

文章编号 1004-924X(2013)02-0356-15

# 物理性人-机器人交互研究与发展现状

熊根良\*, 陈海初, 梁发云, 董增文  
(南昌大学机电工程学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:**介绍了物理性人-机器人交互的定义,对该过程可能对人造成的伤害进行了分析,给出了物理性人-机器人交互安全评价指标,并总结了目前该领域采用的安全策略。综述了国内外在物理性人-机器人交互方面的研究进展,在分析物理性人-机器人交互研究现状的基础上,阐述了该领域面临的问题和挑战。文章指出,目前物理性人-机器人交互伤害分析和安全评估研究主要集中在钝/锐碰撞造成的骨骼和软组织伤害上,缺乏对脏器、血管、神经等损伤的研究。安全策略主要方法有碰撞避免、包裹软弹性材料、关节柔顺设计等。通过对比各种安全策略的设计思想和组成方案,总结出了各种策略的优缺点和存在的主要问题。由于现有的研究表明单一的手段和策略无法保证人-机器人交互的安全性,提出将认知性人-机器人交互和物理性人-机器人交互相结合来增强后者的安全性将是未来发展的方向。

**关键词:**物理性人-机器人交互;伤害分析;安全评估;安全反应策略

**中图分类号:**TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0356

## Research and development statue of physical human-robot interaction

XIONG Gen-liang\*, CHEN Hai-chu, LIANG Fa-yun, DONG Zeng-wen

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

\* Corresponding author, E-mail: xgl.lijing@yahoo.com.cn

**Abstract:** The definition of physical human-robot interaction is introduced, the injuries for human from the interaction processing are analyzed, and the safety assessments are given. Then, it summarizes the safety strategy used in the physical human-robot interaction. Furthermore, it presents the research progress in the physical human-robot interaction and highlights the questions and challenges in this field on the basis of analysis and research mentioned above. This paper points out that the injuries analysis and safety assessments of physical human-robot interaction mainly focus on the blunt/sharp collision caused the bones and soft tissue injury currently, and lack of study on organs, blood vessels, nerves, and other injuries. Collision avoidance, wrapped in soft elastic material and compliant joint design are the main safety policy. By comparing design ideas and construction schemes of these methods, it summarizes the advantages, disadvantages and main problems. It suggests that the combination of cognitive human-robot interaction and physical human-robot interaction will be the developing direction to enhance the safety of the latter because a single means or a strategy can not guarantee the safety of human-robot interaction.

**Key words:** physical human-robot interaction; injury analysis; safe evaluation; safe reaction strategy

**收稿日期:**2012-08-01; **修订日期:**2012-10-11.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 61263045, 50905083, 51265034); 国家博士后基金资助项目(No. 2011M501090); 江西省科技支撑计划资助项目(No. 20112BBE50017)

## 1 引言

近几年来,随着工业机器人技术的日益成熟,机器人研究的热点已逐渐转移到以“人为中心”的服务机器人,从而给机器人研究领域带来了新的挑战,即人-机器人交互(Human-robot Interaction)问题。机器人的人机交互分为物理性人机交互(Physical Human-robot Interaction)和认知性人机交互(Cognitive Human-robot Interaction)<sup>[1]</sup>。物理性人机交互关注的主要问题是安全性和可靠性,两者贯穿于人类环境下使用的机器人设计和控制的所有阶段。虽然认知性人机交互也与此相关,但以“人为中心”的机器人应用领域越来越多,人与机器人已无法避免共享工作空间,当人与机器人的距离越靠越近时,两者之间难免发生相互接触。当机器人本体与人类用户接触时(这种情形称之为物理性人机交互),最重要的是保证人类用户的安全,也就是说,机器人在任何情况下都不应该伤害人类。因此,最具革命性和挑战性的下一代机器人的特征应该是具有安全、可靠的物理性人机交互功能<sup>[2]</sup>。

机器人如果能像个人电脑一样存在于人们日常生活的每一天,它必须保证非专业人士使用机器人或在机器人周围时是安全的。对于要近距离与机器人系统交互的情况,以往的安全概念即不允许人进入机器人工作空间的原则不再适用,而是没有具体的安全保障,机器人不允许工作在人类附近。

总之,机器人物理性人机交互的研究旨在保证人类和机器人本身的安全。机器人与人发生碰撞是这类应用中造成伤害的主要来源,关于碰撞检测与碰撞避免的研究说明百分之百的避免碰撞很难做到。因此,必须有其他安全保证策略。目前,研究人员对物理性人机交互的方方面面开展了大量研究,并提出了一些重要的解决方案。因此,本文将从交互伤害分析、交互伤害评估、交互安全策略等方面回顾物理性人机交互领域的研究工作,在此基础上指出物理性人机交互研究领域发展的新方向。

## 2 物理性人机交互伤害概要

迄今为止,在物理性人机交互(如图1所示)研究领域只对机器人孤立问题和安全机制进行了讨论与介绍。为了更好地提高物理性人机交互的安全性能,有必要对交互过程中可能对人体造成的潜在伤害威胁进行总结,并对其机理进行分类<sup>[3]</sup>,如图2所示。物理性人机交互过程中的接触基本可分为准静态和动态载荷两大类。而准静态又分为接近奇异和非奇异钳制情形。最后,还将区分钝接触造成的伤害和工具或尖锐表面造成的伤害。

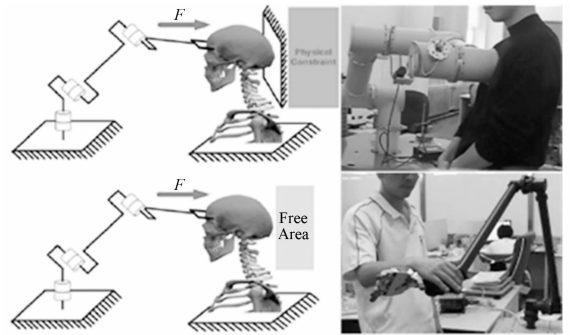


图1 物理性人机交互(头、胸、臂)

Fig. 1 Physical human-robot interaction (head, chest, arm)

每类伤害又分为可能受伤(Possible Injuries, PI)、最坏情况因素(Worst-case Factors, WCF)和最坏情况范围(Worst-case Range, WCR)。WCF是最坏情况下的主要体现,如最大的关节力矩以及奇异点距离或机器人速度。最坏情况范围表示最大可能的伤害,由最坏情况因素决定。此外,对每一类伤害机制的分类,还给出了伤害量度(Injury Measures, IM)的建议。这些具体的伤害量度对于发生在物理性人机交互中的潜在伤害的分类和计量是适当且有益的。

图2总结了物理性人机交互接触可能造成的伤害,例如①代表奇异构型附近的钳制钝接触,这种情形即使是低惯量的机器人也会很危险,因此可能在机器人(部分)工作空间内形成严重的威胁,可能的伤害是骨折和继发性损伤。例如,如果躯干钳制但头部自由会引起骨结构穿透或颈部受伤,这意味着机器人将头进一步推开,而身体躯干

