



Views & Comments

人非机器——面向超灵活智能制造的以人为本的人机共生

陆玉前^a, Juvenal Sastre Adrados^a, Saahil Shivneel Chand^a, 王力翠^b^a Department of Mechanical Engineering, The University of Auckland, Auckland 1142, New Zealand^b Department of Production Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm 10044, Sweden

1. 引言

真正的问题不是机器是否会思考，而是人是否会思考。

——Burrhus Frederic Skinner

由于未来的制造业（即工业4.0 [1]）需要超灵活的智能制造系统（根据个性化产品自动调整生产工艺变化），因此专用制造系统正在逐步淡出我们的视线[2–4]。制造车间可以成为非结构环境。在这样的环境中，制造系统和制造工艺通过自适应实时决策动态改变其工艺工程。目前，提升制造业灵活性和重构性的一个新兴趋势是使用可与人类一同工作的高效的协作式机器[5–7]。人工智能（AI）[7]所赋能的机器正在从根本上改变生产模式以及由谁以何种方式执行工作。我们相信，它们能够提高工人能力、提升工人身心健康。未来的社会将构造一个和谐的生态系统，在这个生态系统中，人类和机器彼此合作，将人类的认知优势与智能机器独有的能力结合起来，从而打造出对环境能够自适应的智能团队[8,9]。

正如Rosenbrock警示称，“人类决不能受制于机器人和自动化，反过来机器人和自动化应该服从人类”，我们认为当前正处在实现上述目标的关键时间点上[10]。未来的智能机器可以通过自主交流、共情和需求驱动型协作，与工人建立可信赖的关系。这可以提高工人的工作效率以及形成高效且灵活的制造工艺。但目前对以工人利益作为首要优化目标的制造系统（即“以人为本”的

制造系统）的相关研究还很欠缺。制造领域中的人机协作的研究至今只以人机界面[11]和人因工程（如人体工程学和大脑工作负荷）为主，来提高整个系统的性能[12]。为了填补这一空白，我们在此提出一种以人为本的人机共生框架。该框架能够在工业环境中增强人的工作能力，提高工人的身心健康。本文将讨论这一框架的基本要素及其使能技术。

2. 人机共生框架

在下文中，我们将介绍面向协同制造采用的一种人机共生框架。人机共生具有以下特征：①以人为本，即关注人类想法和判断的能力；②社会健康，即为了最大限度提升社会健康而识别并响应工人身心表现的能力；③适应性，即通过学习环境而改变行为的能力。

图1为一种人机共生框架，在该框架中，人类和机器组成智能团队，他们共同感知、推理并协同应对即将出现的制造任务和突发事件。第2.1节将讨论人类与机器之间的主要交流方式，第2.2节介绍人机理解问题，第2.3节将提出我们关于人机协同智能的思考，第2.4节将讨论以人为本的协作机制（该机制是人机共融的一个关键特征）。

