[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.04.002

六自由度果蔬采摘机器人关节空间轨迹规划

司艳伟[1,2], 陈洪立[1,2]

(1.浙江理工大学 现代纺织装备技术教育部工程研究中心, 浙江 杭州 310018;
2.浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要:为了提高果蔬采摘机器人的作业质量和运动控制性能,提出了基于三次B样条函数的插值曲线在关节空间进行轨迹规划,并利用具有局部可控性的三次B样条与七次样条函数作为插值曲线的轨迹规划进行标定。以六自由度果蔬采摘机器人为研究对象,利用Creo2.0和MATLAB的robot-toolbox建立了机器人的机械模型和仿真模型,分析了机器人末端执行器在操作空间的运动状态,研究了关节空间与操作空间轨迹的关系及机器人运动轨迹的平滑性。研究结果表明三次B样条函数在关节空间进行插值可以得到平滑的运动轨迹,减小了机械磨损和冲击。该轨迹规划方法能提高工作质量并延长机械臂的工作寿命。

关 键 词:果蔬采摘机器人;轨迹规划;三次B样条;笛卡尔空间轨迹

中图分类号:TP24 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2895(2017)04-0008-05

Joint Trajectory Planing of 6-DOF Fruit-Vegetable Harvesting Robots

SI Yanwei[1,2], CHEN Hongli[1,2]

(1. Engineering Research Center of Modern Textile Equipment Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. School of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at improving the operation quality and the motion control performance of fruit-vegetable harvesting robots, in the joint space, a cubic B-spline interpolation function was proposed for trajectory planning and compared with the results of the 7th-order spline interpolation. The mechanical model and the simulation model of 6 DOF fruit-vegetable harvesting robot, which was regarded as the research object, were established by using Creo2.0 and robot-toolbox of MATLAB. The movement state of the end effector was analyzed in operation space and the relation between joint space and operation space trajectory and the smoothness of the motion were studied. The research result showed that a smooth motion trajectory with reducing mechanical wear and shock could be obtained by using cubic B-spline in the joint space, which could be used to promote the work quality and extend the working life of the manipulator.

Keywords: harvesting robot; trajectory planing; cubic B-spline curve; Cartesian Space trajectory

研究机器人运动控制规律是以机器人轨迹规划为前提和基础的,机器人轨迹规划属于机器人底层模块,其主要形式有点到点(PTP)运动和连续路径运动[1]。这里的轨迹不同于简单的路径,它主要包括机器人运动过程中的位移、速度和加速度随时间的变化规律。近年来,国内外很多学者在机器人轨迹规划方面做了大量的研究工作,研究了多种不同的轨迹规划方法。例如Lin C-S[2]等采用一种基于时间最优原则的轨迹规划方法,选择使用柔性多面体搜索的智能算法,利用高次多项式作为插值曲线连接中间点,进而获得了理想的运动轨迹;Bazaz SA[3]等在前人研究的基础上,利用三次曲线段的光滑特性,将其作为插值曲线连接中间点;李东洁[4]等为了提高机器人运动轨迹的平滑性和机器人的执行效率,选择平面关节型SCARA机器人作为研究对象,将4个关节速度、加速度和加速度变化作为约束条件,在关节空间中对SCARA机器人进行轨迹规划;谭冠政[5]为了提高工业机器人的作业效率,基于时间最优原则提出了一种新方法,将关节位

收稿日期:2016-11-30;**修回日期**:2017-03-20

基金项目:浙江省自然科学基金(LY15E050027);国家自然科学基金项目(51205363)。

第一作者简介:司艳伟(1991),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为机器人轨迹规划。通信作者:陈洪立(1980),男,山东曲阜人,副教授,硕士生导师,主要研究领域为纺织装备技术。E-mail:chenhldr@zstu.edu.cn

移、速度、加速度以及二阶加速度边界值作为约束条件,采用二次多项式加余弦函数进行关节轨迹规划,提高了作业效率的同时还延长了机器人的工作寿命。

笔者以六自由度果蔬采摘机器人为研究对象,采用三次 B 样条曲线函数插值获得机器人的位移、速度和加速度随时间的变化规律。该方法利用 B 样条的局部特性,即每段三次 B 样条曲线仅由 4 个节点决定。一方面提高了控制的精度,进行动态规划时的高实时性要求的计算是非常有意义的[6];另一方面可以保证加速度的连续性。本文重点介绍了关节空间中 B 样条曲线的构造[7],在理解 B 样条曲线性质的基础上,用三次 B 样条曲线规划出了机器人的位移、速度和加速度的轨迹曲线,通过三次 B 样条与七次样条插值函数的插值结果进行标定,证明了三次 B 样条函数在机械臂轨迹规划方面的优越性。