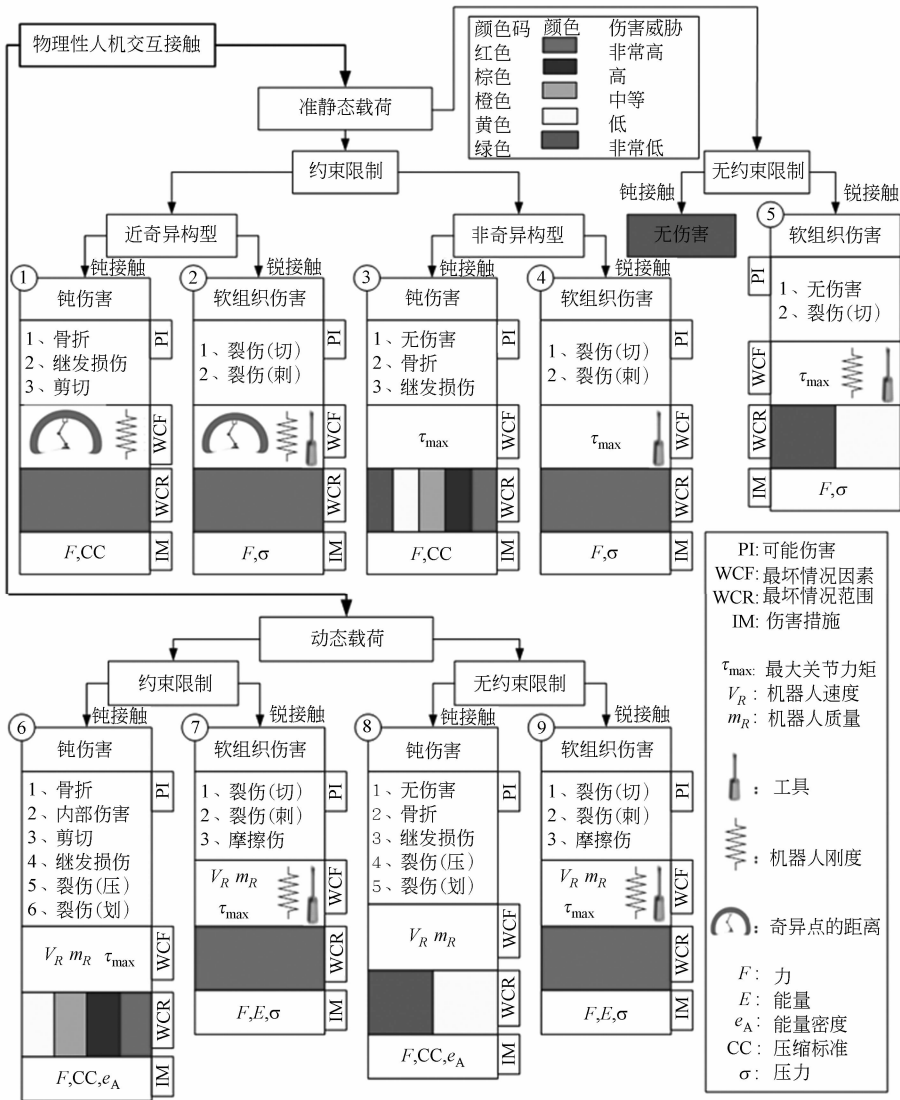


图 2 物理性人机交互接触可能的伤害<sup>[3]</sup>

Fig. 2 Possible injury of physical human-robot interaction

仍在原位。另一种可能的威胁是沿着局部钳制的人的边缘剪切。适用的指标有接触力和压缩标准。③代表非奇异构型下的钳制钝冲击, 潜在的伤害由最大关节力矩  $\tau_{max}$  定义, 伤害的范围可以从无伤害到严重伤害, 对大惯量机器人来说甚至是死亡。机器人刚度对最坏情况没有什么贡献, 由于机器人没有碰撞检测, 只能简单地增加电机力矩来跟踪期望轨迹。因此, 机器人刚度仅仅通过增加检测时间对检测机制有帮助。因而, 接触力和压缩标准能很好地预测发生的伤害。⑧代表经典的自由碰撞, 其伤害机理的研究在机器人研究领域展开最早, 其过程取决于碰撞速度和机器人质量, 并有饱和值。Haddadin<sup>[4]</sup>利用汽车工业

的冲击相关标准 HIC 来评价, 研究表明任意质量的机器人都不会对人产生严重的伤害。然而, 可能发生面部骨折, 但并不是所有的骨折都可列为严重伤害。碾压和划开造成的割伤在一定程度上值得评价, 尤其对服务机器人来说。为了评价割伤, 可以考虑采用能量密度标准。

受伤前评估的目的是分析接触情况下的最坏情况。接着是对每个特定的威胁采取合适的对策。①~⑤可以采取碰撞检测与反应策略, 如 De Luca 在文献[5]中所述。⑥的对策是包裹软材料、轻型化设计和快速有效的碰撞检测与反应策略。⑦是指一个人能想到的最危险的情形, 并提出特殊对待方法。安全的机器人速度非常重要,

这会给人足够的时间做出相应的反应。第二,有效的碰撞检测和安全反应策略也适合情形⑨。虽然文献中对钝接触造成的骨折、继发性损伤以及锐接触造成的软组织伤害进行了分析。但钝/锐接触可能造成的脏器、血管、神经等损伤没有涉及,应该进一步从生物力学的角度加以研究分析,当然也应对心理伤害的影响进行分析。

### 3 物理性人机交互安全评价指标-危险指数

通常采用危险指数来评价物理性人机交互中机器人的安全性。人体不同的部位有不同的伤害危险指数,应该考虑危险伤害的人体部位通常是头、颈、胸、手臂以及软组织等,而且不同的人体部位采用各自相应的伤害危险指数来评价物理性人机交互安全性能。下面将对各种伤害危险指数进行简单的介绍。

#### 3.1 头部伤害指数

##### 3.1.1 HIC 指数

头部伤害指数(Head Injury Criteria, HIC),使用最广泛,它来自汽车碰撞试验中评估人体头部受伤的危险程度,其定义为<sup>[6]</sup>:

$$HIC = T \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a(\tau) d\tau \right]^{5/2} \leq 1000, \quad (1)$$

式中: $a$ 为头部加速度,以重力加速度 $g$ 为单位; $t$ 为碰撞冲击时间,单位为s。HIC的值大于1000被视为严重伤害。认为碰撞冲击在36ms内已经完成时,只需计算36ms内的值。

可见汽车碰撞试验中的HIC只是对头部加速度积分进行计算;而在机器人物理性人机交互碰撞试验中,是用机械臂直接撞击假人的头部前额,加速度的大小还与头部的质量、机器人质量、碰撞速度以及碰撞方式(如自由碰撞、受限碰撞)等有直接关系;因此,Antonio Bicchi<sup>[7]</sup>等给出了与接触刚度、机器人质量、碰撞对象质量、碰撞速度等相关的HIC经验数学模型,如式(2),并建立了单自由刚性机械臂与操作者之间碰撞的简化模型如图3:

$$HIC = 2 \left( \frac{2}{\pi} \right)^{3/2} \left( \frac{K_{cov}}{m_{oper}} \right)^{3/4} \left( \frac{m_{rob}}{m_{rob} + m_{oper}} \right)^{7/4} v^{5/2}, \quad (2)$$

式中: $m_{rob}$ 为机器人总有效质量,单位为kg,反映机器人在碰撞时的转子惯量和连杆惯量; $m_{oper}$ 为碰撞对象质量,单位为kg; $K_{cov}$ 为机械臂表面柔性覆盖刚度,单位为N/m; $v$ 为碰撞时的速度,单位为m/s。

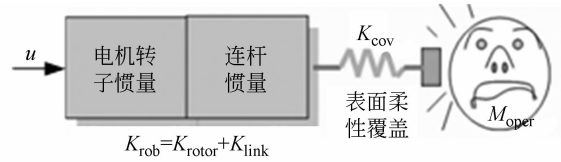


图3 单自由刚性机械臂与操作者之间碰撞简化模型  
Fig. 3 Simplified model of the collision between single-freedom rigid manipulator and operator

S. Haddadin<sup>[4]</sup>对自由碰撞下机器人质量和速度对HIC的影响进行了研究,发现随着机器人质量的增加,HIC趋于饱和,伤害程度主要取决于碰撞速度。他还发现HIC实验值远低于安全标准,这是因为物理性人机交互过程中,机器人能达到的最大碰撞速度为2m/s,远低于汽车碰撞测试速度10m/s。而在受限碰撞<sup>[8]</sup>下即使在1m/s碰撞速度也可能产生更严重的伤害。因此,HIC并不完全适合物理性人机交互中头部安全评估指数。

##### 3.1.2 GIS 指数

加德严重指数(Gadd Severity Index, GIS)也用来评价头部受伤的危险程度,其定义为<sup>[9]</sup>:

$$GIS = \int_0^t a(\tau)^{2.5} d\tau \leq 1000, \quad (3)$$

式中: $a$ 为头部加速度,以重力加速度 $g$ 为单位; $t$ 为整个碰撞持续时间,单位为s。GIS的值大于1000被视为严重伤害。GIS和HIC在本质是一样的,只是对人体头部加速度进行积分计算;S. Haddadin<sup>[4]</sup>对人体头部与轻型机械臂在非约束条件下碰撞的GIS指数进行了仿真研究,得出的结论是:在碰撞速度为1m/s时,与轻型机械臂发生钝碰撞,不会产生严重的伤害。而且对已经是适度柔性的轻型机械臂来说,即使进一步降低关节刚度,机器人与人体头部之间的冲击动力只是略微减小,因此,同样需要寻求更适合于物理性人机交互中头部安全评估指数。