2.1. 人机交流

除了传统的人机交互界面之外，还有多种交流方式

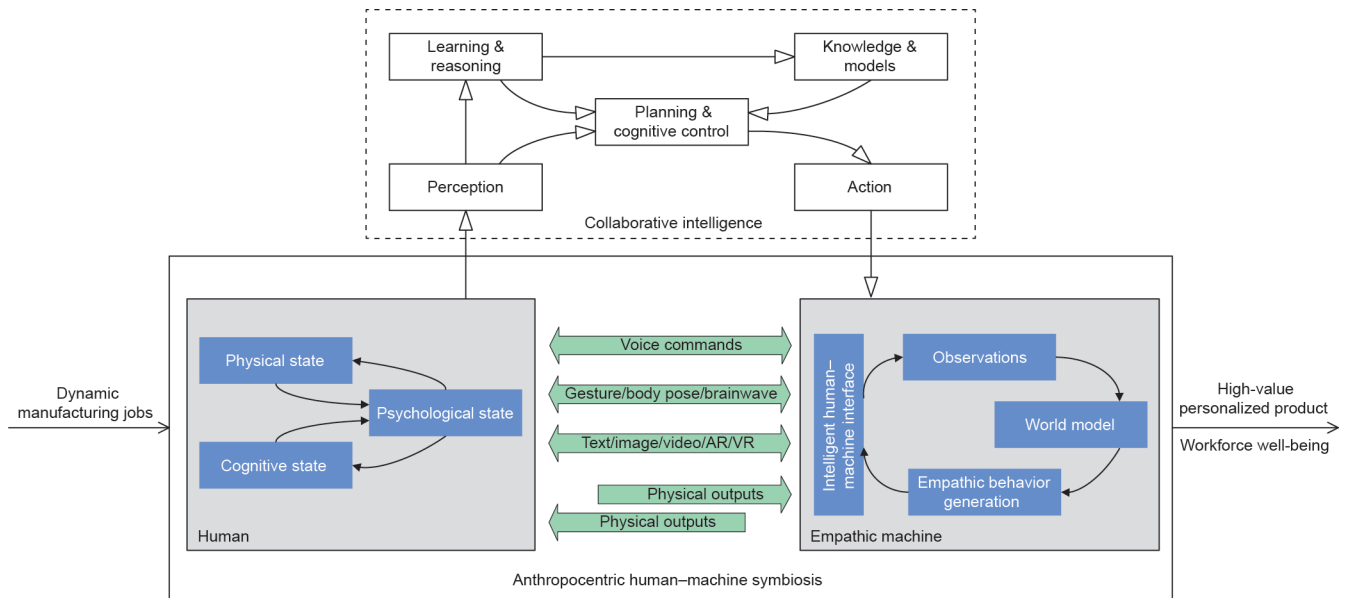


图1. 以人为本的人机共生框架。AR: 增强现实; VR: 虚拟现实。

表1 人机交流方式

Method	Human-to-machine	Machine-to-human	Usability ^a
Voice commands	√	√	High
Physical inputs/outputs	√	√	High
Text	√	√	High
Image	√	√	Medium
Video	√	√	Medium
AR/VR	√	√	Medium
Gesture	√	—	Medium
Body pose	√	—	Medium
Brainwaves	√	—	Low

^a The usability evaluation of these technologies is the authors' qualitative assessment of their effectiveness, efficiency, and satisfactoriness. No solid quantitative comparison between these technologies in the context of human-machine communication is available yet.

可以实现人机交流，如语音指令[13,14]、手势[13,15-17]、体态[15,18]、脑电波[19,20]、增强现实(AR)/虚拟现实(VR)[21-23]。这些全新的交流渠道是由人工智能技术(如图像处理和语音识别)实现的，它们使得人机交流更接近于自然交互。表1根据使用情景和可用性，列举了典型的人机交流方式。语音指令、物理交互、文本、图像、视频、增强现实和虚拟现实均可用于人类和机器之间的双向交流，并且这些方法易于在实际生产中应用。尽管手势、体态和脑电波识别前景广阔，但受困于工厂环境的复杂限制，因此上述方法更适宜于人类到机器的单向交流。

除了确保人机之间的交流信息准确外，交流还必须自适应于交流内容、环境和人的身份。由于人机交流与情景、时间点以及交换的消息有关，因此人机交流是一个动态的过程。有效的人机交流能够根据以下内容来调整交流方式：①内容的性质，例如，该内容是一条建议、一条警告还是一项指示；②情景，例如，机器是否扮演辅助角色，以及情况是否紧迫；③人的文化程度、教育背景和沟通方式，例如，人是来自高语境文化还是低语境文化[24]。

2.2. 人机理解——共情能力

身心状态能够对个人工作表现产生显著影响[25,26]。身体的不良反应(如肌肉疲劳累积[12]和不良姿势[27])会增加执行制造任务时的难度[28,29]。心理反应(如高认知负荷)会提高压力水平、降低满足感，最终削弱生产力[12,30]。因此，准确评估人机协作过程中的人类体力负荷、认知负荷以及心理反应(如情绪)，对于提高人的工效至关重要。在人机协作背景下，通过间接处理各种信号(如情绪韵律[31,32]、面部表情[33-35]、体态[36,37]、肌电图[38]、眼睛注视和瞳孔扩张[38,39])，可以探知人的身体状况、认知状况和心理状况。未来，机器必须能够通过观察人的身体和精神状态，建立一个以人为本的模型。在该模型中，机器将产生与工人共情的行为，这种行为可以视为人机之间富有同理心的互动。发展智能机器共情技能的最终目标是在人类和机器之间建立信任和尊重。因为人们发现，信任

