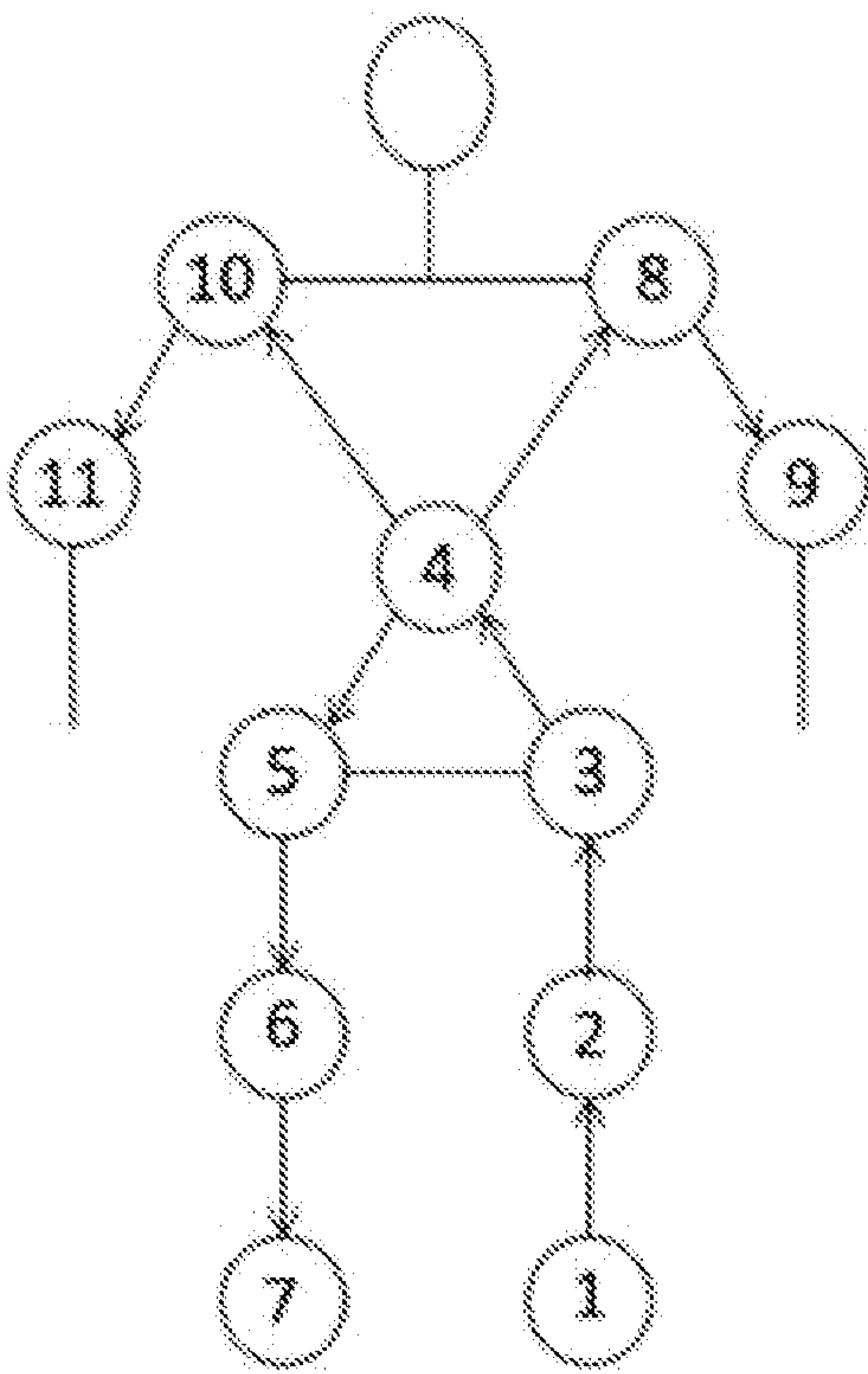


图 3

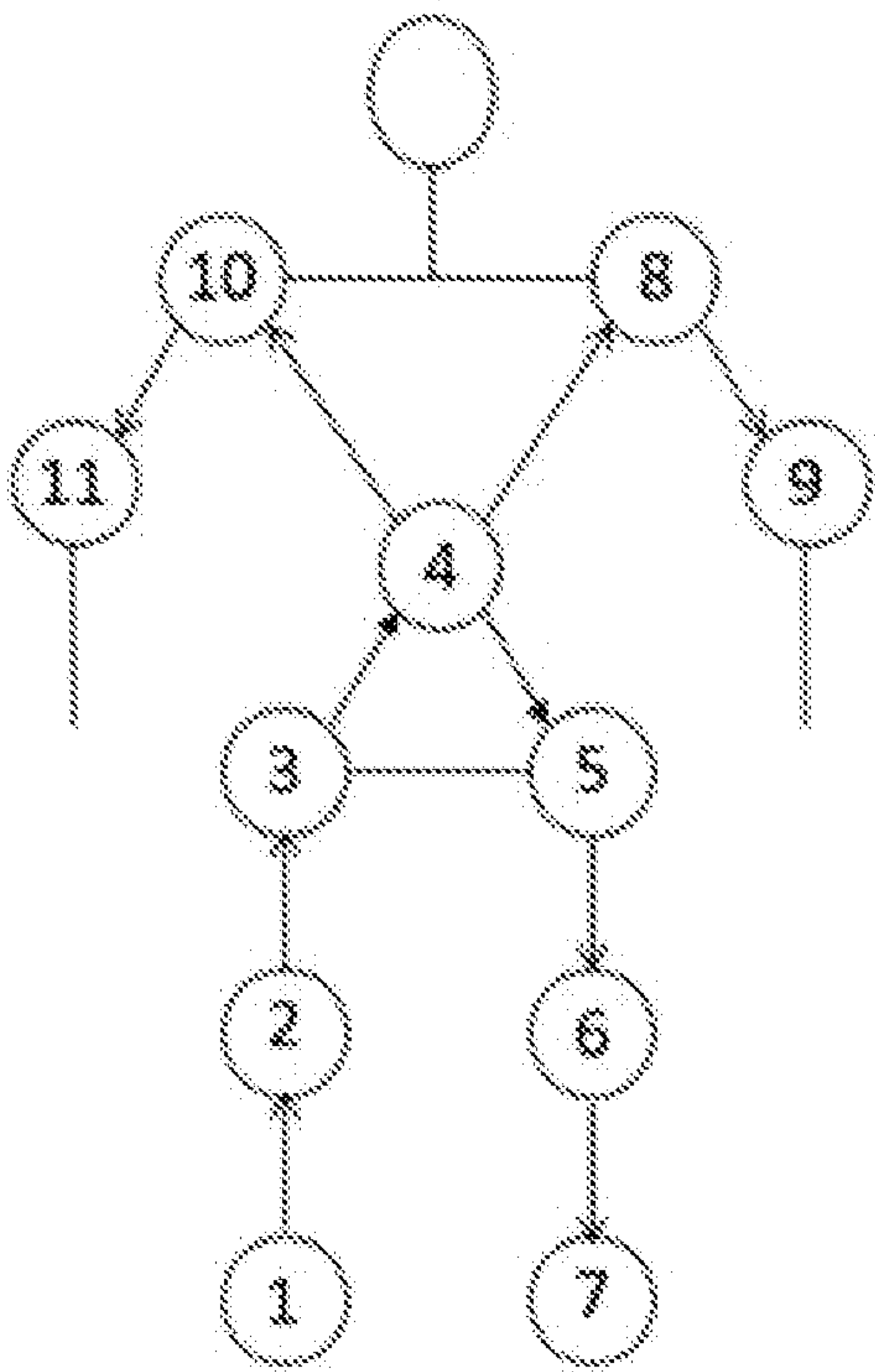


图 4

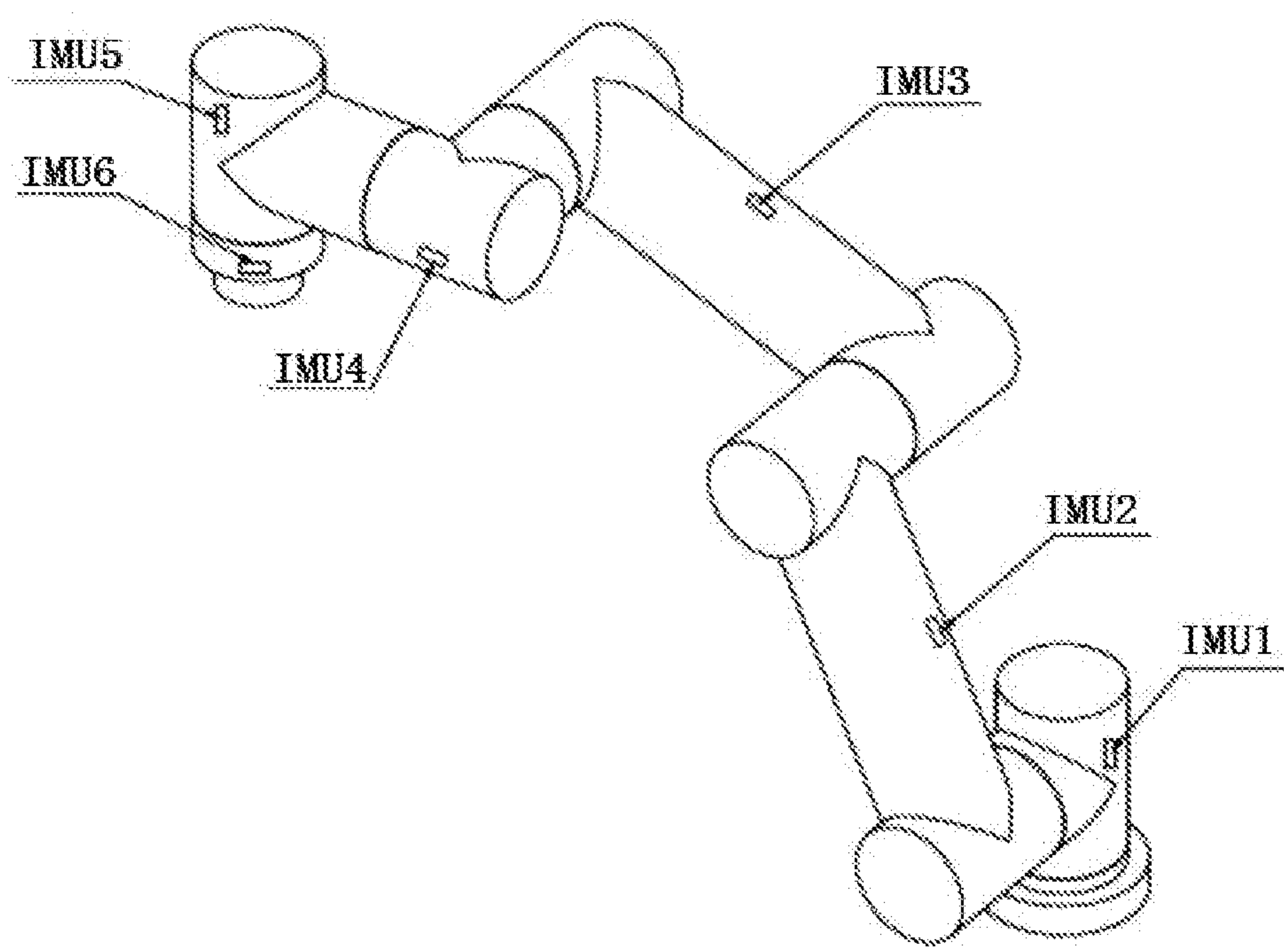


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/102934

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B25J 19/04(2006.01)i; G06T 17/00(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)

B25J;G06T

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)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 机器人, 机械臂, 机械手, 操作, 人机, 协作, 共融, 协调, 交互, 碰撞, 安全, 评估, 预测, 评测, 距离, 速度, 运动, 位姿, 姿态, 姿势, 位置, 坐标, 惯性, 惯导, 陀螺, 传感器, 山东大学, 周乐来, robot, automaton, manipulator, human, safe, operate, handle, manipulate, cooperation, coordinate, bump, collision, crash, impact, evaluate, distance, speed, rate, move, gesture, pose, inertial, sensor, SHANDONG UNIVERSITY, ZHOU Lelai