除HIC和GIS指数外,用于物理性人机交互头部伤害评估指数还有最大功率指数(Maximum Power Index, MPI),有效位移指数(Effective

Displacement Index, EDI), 修正脑模型 (Revised Brain Model, RBM), 维也纳学院指数 (Vienna Institute Index, JTI), 最大平均应变指标 (Maximum Mean Strain Criterion, MSC) 等。

### 3.2 颈部伤害指数

一般来说, 人体颈部的损伤机制与作用于脊柱的力和弯曲力矩有关。欧洲新车安全评鉴协会 (EuroNCAP) 对颈部伤害相应的定义为与正向积累超标时间相关, 如表 1 所示<sup>[10]</sup>。而人体颈部相应的运动分类如图 4 所示。由此可见, 人类颈部的伤害标准也是从汽车安全标准中借鉴的。

表 1 人类颈部高低性能极限指标

Tab. 1 Higher and lower performance limit specifications for human neck

负载	@0 ms	@25~35 ms	@45 ms
剪切力 $F_x, F_y/\text{kN}$	1.9/3.1	1.2/1.5	1.1/1.1
张力 $F_z/\text{kN}$	2.7/3.3	2.73/2.9	1.1/1.1
弯矩 $M_y/\text{Nm}$	42/57	42/57	42/57

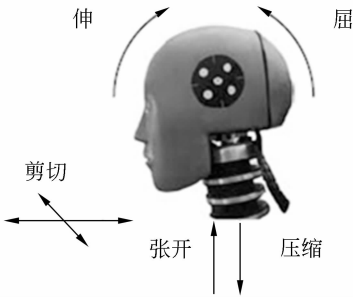


图 4 颈部运动分类

Fig. 4 Taxonomy of neck motions

### 3.3 胸部伤害指数

用于胸部安全评价的危险指数通常有加速度标准 (Acceleration Criterion, AC), 压缩标准 (Compression Criterion, CC), 和黏性标准 (Viscous Criterion, VC)。从评估的尸体实验推断出单独的加速度或力的标准本质上不能够预测胸部内伤的风险, 而胸部内伤对人类生存的威胁远甚于骨骼肌肉损伤。因此这里主要介绍压缩标准和黏性标准。

#### 3.3.1 压缩标准

Kroell 在分析大量的钝性胸部撞击实验数据的基础上, 得出胸部压缩标准如下<sup>[10]</sup>:

$$CC = \|\Delta X_c\|_2 \leq 22 \text{ mm}, \quad (4)$$

这是胸部损伤严重程度的优先指示, 式中:  $\Delta X_c$  是胸部变形。尤其是胸骨撞击引起胸部压缩, 直至肋骨发生骨折。

#### 3.3.2 黏性标准

胸部黏性标准 (VC) 也被称为软组织标准, 其定义如下<sup>[10]</sup>:

$$VC = c_c \|\Delta \dot{X}_c\|_2 \frac{\|\Delta X_c\|_2}{l_c} \leq 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad (5)$$

定义为压缩速度和标准化胸部变形的乘积。比例因子  $c_c$  和变形常数  $l_c$  (实际上是初始的躯干厚度) 取决于所用的假人。

除上述物理性人机交互危险指数外, Ikuta 和 Nokata<sup>[11]</sup> 提出了与冲击力大小相关的危险指数, 冲击力越大, 危险指数越高; 影响潜在冲击力的因素主要有机器人与人之间的距离、机器人相对人的运动速度, 以及机器人当前的惯量。Kallerieris<sup>[12]</sup> 提出了与冲击动能相关的头部正面骨折的危险指数; Heinemann 和 Zelinsky<sup>[13]</sup> 定义了安全冲击潜能作为物理性人机交互的危险指数; Laffranchi 和 Tsagarakis<sup>[14]</sup> 利用安全能量吸收水平来评价物理性人机交互的安全性能, 并对头部钳制状态与颈部非钳制状态进行了实验分析, 得出钳制状态下成人头骨安全吸收能量的边界值为 517 J, 6 个月的婴儿的头骨安全吸收能量的边界值为 120 J; 而非钳制状态下成人颈部安全吸收能量的边界值为 30 J, 可见颈部比头部更容易受到伤害。同时作者采用能量调节控制方法实现安全的物理性人机交互。Haddadin<sup>[15]</sup> 还对一些软组织损伤进行了分析, 如磨损、挫伤、裂伤和刀伤等, 并提出了一些软组织伤害危险指数, 如能量密度等。

以上危险伤害指数大多是从汽车碰撞试验中得来的人体安全保证的经验公式, 缺乏生物力学理论分析研究。因此, 为了获得适合人与机器人进行物理性人机交互时的安全评价标准—伤害指数, 必须从生物力学理论出发, 结合有限元分析和多体动力学仿真结果、物理性人机交互实验数据, 并以医学辅助检查确认实际伤害程度, 最终获得符合实际物理性人机交互的安全评价标准—伤害指数。此外, 还应该建立物理性人机交互时的心理安全评价标准—心理伤害指数。

## 4 物理性人机交互安全实现方法

共享机器人工作空间对人类(和机器人本身)没有任何伤害,一直是物理性人机交互领域的研究目标。通常通过机械设计、轨迹规划以及控制等手段来达到安全的物理性人机交互,而设计又可分为设计轻型机械臂、被动柔顺系统、柔顺关节以及被动机器人系统。下面详细介绍各种物理性人机交互安全实现方法。

### 4.1 通过设计实现物理性人机交互安全

#### 4.1.1 设计轻型机械臂

随着材料科学技术的发展,现在的一些机械臂采用铝合金、钛合金,甚至碳纤维制成。由于机器人关节和连杆采用现代轻型材料,在发生碰撞时,其相对于重型结构安全性能更好。然而,正是由于轻型化设计使他们无法在许多应用中取代经典串行机器人,如 WAM 机械臂<sup>[16]</sup>、DLR 的轻型机械臂<sup>[17]</sup>以及 HIT 轻型机械臂<sup>[18]</sup>等。

#### 4.1.2 设计被动柔顺系统

软弹性材料包裹机器人<sup>[19]</sup>、柔顺主干与被动移动基座<sup>[20]</sup>、线缆驱动机器人如 Dexter<sup>[21]</sup>和 SpiderBot-II<sup>[22]</sup>等,都是这一类型的典型代表。通过在机器人本体外面包裹软材料来减小人机交互碰撞冲击力是有效对策,软材料可以增加碰撞接触面的弹性,降低接触刚度,因此也是提高物理性人机交互安全性的一个重要措施。但随着具有能量吸收功能、缓冲功能的触觉传感器的出现,单纯的包裹软材料除了具有价格优势以外,其它方面均不如具有缓冲功能的触觉传感器。一方面触觉传感器可以降低冲击力,另一方面触觉传感器采集的信息可以用于交互控制。N. Elkmann<sup>[23]</sup>等就提出了压力敏感“皮肤”用于物理性人机交互。此外,虽然包裹软弹性材料能有效地减小碰撞冲击力,但并不能完全保障人的安全,因此还需要与其他安全策略配合使用。Dexter 是为人类用户设计的拟人 8 自由度线缆驱动机器人,SpiderBot-II 是非完整约束的线驱动并联机构,均用于在家庭环境中协助老人和残疾人行走和操纵。SpiderBot-II 的概念和应用场景在文献<sup>[24]</sup>中有描述。SpiderBot-II 由 4 根线通过固定在房间 4 个角落的滑轮悬浮在适当高度的末端操作器构成。这种结构本质上安全、经济、方便家庭环境安装而

不需要任何显著的结构改造。其安全分析见文献<sup>[22]</sup>。由于是非完整约束系统,其末端操作器存在振荡,这种振荡要么通过增加末端操作器的重量,要么采用防摆动控制器来抑制<sup>[25]</sup>。