和尊重是许多社交[40]（包括协作）的基础所在，能够提高人机团队的工效和满足感。

对人类而言，了解并关心智能机器的“健康状况”同样至关重要，通过互相了解，人类和机器之间可以构建更加良好的关系。机器的健康状况包括与工作负荷、任务变动水平等相关的定量指标。基于人机健康状况的任务动态分配和调整有助于最大限度地提高人机团队的工效。

2.3. 人机协同智能

人机共生还需要考虑智能系统的控制算法。一项针对12个行业1500家公司的研究表明，当人和系统形成协同智能，而不是由人工智能算法主宰智能时，这些公司的绩效得到了最显著的提高[41]。在智能的人机协作环境中，人类和机器的智能体建立一种合作关系。这种合作关系通过与环境和其他智能体的互动，进而提升团队效益，并尽可能提高自身的长期回报。智能机器可以生成自适应执行策略，以适应变化的工作环境及其人类合作伙伴的状态。在高效率的团队中，智能机器和人类智能体将通过优势互补构建一种能够协作规划与控制的关系。在这方面，基于学习的算法（如多智能体强化学习）是实现人机团队自适应协作决策的一个颇有希望的选项。

2.4. 以人为本的协作机制

根据自然的人机交流（包括共情理解），我们认为，以人为本的生产方式[42]将成为现实。未来的人机团队需要把工人的需求和福祉置于制造规划和控制的中心位置上，而不是继续执行当前面向系统优化的制造控制方法。从专用制造系统转型为灵活的非结构化人机协作为保障制造生产力和工人的福祉带来了巨大的挑战和机遇[43,44]。我们需要借助具备高度适应性和重构性且能够实时处理数据的系统解决人体工程学问题，同时保障人机协作方面的生产力。例如，在人机闭环制造控制中，我们可以在不影响总体生产效率的情况下考虑人的身心状况，从而实现适应性的劳动需求[45]。具备共情能力的机器需要给予工人最大限度的工作自由度，这些机器能够适应性地协助工人完成制造任务。我们需要利用实时动态规划和再规划算法应对工人的突发行为，并根据实时任务进展和工人身心状况改进人机协作计划。

3. 讨论

人机共生可以显著改进未来的生产系统和转变人类工人的角色。我们认为，以人为本的人机共生可以带来以下长期效益：

- **工人福祉：**由于工人从发挥服从作用转变为在制造中占主导地位，人机共生可以显著提升工人福祉和工作满足感。人机协作系统可以持续地监测并优化工人的身心健康。
- **制造灵活性：**人机共生可以提高制造系统和工艺的灵活性。我们可以动态配置制造系统和工艺，以应对产品、工人行为和生产系统的动态变化。从死板的制造模式转变为灵活的系统，该系统将会按照实时需求生产出动态批量的个性化产品。
- **人机能力发展：**借助于人工智能算法，人类和机器可以学习合作经验并提升各自能力。工人可以通过与智能机器进行可靠且密切的互动来获取新的知识和技能，这些智能机器将以适合的方式协助、指导工人工作。另一方面，机器也可以根据与不同人的交互，提升其技术能力和人际交往能力。

4. 结论

我们认为，人工智能技术的进步使以人为本的制造成为可能。人类将从重复固定的任务（最大限度地提高制造系统的性能）中解放出来，相反，在智能机器的按需协助下，工人可以在生产中发挥主导作用。在动态共存环境下，具有共情能力的机器以及高效率的人类合作伙伴将提升制造业的弹性、灵活性和可持续性。我们鼓励开展更多的研究，重新定义人类在未来制造业中的角色。

Acknowledgments

This study was supported by grants from The University of Auckland FRDF New Staff Research Fund (3720540).

References

- [1] Kagermann H, Helbig J, Hellinger A, Wahlster W. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: securing the future of German manufacturing industry. Final report of the Industrie 4.0 Working