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 110978064 A (SHANDONG UNIVERSITY) 10 April 2020 (2020-04-10) claims 1-8, description paragraphs [0001]-[0065], [0072]-[0154] and figures 1-5	1-10
Y	CN 108527370 A (BEIJING INSTITUTE OF SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING) 14 September 2018 (2018-09-14) description, paragraphs [0001]-[0026] and [0034]-[0054], and figures 1-5	1-10
Y	CN 108527305 A (NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY) 14 September 2018 (2018-09-14) description, paragraphs [0001]-[0040] and [0050]-[0099], and figures 1-8	1-10
Y	CN 106153077 A (SUZHOU TANTELA AUTOMATIC TECHNOLOGY CO., LTD.) 23 November 2016 (2016-11-23) description, paragraphs [0001]-[0023] and [0029]-[0102], and figures 1-5	2-5, 9, 10
A	CN 103386683 A (HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY) 13 November 2013 (2013-11-13) entire document	1-10

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“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)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“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

“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

“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

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

08 September 2020

Date of mailing of the international search report

21 October 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/102934

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 4798461 A (BERTIN & CIE.) 17 January 1989 (1989-01-17) entire document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2020/102934

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	110978064	A	10 April 2020	None			
CN	108527370	A	14 September 2018	CN	108527370	B	02 June 2020
CN	108527305	A	14 September 2018	None			
CN	106153077	A	23 November 2016	CN	106153077	B	14 June 2019
CN	103386683	A	13 November 2013	CN	103386683	B	08 April 2015
US	4798461	A	17 January 1989	FR	2584489	A1	09 January 1987
				EP	0262142	B1	19 September 1990
				DE	3674408	D1	25 October 1990
				JP	S63501242	A	12 May 1988
				FR	2584489	B1	08 June 1990
				EP	0262142	A1	06 April 1988
				WO	198700268	A1	15 January 1987

国际检索报告		国际申请号 PCT/CN2020/102934
A. 主题的分类 B25J 19/04(2006.01)i; G06T 17/00(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) B25J;G06T 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)) CNPAT, CNKI, WPI, EPDOC:机器人, 机械臂, 机械手, 操作, 人机, 协作, 共融, 协调, 交互, 碰撞, 安全, 评估, 预测, 评测, 距离, 速度, 运动, 位姿, 姿态, 姿势, 位置, 坐标, 惯性, 惯导, 陀螺, 传感器, 山东大学, 周乐来, robot, automaton, manipulator, human, safe, operate, handle, manipulate, cooperation, coordinate, bump, collision, crash, impact, evaluate, distance, speed, rate, move, gesture, pose, inertial, sensor, SHANDONG UNIVERSITY, ZHOU Lelai		
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
PX	CN 110978064 A (山东大学) 2020年 4月 10日 (2020 - 04 - 10) 权利要求1-8、说明书第[0001]-[0065], [0072]-[0154]段和图1-5	1-10
Y	CN 108527370 A (北京卫星环境工程研究所) 2018年 9月 14日 (2018 - 09 - 14) 说明书第[0001]-[0026], [0034]-[0054]段和图1-5	1-10
Y	CN 108527305 A (南京理工大学) 2018年 9月 14日 (2018 - 09 - 14) 说明书第[0001]-[0040], [0050]-[0099]段和图1-8	1-10
Y	CN 106153077 A (苏州坦特拉自动化科技有限公司) 2016年 11月 23日 (2016 - 11 - 23) 说明书第[0001]-[0023], [0029]-[0102]段和图1-5	2-5, 9, 10
A	CN 103386683 A (哈尔滨工程大学) 2013年 11月 13日 (2013 - 11 - 13) 全文	1-10
A	US 4798461 A (BERTIN & CIE.) 1989年 1月 17日 (1989 - 01 - 17) 全文	1-10
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 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 2020年 9月 8日		国际检索报告邮寄日期 2020年 10月 21日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 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 穆飞鹏 电话号码 86-(10)-53962560

国际申请号
PCT/CN2020/102934

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	110978064	A	2020年 4月 10日	无			
CN	108527370	A	2018年 9月 14日	CN	108527370	B	2020年 6月 2日
CN	108527305	A	2018年 9月 14日	无			
CN	106153077	A	2016年 11月 23日	CN	106153077	B	2019年 6月 14日
CN	103386683	A	2013年 11月 13日	CN	103386683	B	2015年 4月 8日
US	4798461	A	1989年 1月 17日	FR	2584489	A1	1987年 1月 9日
				EP	0262142	B1	1990年 9月 19日
				DE	3674408	D1	1990年 10月 25日
				JP	S63501242	A	1988年 5月 12日
				FR	2584489	B1	1990年 6月 8日
				EP	0262142	A1	1988年 4月 6日
				WO	198700268	A1	1987年 1月 15日