线缆驱动机器人通常被认为是安全的,因为他们不会由于高阻抗设计而产生大的冲击载荷。然而,由于线缆驱动机器人的响应频率低,高性能控制这类系统很困难,甚至是不可能的<sup>[26]</sup>。因此,其性能受到极大限制。

#### 4.1.3 设计柔顺关节

为了实现物理性人机交互安全以及高性能运动控制,设计了各种新型的柔顺关节。其中包括可编程被动阻抗关节<sup>[27]</sup>、机械阻抗调节器<sup>[28]</sup>、关节力矩控制驱动<sup>[29]</sup>、串联弹性驱动(Series Elastic Actuators, SEA)<sup>[30]</sup>、分布式宏-微驱动(DM2 Distributed Macro-Mini Actuation)<sup>[31]</sup>、变刚度驱动(Variable Stiffness Actuation, VSA)<sup>[32]</sup>、变刚度传动(Variable Stiffness Transmission, VST)<sup>[33]</sup>、耦合弹性驱动(Coupled Elastic Actuation, CEA)<sup>[34]</sup>、主动可变刚度弹性驱动(Active Variable Stiffness Elastic Actuator, AVSEA)<sup>[35]</sup>、串联离合驱动(Series Clutch Actuator, SCA)<sup>[36]</sup>、变阻抗驱动(Variable Impedance Actuation, VIA)<sup>[37]</sup>等。

相对于刚性机器人的刚性关节而言,柔顺关节增加了关节的柔性。柔顺关节早期主要应用于力/位混合控制、阻抗控制等应用研究,随着研究的深入,关节的柔性表现出两面性,一方面降低了整个系统的带宽;另一方面由于关节柔性的存在能有效降低物理性人机交互碰撞的冲击力,从而提高了机器人物理性人机交互安全。

从危险评价指数模型(2)可知,提高机器人物理性人机交互安全性能,可以通过在机器人表面覆盖软弹性材料、降低机器人有效碰撞质量(惯量)和降低机器人碰撞速度等方法来实现。在机器人表面覆盖软弹性材料降低碰撞表面刚度,这在被动柔顺系统中已讨论过;降低机器人碰撞速度被归入到通过控制和轨迹规划实现人机交互安全方法;降低机器人的有效碰撞质量(惯量)有 2 种方法,最直接的方法是采用轻型化设计的思想,这一方法归入轻型机械臂设计;另一种方法是采用柔顺关节设计,降低关节的传动刚度,提高关节的柔性,从而降低机器人碰撞时的有效质量(惯

量)。Antonio Bicchi<sup>[7]</sup>等对驱动器与连杆之间的弹性传动降低物理性人机交互伤害进行了详细的分析,并对柔性关节机器人碰撞模型进行了简化,如图 5 所示。与图 3 的刚性关节机器人碰撞简化模型相比,中间增加了具有一定刚度  $K_{\text{transm}}$  和阻尼  $B_{\text{transm}}$  的传动系统。机器人的有效质量  $m_{\text{rob}}$  等于电机转子质量  $m_{\text{rotor}}$  和连杆质量  $m_{\text{link}}$  之和,即  $m_{\text{rob}} = m_{\text{rotor}} + m_{\text{link}}$ ,电机转子通过传动系统与连杆耦合。当机器人与人发生物理性人机交互碰撞时,由于传动系统的弹性(刚度  $K_{\text{transm}}$ )作用,降低了电机转子耦合到连杆端的惯量,即机器人碰撞的有效质量(惯量),从而降低了碰撞时的伤害程度。

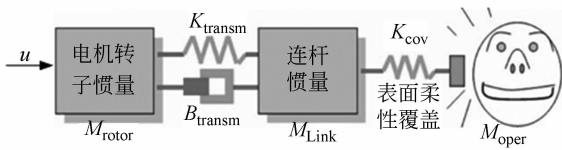


图 5 柔性关节机器人碰撞简化模型

Fig. 5 Simplified model of flexible joint robot collision

通常电机转子折算到连杆端的等效惯量(与减速比的平方成正比)往往比连杆本身的惯量大得多,关节传动系统柔性(弹性)的存在,大大降低了电机转子耦合到连杆端的惯量,从而降低了物理性人机交互碰撞时的伤害。具有柔性关节机器人的等效质量与传动系统刚度之间的关系表示如下:

$$m_{\text{rob}} = m_{\text{link}} + \frac{K_{\text{transm}}}{K_{\text{transm}} + \gamma} m_{\text{rotor}}, \quad (6)$$

式中:  $\gamma$  为常量,当  $K_{\text{transm}} \rightarrow \infty$  时,  $m_{\text{rob}} \approx m_{\text{rotor}} + m_{\text{link}}$ ,和刚性机器人一样,没有缓冲作用。当  $K_{\text{transm}} \rightarrow 0$  时,  $m_{\text{rob}} \approx m_{\text{link}}$ ,即当传动系统刚度足够小,电机转子耦合到连杆端的等效惯量可以忽略,碰撞时只有连杆的质量起作用。

由此可见,通过降低关节传动系统刚度的柔顺关节成为提高机器人物理性人机交互安全的重要策略。但过低的关节传动刚度将降低系统的固有频率,从而降低系统的带宽。因此,既要保证机器人系统的性能,又要使机器人具有良好的人机交互安全性能,是机器人物理性人机交互领域的开放性问题。

为了实现可编程被动阻抗,由蜗轮构成不可逆驱动,通过具有可编程刚度和阻尼系数的传动

系统驱动机器人连杆。机械阻抗调节器由机械柔顺调节器构成,而机械柔顺调节器则由弹簧装置、刹车伪阻尼器和关节驱动单元组成。关节力矩控制允许接近零的低频阻抗,从而具有良好的力控制特性。然而,对于由接触表面阻抗控制带宽以上频率决定的冲击载荷降低并不是十分有效。串联弹性驱动(SEA)<sup>[30]</sup>采用被动机械弹簧与齿轮串联,对冲击载荷来说相当于低通滤波器的功能,因此降低了高端齿轮的冲击力。然而,这种安排不适合像高频扰动抑制等高带宽任务。

除此之外,M. Zinn<sup>[31]</sup>提出了分布式宏-微驱动(DM2, Distributed Macro-mini Actuation)关节设计,如图 6(a)所示,即一个关节采用大小 2 个电机并联驱动,大电机转子转动惯量大,用于启/制动等低速大扭矩输出,通过弹性传动与连杆相接;小电机转子转动惯量小,用于高速小扭矩输出,与连杆刚性连接,从而保证物理性人机交互过程中,低速和高速碰撞有效惯量都在可控范围之内,提高了人机交互的安全性。但运行过程中机构需要在高低速之间切换。G. Palli<sup>[32]</sup>等采用同样的思想设计了变刚度驱动(Variable Stiffness Actuation, VSA)机器人实现交互力控制,如图 6(b)所示,即机器人每个关节连接 2 个电机,一个调节位置,另一个调节刚度。并利用奇异摄动的方法对机械臂进行控制,虽然奇异摄动能降低系统动力学的阶数,但该方法也是有局限性的,只有当关节刚度足够大时才能应用,因为此时关节中的柔性动力学比刚体动力学快得多。Jiun-Yih Kuan<sup>[34]</sup>等提出了耦合弹性驱动(CEA, Coupled Elastic Actuation)的设计思想,即在电机与连杆之间并列安装 2 个弹性组件,一个软刚度(刚度低),一个硬刚度(刚度高),软刚度弹性组件相对较长。机器人低速时,软硬刚度组件共同作用;高速时,只有软刚度组件起作用,从而实现高低速人机交互伤害都保持在较小程度。但软硬刚度弹性组件长度差调节困难。Ren-Jeng Wang<sup>[35]</sup>等在 CEA 的基础上进一步设计了主动可变刚度弹性驱动(Active Variable Stiffness Elastic Actuator, AVSEA)关节,如图 6(c)所示,通过改变钢板弹簧的有效长度来实现关节刚度的改变。并采用 HIC 指数对实验结果进行了评价,其安全性优于串联弹性驱动(Series Elastic Actuators, SEA),但由于受机构的约束,钢板弹簧的长度有限,因此