- Group. Berlin: Federal Ministry of Education and Research; 2013 Apr.
- [2] Lu Y, Xu X, Wang L. Smart manufacturing process and system automation—a critical review of the standards and envisioned scenarios. *J Manuf Syst* 2020;56:312–25.
 - [3] Mittal S, Khan MA, Romero D, Wuest T. Smart manufacturing: characteristics, technologies and enabling factors. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2017;233(5):1342–61.
 - [4] Zhong RY, Xu X, Klotz E, Newman ST. Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: a review. *Engineering* 2017;3(5):616–30.
 - [5] Bauer M, Lecrubier Y, Suppes T. Awareness of metabolic concerns in patients with bipolar disorder: a survey of European psychiatrists. *Eur Psychiatry* 2008;23(3):169–77.
 - [6] Wang L, Gao R, Váncza J, Krüger J, Wang XV, Makris S, et al. Symbiotic human–robot collaborative assembly. *CIRP Ann* 2019;68(2):701–26.
 - [7] Wang L. From intelligence science to intelligent manufacturing. *Engineering* 2019;5(4):615–8.
 - [8] Zhou J, Li P, Zhou Y, Wang B, Zang J, Meng L. Toward new-generation intelligent manufacturing. *Engineering* 2018;4(1):11–20.
 - [9] Gao L, Shen W, Li X. New trends in intelligent manufacturing. *Engineering* 2019;5(4):619–20.
 - [10] Rosenbrock HH. *Machines with a purpose*. Oxford: Oxford University Press; 1990.
 - [11] Gorecky D, Schmitt M, Loskyll M, Zühlke D. Human–machine interaction in the Industry 4.0 era. In: *Proceeding of 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*; 2014 Jul 27–30; Porto Alegre, Brazil. New York: IEEE; 2014. p. 289–94.
 - [12] Peruzzini M, Grandi F, Pellicciari M. Exploring the potential of Operator 4.0 interface and monitoring. *Comput Ind Eng* 2020;139:105600.
 - [13] Rogalla O, Ehrenmann M, Zollner R, Becher R, Dillmann R. Using gesture and speech control for commanding a robot assistant. In: *Proceeding of 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*; 2002 Sep 27; Berlin, Germany. New York: IEEE; 2002. p. 454–9.
 - [14] Cohen PR, Oviatt SL. The role of voice input for human–machine communication. *Proc Natl Acad Sci USA* 1995;92(22):9921–7.
 - [15] Neto P, Norberto Pires J, Paulo MA. High-level programming and control for industrial robotics: using a hand-held accelerometer-based input device for gesture and posture recognition. *Ind Robot* 2010;37(2):137–47.
 - [16] Tellaeche A, Kildal J, Maurtua I. A flexible system for gesture based human–robot interaction. *Procedia CIRP* 2018;72:57–62.
 - [17] Pavlovic VI, Sharma R, Huang TS. Visual interpretation of hand gestures for human–computer interaction: a review. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 1997;19(7):677–95.
 - [18] Liu H, Wang L. Human motion prediction for human–robot collaboration. *J Manuf Syst* 2017;44(Part 2):287–94.
 - [19] Mohammed A, Wang L. Brainwaves driven human–robot collaborative assembly. *CIRP Ann* 2018;67(1):13–6.
 - [20] Stephygraph LR, Arunkumar N. Brain-actuated wireless mobile robot control through an adaptive human–machine interface. In: *Proceeding of the International Conference on Soft Computing Systems*; 2015 Apr 23–May 13; Chennai, India. Berlin: Springer; 2016. p. 537–49.
 - [21] Majewski M, Kacalak W. Human–machine speech-based interfaces with augmented reality and interactive systems for controlling mobile cranes. In: *Proceeding of International Conference on Interactive Collaborative Robotics*; 2016 Aug 24–25; Budapest, Hungary. Berlin: Springer; 2016. p. 89–98.
 - [22] Lee T, Hollerer T. Handy AR: markerless inspection of augmented reality objects using fingertip tracking. In: *Proceeding of 2007 11th IEEE International Symposium on Wearable Computers*; 2007 Oct 11–13; Boston, MA, USA. New York: IEEE; 2007. p. 83–90.
 - [23] Grajewski D, Górski F, Zawadzki P, Hamrol A. Application of virtual reality techniques in design of ergonomic manufacturing workplaces. *Procedia Comput Sci* 2013;25:289–301.
 - [24] Hall ET, Hall MR. *Understanding cultural differences*. New York: Intercultural Press Inc.; 1989.
 - [25] Marcora SM, Staiano W, Manning V. Mental fatigue impairs physical performance in humans. *J Appl Physiol* 2009;106(3):857–64.