刚度可调性限定在一定范围。N. Lauzier 等在 2 自由度<sup>[38]</sup>和 3 自由度笛卡尔力限制装置<sup>[39]</sup>的基础上,设计了一种电子可调力矩限制器<sup>[36]</sup>应用于机器人关节中,构成串联离合驱动关节(Series Clutch Actuator, SCA)。根据机器人构型合理的调整力矩限制器,可以将机器人工具中心点的最大静力矩预设安全水平以下,物理性人机交互过程中一旦超过限制力矩,SCA 滑动紧急停止触发,来自 SCA 上游的惯量被阻断,达到安全的人机交互。SCA 代替 SEA,虽然保证了系统的控制带宽、消除了振动以及额外的静态误差;但由于连杆的重量引起的横向转矩,需要根据机器人构型对力矩限制器进行标定。A. A. Schaffer<sup>[37]</sup>等设计了变刚度驱动器和准对抗性关节,如图6(d)、

(e)所示,并提出了变阻抗驱动(Variable Impedance Actuation, VIA)的概念,认为变阻抗驱动在保证人机交互安全性能方面是有前景的解决方案。Dongjun Hyun<sup>[40]</sup>等设计了一种安装在机器人关节上的纯机械传动装置,当机器人正常工作时,该机构保持较大的刚度状态,一旦发生物理性人机交互,该机构立即切换到低刚度保护模式下,降低碰撞伤害程度,该机构的问题同样是需要高、低刚度模式下进行切换。

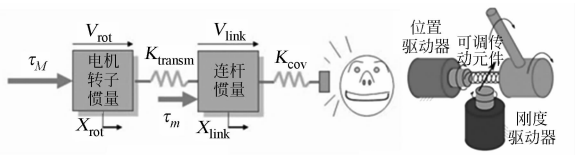
其他基于变柔顺驱动方法的解决方案包括摩擦气体驱动、基于磁流变的液体驱动和智能柔性关节等。然而,从控制的观点来看,变刚度驱动、串联弹性驱动、分布式宏-微驱动、变阻抗驱动方案相比其他方案更容易实现。

4. 1. 4 设计被动机器人系统

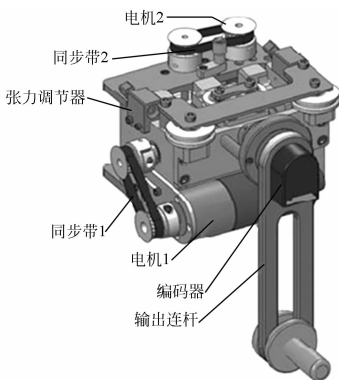
对于安全物理性人机交互系统的一个非常重要的方法是开发被动机器人系统<sup>[41]</sup>。这种典型系统的例子包括 RT Walker<sup>[42]</sup>和 Cobot<sup>[43]</sup>。RT Walker 采用伺服刹车代替伺服电机,并且操纵后轮的相对刹车力避开障碍和其他危险情况。Cobot 本质上就是一种被动机器人,其目的是直接与人类操作者协同作业,主要贡献是将在软件中定义的虚拟环境带入真正有效载荷运动。采用无极变速实现虚拟表面,无极变速由 2 个驱动轮、2 个从动轮和 2 个变向轮组成。2 个驱动轮的速度通过变向轮角度  $\Phi$  耦合,无极变速的连接既可以采用串联形式也可以采用并联形式。值得注意的是,无论是在串联还是并联结构中,由无极变速传动施加的机械约束的数量降低 1 个自由度。无极变速的另一种分类是基于耦合速度的性质,平移无极变速约束 1 对线速度,而旋转无极变速约束的则是角速度。尽管 Cobot 属于被动机器人一类,它除了变向外并没有其他的驱动,有一种名为 Power Cobot 采用单一的电力驱动器驱动,其力量比人类用户小得多。这种力量的限制使得他们对于人类来说是安全的。被动机器人系统和被动柔顺系统一样,其缺点是系统性能受到极大限制。

4. 2 通过轨迹规划和控制实现物理性人机交互安全

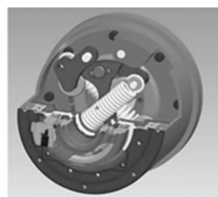
已知被动环境下的机器人交互控制在过去的几年中已经被解决,并且出现了 2 种主要的阻抗控制策略:静态补偿和动态补偿。前者包括的控制有刚度控制、力控制和并行力/位控制,后者包



(a)DM2 工作原理 (b)可变刚度驱动关节  
(a) Principle of DM2 (b) Variable stiffness actuation joint



(c)主动可变刚度弹性驱动关节  
(c) Active variable stiffness elastic actuator joint



(d)可变刚度驱动 (e)准对抗性关节  
(d) Variable stiffness actuation (e) Quasi antagonistic joint

图 6 各种柔顺关节

Fig. 6 Various kinds of compliance joints

含经典的阻抗控制、带位置内环的阻抗控制、带速度内环的力控制、带位置内环的力控制和混合力/位控制等。

冲击力被认为是与人类交互中受伤害的主要原因,因此,需要用降低冲击力的方法来增强物理性人机交互的安全保证。利用防护罩类似包裹软弹性材料是一种可能,但单独采用防护罩来吸收冲击力未必有效<sup>[26]</sup>。同样的,通过设计技术来实现物理性人机交互的安全也受到柔顺性的限制;因此,通过轨迹规划和控制实现物理性人机交互安全十分重要。

#### 4.2.1 通过轨迹规划实现物理性人机交互安全

通过轨迹规划实现物理性人机交互安全的主要方法有导航和碰撞避免。许多研究者对通过轨迹规划实现碰撞避免进行了研究<sup>[44]</sup>。A. D. Santis<sup>[45]</sup>等为了实现冗余多机械臂在非结构化环境和人类环境下的安全交互,采用慎思和反应控制方案,在反应控制中为了避免自碰撞的发生,采用“骨架算法”对机器人进行建模,实时计算交互点的排斥力用作碰撞避免力矩。虽然骨架建模方法很简单,但过于简单的建模将导致系统性能保守;另一方面,精确的建模可以改善性能,却很耗时;因此碰撞避免建模将是物理性人机交互的又一研究课题。Kulic 和 Croft<sup>[46]</sup>提出了危险指数,当危险指数超过预定义的阈值,就把危险指数作为实时轨迹规划的输入值。危险指数产生与 Khatib<sup>[47]</sup>提出的虚假潜在力相似的排斥力,在危险的情况下移动机器人到安全的地方。人类被认为是一个障碍,需尽最大的努力来避免碰撞,如果无法避免则让机器人停止运动。此外,D. Kulic<sup>[48]</sup>等还基于视觉及生理传感器来监测人类用户的信息,然后通过轨迹规划和控制策略实现人机交互的安全。根据碰撞发生前所剩时间分为短期、中期、长期规划策略,短期采用反应策略即机器人远离潜在的碰撞;中期采用局部再规划和轨迹修正策略改变机器人的运动并试图避免危险;长期采用轨迹规划策略避免任何碰撞,但无法保证百分之百的碰撞避免。Heinzmann 和 Zelinsky<sup>[13]</sup>提出了冲击潜能控制方案,该方案是检测由轨迹发生器的安全包络产生的额定力矩。如前所述,冲击潜能就是最大的冲击力。冲击潜能控制方案是检测由轨迹发生器的安全包络产生的额定力矩,如果额定力矩安全包络之外就对其进行消减。

#### 4.2.2 通过控制实现物理性人机交互安全

通过控制实现物理性人机交互安全的思想是控制刚度/柔顺性来减小碰撞中的冲击力。在前面所述危险指数的限制下,一些学者对物理性人机交互的碰撞行为和安全反应策略进行了研究。A. D. Luca<sup>[5,49]</sup>等在 DLR 第三代轻型机械臂上,利用安装在关节处的力矩传感器来检测笛卡尔接触力,一旦碰撞发生,机械臂作出相应的安全反应。提出的反应策略保证了一定的安全性,但只考虑了匀速时的碰撞行为,没有考虑加速时的情况,也没有考虑碰撞结束后任务的完成情况。S. Parusel<sup>[50]</sup>等提出了模块化的基于状态行为控制 LWR-III 实现安全的人机交互,将机器人的行为定义为操作行为和反射行为,同时又将工作在附近的机器人分为 4 个主要的功能模式即自动任务执行模式、人友好模式、协作模式、故障和反射反应模式。虽然整个控制系统具有很好的模块化设计,但对系统的实时性要求很高,特别是反射行为。Dzmitry<sup>[51-53]</sup>等基于关节光学力矩传感器,采用变阻抗的控制方法,使机械臂具有类似人的反射动作,实现机械臂物理性人机交互的安全反应。虽然实现了人机交互的柔顺控制策略,但缺乏安全性评价指标。M. Laffranchi<sup>[14]</sup>等基于能量的控制策略,通过限制第一次碰撞瞬间储存到系统能量的最大强加值,实现物理性人机交互的安全,文中分析了头部夹紧碰撞和头部自由碰撞两种情形,并利用安全吸收能量水平评价了颅骨和颈椎的失效。虽然通过实验验证该方法的有效性,但还需证明控制方法的稳定性。S. Calinon<sup>[54]</sup>等基于学习的控制策略实现了 WAM 轻型机械臂安全的人机交互,并定义了由用户凝视方向与机器人最近点之间的角度、人头部与机器人距离组成的危险评价指数。试验中人与机械臂协同作业完成了对餐布的熨烫,虽然该方法没有要求必须完全避免碰撞,但应该采用一些优先的优化策略。Y. Li<sup>[55]</sup>等利用阻抗控制实现机器人与人的多点交互,但仅限于 2 自由机械臂仿真。Genliang Xiong<sup>[56]</sup>等基于关节力矩传感器,利用阻抗控制策略与具有力反馈的轨迹规划,通过设定碰撞接触力的阈值,实现了人机交互的柔顺性,并有效地降低了碰撞瞬间的冲击力。近几年来,在利用关节力矩传感器检测人机交互接触力的基础上,类似人造皮肤的触觉传感器用于物理性人机交互成

为新的热点。有学者将触觉人机交互单独分类,也有学者认为触觉属于认知性人机交互,然而,认知性人机交互和物理性人机交互并不是独立的。N. Elkmann<sup>[23]</sup>等就提出了压力敏感“皮肤”用于物理性人机交互,该触觉传感器具有一个附加层,不但能测量交互力,而且能缓冲碰撞,提高物理性人机交互的安全性。触觉传感器的优点是可以遍布机器人全身实现多点人机交互;缺点是适应曲面机器人本体困难,使用寿命短,传感器布线多等。因此,单一的控制方法也无法解决物理性人机交互的安全问题,应与其他的安全策略结合,提高人机交互的安全性能。

## 5 物理性人机交互面临的问题与挑战

以人为中心的机器人应用最具革命性和挑战性的特征是安全、可靠的物理性人机交互功能。为了保证机器人系统的这种安全性和可靠性,本文总结了物理性人机交互面临的问题和挑战。

首先,评价物理性人机交互安全的危险指数是否适用于实际情况以及计算结果是否能反应实际的伤害程度。一般来说,伤害类别除了钝冲击造成的头部、颈部、胸部等的骨折外,还包括与胸腹部发生碰撞造成内脏器官、血管的破裂,这种伤害远比骨折严重得多;此外还有锐冲击下造成的软组织、器官的损伤以及是对人造成的心理伤害等,这些都有待进一步从生物力学、动力学仿真和医学的角度来完善。

其次,由于机器人与人发生碰撞,是对人体伤害的主要威胁,因此,避免碰撞是以人为中心的机器人的基本要求。然而,由于人行为的不确定性和可能发生的意外情况,碰撞检测传感器检测范围较小和存在盲区以及易受被测对象形状、姿态、以及表面材料性质等影响等问题,还有信息量不足,智能化程度不高,实时性要求严格等,这些使百分之百的碰撞避免仍然是个挑战,目前,碰撞避免技术主要处理预碰撞安全,而不是降低引起伤害的主要因素—冲击力,因此,碰撞后的反应行为对减小碰撞冲击力更加重要。然而,为了实现碰撞后的反应行为,碰撞的早期检测以及碰撞后的控制策略更为重要。此外,对于无法避免的碰撞,必须有一定的操作恢复方案以完成由于碰撞而中止任务进行。Kosuge 和 Morinaga<sup>[57]</sup>提出了由动

态碰撞检测和操作恢复方案组成的这类系统。即发生碰撞时机器人碰撞检测系统停止其运动;当碰撞的原因被排除,则操作恢复方案重启机器人运动。

再次,为了应对无法避免的碰撞,许多研究者对物理性人机交互安全反应策略进行了研究。其中最主要的是以柔顺关节设计为基础,与力控制、力/位混合控制、阻抗控制等控制策略相结合来提高机器人人机交互碰撞后的安全性。虽然柔顺关节设计可以降低电机转子耦合到连杆端的惯量,但连杆及负载本身的惯量却无法通过柔顺关节设计来解决。而且,大多数的安全反应策略都基于机器人受完整约束条件的限制。不过,实际应用中,服务机器人一般安装在移动平台/机器人上,处于非完整约束状态,因此,非完整约束条件下的人机交互安全策略研究更具实际意义。另外,已有的物理性人机交互考虑的多是单点接触,对多点人机交互进行研究的很少。

此外,人机交互中机器人自治水平是另一个至关重要的问题。Yu<sup>[58]</sup>等调查发现老年人不喜欢完全自主机器人系统,因此,基于用户的身体状况提出了一种自适应共享控制方案。由于用户可能存在身体障碍,而完全手动控制又不允许,因此采用共享控制策略。如何共享用户和计算机之间的控制以确保安全,以及用户的权限是服务机器人的一个重要研究课题。由于具有完全自主的机器人系统不能正确地归咎事故责任,Laschi<sup>[59]</sup>等提出了以人为中心的机器人的可调自治,其基本思想是建立离散的自治水平级别,使用户能够访问不同层次的参与机器人。

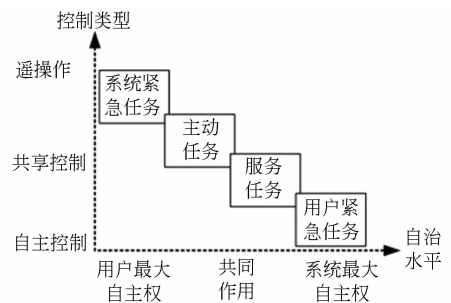


图7 机器人自治水平

Fig. 7 Level of robot autonomy

图7显示了不同层次的自治,从用户的完全

自主到系统的完全自治。目前,对涉及物理性人机交互的机器人自治水平仍然是以人为中心的机器人系统的研究课题。

总之,机器人物理性人机交互问题远没有从根本上解决,尚无法保证百分之百地实现碰撞避免,而且需要大量的人机交互信息,一旦发生碰撞,必须考虑碰撞后机器人的行为。柔顺关节设计由于降低了电机转子惯量耦合到连杆端,使人机交互安全性得到很大提高;但如何既保证机器人系统的性能,又能使机器人具有良好的人机交互安全性能是机器人物理性人机交互领域的开放性课题。此外,连杆本身具有惯量和能量(柔顺关节设计无法控制),即使是轻型机械臂,当人机交互碰撞速度很高或人处于夹紧等情况下,仍然会对人造成很大威胁。因此柔顺关节设计无法彻底解决物理性人机交互的安全性问题,而非完整约束条件下的多点人机交互研究几乎处于空白。机器人本体包裹软材料只能起到辅助作用,无法从根本上保障安全。

因此,机器人物理性人机交互安全问题不能仅停留在某种控制算法或某种柔性驱动设计上,而应该贯穿于机器人设计的所有环节。同时鉴于物理性人机交互安全的重要性,还需要在物理性人机交互的交互伤害分析、安全性评估、碰撞行为和安全反应策略等方面做大量基础性研究工作,完善其安全性设计理论和控制方法。