 - [26] Yung M, Kolus A, Wells R, Neumann WP. Examining the fatigue-quality relationship in manufacturing. *Appl Ergon* 2020;82:102919.
 - [27] Busch B, Maeda G, Mollard Y, Demangeat M, Lopes M. Postural optimization for an ergonomic human–robot interaction. In: *Proceeding of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*; 2017 Sep 24–28; Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE; 2017. p. 2778–85.
 - [28] Kim W, Lorenzini M, Balatti P, Wu Y, Ajoudani A. Towards ergonomic control of collaborative effort in multi-human mobile-robot teams. In: *Proceeding of 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*; 2019 Nov 3–8; Macau, China. New York: IEEE; 2019. p. 3005–11.
 - [29] Marin AG, Shourijeh MS, Galibarov PE, Damsgaard M, Fritzsche L, Stulp F. Optimizing contextual ergonomics models in human–robot interaction. In: *Proceeding of 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*; 2018 Oct 1–5; Madrid, Spain. New York: IEEE; 2018. p. 8603–8.
 - [30] Ding Y, Cao Y, Duffy VG, Wang Y, Zhang X. Measurement and identification of mental workload during simulated computer tasks with multimodal methods and machine learning. *Ergonomics* 2020;63(7):896–908.
 - [31] Schuller B, Rigoll G, Lang M. Hidden Markov model-based speech emotion recognition. In: *Proceeding of 2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2003 (ICASSP '03)*; 2003 Apr 6–10; Hong Kong, China. New York: IEEE; 2003. p. 401–4.
 - [32] El Ayadi M, Kamel MS, Karray F. Survey on speech emotion recognition: features, classification schemes, and databases. *Pattern Recognit* 2011;44(3):572–87.
 - [33] Busso C, Deng Z, Yildirim S, Bulut M, Lee CM, Kazemzadeh A, et al. Analysis of emotion recognition using facial expressions, speech and multimodal information. In: *Proceeding of the 6th International Conference on Multimodal Interfaces*; 2014 Oct 13–15; State College, PA, USA. New York: Association for Computing Machinery; 2004. p. 205–11.
 - [34] Ioannou SV, Raouzaoui AT, Tzouvaras VA, Mailis TP, Karpouzis KC, Kollias SD. Emotion recognition through facial expression analysis based on a neurofuzzy network. *Neural Netw* 2005;18(4):423–35.
 - [35] Cohen I, Garg A, Huang TS. Emotion recognition from facial expressions using multilevel HMM. In: *Proceedings of the Neural Information Processing Systems: Natural and Synthetic 14*; 2000 Nov 28–30; Denver, CO, USA; 2020.
 - [36] Schindler K, Van Gool L, de Gelder B. Recognizing emotions expressed by body pose: a biologically inspired neural model. *Neural Netw* 2008;21(9):1238–46.
 - [37] McColl D, Zhang Z, Nejat G. Human body pose interpretation and classification for social human–robot interaction. *Int J Soc Robot* 2011;3(3):313–32.
 - [38] Sadrfaridpour B, Saeidi H, Burke J, Madathil K, Wang Y. Modeling and control of trust in human–robot collaborative manufacturing. In: *Ranjeev M, Donald S, Alan W, Lawless WF, editors. Robust intelligence and trust in autonomous systems*. New York: Springer; 2016. p. 115–42.
 - [39] Hogervorst MA, Brouwer AM, van Erp JBF. Combining and comparing EEG, peripheral physiology and eye-related measures for the assessment of mental workload. *Front Neurosci* 2014;8:322.
 - [40] Lee J, Moray N. Trust, control strategies and allocation of function in human–machine systems. *Ergonomics* 1992;35(10):1243–70.
 - [41] Wilson HJ, Daugherty PR. Collaborative intelligence: humans and AI are joining forces. *HBR* 2018;96(4):114–23.
 - [42] Rauch E, Linder C, Dallasega P. Anthropocentric perspective of production before and within Industry 4.0. *Comput Ind Eng* 2019;139:105644.
 - [43] Hägele M, Schaaf W, Helms E. Robot assistants at manual workplaces: effective co-operation and safety aspects. In: *Proceeding of the 33rd ISR (International Symposium on Robotics)*; 2002 Oct 7–11; Stockholm, Sweden. Berlin: Springer; 2002.
 - [44] Ferraguti F, Villa R, Landi CT, Zanchettin AM, Rocco P, Secchi C. A unified architecture for physical and ergonomic human–robot collaboration. *Robotica* 2019;38(4):1–15.
 - [45] Stankovic JA. Research directions for the internet of things. *IEEE Internet Things J* 2014;1(1):3–9.