## 6 物理性人机交互未来发展的方向

上面对于物理性人机交互的面临的问题和挑战进行了描述,本节指出该课题未来的研究方向,包括从其安全性和可靠性两个方面。物理性人机交互的安全性包括合适的机械硬件、驱动器、软件、传感器和控制等失效管理。任何一个控制系统,尽管可能是鲁棒的,但不能保证无故障。因此,以人为中心的服务机器人多层次安全方案应该由控制系统和保护系统组成。控制系统由潜在危险函数计算、舒适程度以及安全人机交互控制运动算法组成。控制系统中的安全人机交互控制运动算法是指采用多种安全控制策略相结合来提高人机交互的安全性。此外,由前所述可知,机器人人机交互分为物理性人机交互和认知性人机交互,但两者并不是独立的,在交互任务中,物理性交互能

帮助认知评估环境设定规则,而认知可以通过设定合适的交互控制参数来改善物理性交互。如触觉可以用来理解环境的特性(软和硬),而基于认知的推理规则可以用于物理性人机交互时的柔顺控制。因此,将两者相结合来提高物理性人机交互安全性能是很有前景的研究方向。而保护系统用来观测与机械硬件、驱动器、软件、传感器和控制器等相关的关键变量。当发生控制系统无法处理的异常行为时,保护系统必须采取控制,将系统移动到安全配置并安全关闭系统。然而,安全配置可能由于应用场合的不同而存在区别,需要进行详细分析后决定。设计这样的保护系统和选择关键的变量/参数是未来研究的一个方向。

可靠性的范围广泛,可能包含许多方面的内容,如伺服系统的性能标准(如,响应时间、稳定时间、过冲量和稳定性)、可靠性和可用性等。定义安全性、可靠性和可用性的概念很重要,要用更健全和定量的术语来评价机器人系统。操作系统和软件的可靠性是保证物理性人机交互系统安全性和可靠性的关键。

危险是一个与碰撞避免相关的有意义的概念,在机器人工作空间监测人类、估计危险等方面非常重要。为了实现这一目的,人们提出了许多种技术,如视觉系统等。而关键传感器的安全可靠必须通过多样性和冗余来增强,需要有更强、更专业的传感器用于危险检测。

人进入机器人系统工作空间时,环境是主动的也是部分未知的,对部分已知的主动环境,能获得的交互策略是原先基于已知被动环境开发的,因而需要做相应的修改。这种情况下需要检测人类的意图,并对标称轨迹做相应的修改。另一种可能就是在环境中安装传感器,使得机器人周围的空间变得智能。Nakauchi<sup>[60]</sup>等开发了一个用于检测人的意图和监测人活动的生动空间。通过在门/抽屉上的多种传感器、椅子上的微动开关、人身上的ID标签等检测人类的行为,传感器服务器用射频标签系统和局域网收集这些信息,同时采用学习系统了解人的意图(如学习、吃、休息等)。然而,大多的传感器需要很大的计算量和很长的处理时间,这与人机交互实时性相冲突。此外,丰富的传感器对机器人物理性人机交互安全性和可靠性是有益的,但并不是越多越好。所以,传感器的最优化是一个需要解决的问题。

除了安全性和可靠性,还需要引入其他的一些功能。这些功能包括机动性与操纵性的集成、多机器人间的协作技能、与人交互的能力、实时修改无碰撞轨迹的高效技术和高效的抓取技术等。为人类使用而开发的机器人,除了技术的要求,另一些重要的特征就是成本低、安装简单、易用。

## 7 结 论

当人类存在机器人工作空间时,就给机器人研究领域提出了一大挑战——安全的物理性人机

交互。服务机器人的未来取决于其安全、性能、价格、安装难易和易用性。如果机器人的这些基本要求能够保证,服务机器人的需求必将增加;否则,就只能出现在实验室内。因此,机器人物理性人机交互安全问题必须贯穿机器人设计的所有环节,包括采用合适的安全评价标准评价物理性人机交互的安全性,多种方法相结合实现非完整约束条件下的多点人机交互安全,和以安全的物理性人机交互为目标,推动机器人安全性设计理念和控制方法的发展与完善等。随着机器人技术的发展,安全的物理性人机交互研究日趋重要。

### 参考文献:

- [1] GOODRICH M A, SCHULTZ A C. Human-robot interaction: A survey [J]. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, 2007, 1(3):203-275.
- [2] SANTIS A D. *Modelling and Control for Human-Robot Interaction* [D]. Napoli: Doctor Thesis of Università Degli Studi di Napoli Federico II, 2007.
- [3] HADDADIN S, SCHAFFER A A, HIRZINGER G. Requirements for safe robots: Measurements, analysis and new insights [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2009, 28(11-12): 1507-1527.
- [4] HADDADIN S, SCHAFFER A A, HIRZINGER G. The role of the robot mass and velocity in physical human-robot interaction- part I: Non-constrained blunt impacts [C]. *International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA*; 2008:1331-1338.
- [5] LUCA A D, SCHAFFER A A, HADDADIN S, et al.. Collision detection and safe reaction with DLR-III lightweight manipulator arm [C]. *International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China*;2006:1623-1630.
- [6] GAO D, WAMPLER C W. Head injury criterion [J]. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 2009, 16(4):71-74.
- [7] BICCHI A, TONIETTI G. Fast and“soft-arm”tactics [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2004, 11(2):22-33.
- [8] HADDADIN S, SCHAFFER A A, HIRZINGER G. The role of the robot mass and velocity in physical human-robot interaction- part II: constrained blunt impacts [C]. *International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA*; 2008:1339-134.
- [9] HADDADIN S. *Evaluation Criteria and Control Structure for Safe Human-robot Interaction* [D]. Munich: Technical University of Munich&DLR, 2005.
- [10] HADDADIN S, SCHAFFER A A, HIRZINGER G. Safety evaluation of physical human-robot interaction via crash-testing [C]. *In Robotics: Science and Systems Conference 2007 (RSS2007), Atlanta, USA*;2007:1-8.
- [11] IKUTA K, ISHII H, NOKATA M. Safety evaluation method of design and control for human-care robots [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2003, 22(5):281-297.
- [12] KALLIERIS D. *Personal Communication* [M]. Washington: SAE Press, 2007.
- [13] HEINZMANN J, ZELINSKY A. Quantitative safety guarantees for physical human-robot interaction [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2003, 22(7-8): 479-504.
- [14] LAFFRANCHI M, TSAGARAKIS N G, CALDWELL D G. Safe human robot interaction via energy regulation control [C]. *International Conference on Intelligent Robotics and Systems, St. Louis, USA*;2009:35-41.
- [15] HADDADIN S, SCHAFFER A A, HIRZINGER G. Safe physical human-robot interaction: measurements, analysis and new insights [J]. *Robotics Research*, 2010, 66:395-407.
- [16] SALISBURY K, TOWNSEND W, EBERMAN B, et al.. Preliminary design of a whole-arm manipulation system (WAMS)[C]. *Proceedings of*

- 1988 *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Philadelphia, PA USA*; 1988; 254-260.
- [17] HIRZINGER G, SPORER N, SCHAFFER A A, *et al.*. DLR's torque-controlled lightweight robot III-are we reaching the technological limits now? [C]. *Proceedings of 2002 IEEE International Conference Robotics and Automation, Washington DC, USA*; 2002; 1710-1716.
- [18] XIONG G L, XIE Z W, *et al.*. Dynamic surface control-backstepping based impedance control for 5-DOF flexible joint robots [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2010, 4 (17):807-815.
- [19] YAMADA Y, HIRASAWA Y, HUANG S, *et al.*. Human-robot contact in the safeguarding space [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1997, 2 (4):230-236.
- [20] LIM H O, TANIE K. Collision-tolerant control of human-friendly robot with viscoelastic trunk [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1999, 4(4):417-427.
- [21] ZOLLO L, SICILIANO B, LASCHI C, *et al.*. Guglielmelli, an impedance-compliance control for a cable-actuated robot [C]. *Proceedings of 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, Lausanne, Switzerland*; 2002:2268-2273.
- [22] PERVEA A, LIM Y, PARK J. SpiderBot- II; Design, control and posture balancing experimentation [C]. *Proceedings of 1st Korean Intelligent Robot Summer Conference. Jeju Island, Korea*; 2006; 288-295.
- [23] ELKMANN N, FRITZSCHE M, SCHULENBURG E. Tactile sensing for safe physical human-robot interaction [C]. *The 4th International Conference on Advance in Computer-Human Interactions, Gosier, Guadeloupe, France*; 2011; 212-217.
- [24] RYU J, KIM B, FARAHANI H S, *et al.*. A new silver robot platform for the elderly and the handicapped; SpiderBot-assistance scenario and concept design [J]. *International Journal of Human-Friendly Welfare Robotic Systems*, 2004, 5(3): 9-16.
- [25] YANAI N, YAMAMOTO M, MOHRI A. Anti-sway control for wire-suspended mechanism based on dynamics compensation [C]. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC, USA*; 2002; 4287-4292.
- [26] ZINN M, KHATIB O, ROTH B, *et al.*. Playing it safe [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2004, 11(2):12-21.
- [27] LAURIN K F, COLGATE J E, CARNES S D R. Design of components for programmable passive impedance [C]. *Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California California, USA*; 1991; 1476-1481.
- [28] MORITA T, SUGANO S. Design and development of a new robot joint using a mechanical impedance adjuster [C]. *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, Japan; ICRA*, 1995; 2469-2475.
- [29] VISCHER D, KHATIB O. Design and development of high-performance torque-controlled joints [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1995, 11(4):537-544.
- [30] PRATT A, WILLIAMSON M M. Series elastic actuators [C]. *Proceedings of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots,' Pittsburgh, PA, USA*; 1995; 399-406.
- [31] ZINN M, KHATIB O, ROTH B, *et al.*. A new actuation approach for human friendly robot design [C]. *International Conference on Robotics and Automation, LA, USA*; 2004; 249-254.
- [32] PALLI G, MELCHIORRI C. Interaction force control of robots with variable stiffness actuation [C]. *The 18th IFAC world congress, Milano, Italy*; 2011; 13504-13509.
- [33] TONIETTI G, SCHIAVI R, BOCCHI A. Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction [C]. *Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain*; 2005; 526-531.
- [34] JIUN Y K, HAN P H, YEN T C. Coupled elastic actuation development for robots as an intrinsic compromise between performance and safety [C]. *International Conference on Advance Intelligent Mechatronics, Singapore*; 2009; 14-17.
- [35] REN J W, HAN P H. Active variable stiffness e-

- lastic actuator; design and application for safe physical human-robot interaction [C]. *International Conference on Robotics and Biomimetics, Tianjin, China*; 2010; 1417-1422.
- [36] LAUZIER N, GOSSELIN C. Series clutch actuator for safe physical human-robot interaction [C]. *International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China*; 2011; 5401-5406.
- [37] SCHAFFER A A, EIBERFER O, FUCHS M, *et al.*. Anthropomorphic soft robotics—from torque control to variable intrinsic compliance [J]. *Robotics Research*, 2011, 70; 185-207.
- [38] LAUZIER N, GRENIER M, GOSSELIN C. 2 DOF cartesian force limiting device for safe physical human-robot interaction [C]. *International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan*; 2009; 253-257.
- [39] LAUZIER N, GOSSELIN C. 3-DOF cartesian force limiting device based on delta architecture for safe physical human-robot interaction [C]. *International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, Alaska, USA*; 2010; 3420-3425.
- [40] DONG J H, HYUN S Y, JUNG W P, *et al.*. Variable stiffness mechanism for human-friendly robots [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(6); 880-897.
- [41] GOSWAMI, PESHKIN M A, COLGATE J E. Passive robotics: an exploration of mechanical computation [C]. *Proceedings of 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, USA*; 1990; 279-284.
- [42] HIRATA Y, HARA A, KOSUGE K. Passive-type intelligent walking support system ‘RT Walker’ [C]. *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004), Sendai, Japan*; 2004; 3871-3876.
- [43] PESHKIN M A, COLGATE J E. Cobots [J]. *Industrial Robot*, 1999, 26 (5); 335-341.
- [44] KULIC D, CROFT E A. Safe planning for human-robot interaction [J]. *Journal of Robotic Systems*, 2005, 22(7); 383-396.
- [45] SANTIS A D, SCHAFFER A A, OTT C, *et al.*. The skeleton algorithm for self-collision avoidance of a humanoid manipulator [C]. *International Conference on Advance Intelligent Mechatronics, Zurich, Switzerland*; 2007; 1-6.
- [46] KULIC D, CROFT E A. Real-time safety for human-robot interaction [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, 54(1); 1-12.
- [47] KHATIB O. Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1986, 5(1); 90-98.
- [48] KULIC D, CROFT E A. Pre-collision safety strategies for human-robot interaction [J]. *Autonomous Robot*, 2007, 22(2); 149-164.
- [49] HADDADIN S, SCHAFFER A A, LUCA A D, *et al.*. Collision detection and reaction; a contribution to safe physical human-robot interaction [C]. *International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, France*; 2008; 3356-3363.
- [50] PARUSEL S, HADDADIN S, CHAFFER A A. Modular state-based behavior control for safe human-robot interaction; A lightweight control architecture for lightweight robot [C]. *International Conference on Robots and Automation, Shanghai, China*; 2011; 4298-4305.
- [51] TSETSERUKOU D, TADAKUMA R, KAJIMOTO H, *et al.*. Intelligent variable joint impedance control and development of a new whole-sensitive anthropomorphic robot arm [C]. *International Symposium on Computational Intelligent in Robotics and Automation, Jacksonville, FL, USA*; 2007; 338-343.
- [52] SETSERUKOU D, TADAKUMA R, KAJIMOTO H, *et al.*. Towards safe human-robot interaction; joint impedance control of a new teleoperated robot arm [C]. *International Conference on Robot&Human Interactive Communication, Jeju, Korea*; 2007; 860-865.
- [53] TSETSERUKOU D, KAWAKAMI N. Design, control and evaluation of a whole-sensitive robot arm for physical human-robot interaction [J]. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2009, 6(4); 699-725.
- [54] CALINON S, SARDELLITTI I, CALDWELL D G. Learning-based control strategy for safe human-robot interaction exploiting task and robot redundancies [C]. *International Conference on Intelligent Robotics and Systems, Taipei, Taiwan, China*; 2010; 249-254.
- [55] LI Y, GE S S, YANG C. Impedance control for

- Multi-point human-robot interaction [C]. *The 8th Asian Control Conference, Kaohsiung, Taiwan, China*;2011;1187-1192.
- [56] XIONG G L, CHEN H C, ZHANG R H, *et al.*. Control of human-robot interaction flexible joint lightweight manipulator based joint torque sensors [C]. *The 7th International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, Kuala Lumpur, Malaysia*;2011;5022-5029.
- [57] KOSUGE K, MORINAGA S. Beyond motion control for dependable robots in human environment [C]. *2nd IARP/IEEE-RAS Joint Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments, LAAS-CNRS, Toulouse, France*;2002.
- [58] YU H, SPENKO M, DUBOWSKY S. An adaptive shared control system for an intelligent mobility aid for the elderly [J]. *Autonomous Robots*, 2003, 15 (1);53-66.
- [59] LASCHI C, TETI G, TAMBURRINI G, *et al.*. Adaptable semi-autonomy in personal robots [C]. *Proceedings of 10th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, Bordeaux, Paris, France*;2001;152-157.
- [60] NAKAUCHI Y, NOGUCHI K, SOMWONG P, *et al.*. Vivid room: human intention detection and activity support environment for ubiquitous autonomy [C]. *Proceedings of 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, USA*;2003;773-778.

#### 作者简介:



**熊根良**(1978—),男,江西高安人,博士后,副教授,2001年于四川大学获学士学位,2006年、2010年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,现为南昌大学机械工程学院博士后,主要研究方向为轻型机械臂、机器人阻抗控制/力控制、柔顺控制、机器人人-机交互技术。E-mail: xgl.lijing@yahoo.com.cn



**陈海初**(1975—),男,湖南常德人,教授,硕士生导师,2002年、2005年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事机器人技术的研究。E-mail: chenhaichu@126.com



**梁发云**(1970—),男,安徽合肥人,副教授,硕士生导师,1999年、2005年于合肥工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事虚拟现实技术、裸眼立体显示技术、智能化仪器仪表的研究。E-mail: cnlfy@126.com



**董增文**(1978—),男,江西余干人,博士研究生,讲师,2007年于南昌大学获硕士学位,主要从事虚拟现实技术、机器人技术方面的研究。E-mail: jxnddzw@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)