1　果蔬采摘度机器人建模

1.1　机器人的基本结构

机械臂安装在移动小车 AGV[8] 上,原设计由 4 个步进电机和 2 个直流伺服电机驱动 6 个关节,即有 6 个自由度,主要构成部件包括移动关节(关节 1)、腰扭关节(关节 2)、肩转关节(关节 3)、肘转关节(关节 4)、腕转(关节 5)和腕扭关节(关节 6),其 Creo2.0 所建的三维模型如图 1 所示。

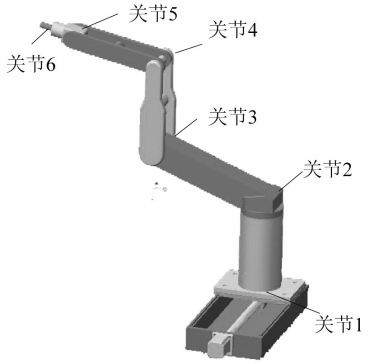

图 1　果蔬采摘机器人模型图

Figure 1　Model of harvesting robot

1.2　机器人的 MATLAB 建模

改进形式 D-H 方法的 4×4 齐次变换矩阵为

$$
{}_{i}^{i-1}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}
\cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\
\sin\theta_i\cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i\sin\alpha_{i-1} \\
\sin\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & -d_i\cos\alpha_{i-1} \\
0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}。
$$

式中:i 表示关节序号;α_{i-1} 表示连杆扭角;a_i 表示连杆长度;θ_i 表示连杆转角;d_i 表示连杆偏距。果蔬采摘机器人的连杆参数和关节变量见表 1。利用 MATLAB 中的 Link 函数进行机器人建模。

表 1　机器人的 DH 连杆参数和关节变量

Table 1　Link parameters and joint variables

关节序号 i	连杆扭角 α_{i-1}/rad	连杆长度 a_i/mm	连杆转角 θ_i/rad	连杆偏距 d_i/mm
1	π/2	0	0	0~300
2	π/2	0	−8π/9~8π/9	−180
3	π/2	258	0~3/2π	104
4	0	210	0~3/2π	0
5	0	210	−8π/9~8π/9	0
6	π/2	0	−8π/9~8π/9	0

图 2 中,圆柱体表示转动副,长方体表示移动副,粗线表示连接关节的连杆,各个运动副(关节)可以在 ZSTU-ARM 控制面板(图 3)控制下进行移动或转动。

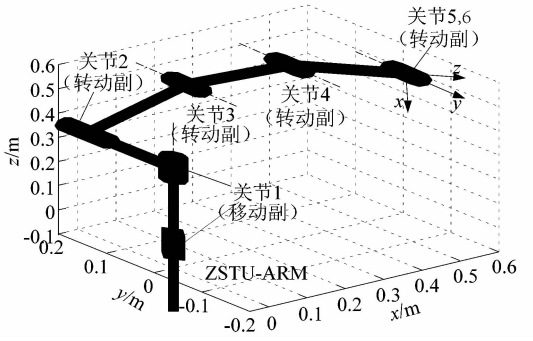

图 2　MATLAB 建模图

Figure 2　MATLAB model

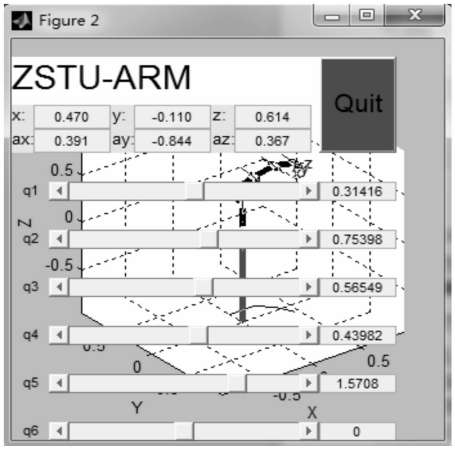

图 3　各个关节控制面板

Figure 3　Control panel of joints

2　空间轨迹规划

2.1　关节空间与操作空间轨迹规划

机器人工具箱中的关节空间轨迹规划要先计算关

节变量值,再用正运动学计算函数得到机械臂末端的姿态;操作空间轨迹规划先计算操作空间中的位姿,再用逆运动学计算函数得到机械臂各个关节的变量值。为了便于比较 2 种空间的轨迹规划,假设起始状态 $\boldsymbol{q}_s$ = [-0.050 9,0.349 1,1.209 5, -1.614 4,2.040 3, 0.000 0],对应的机械臂末端姿态为 $\boldsymbol{T}_s$,终止状态取 $\boldsymbol{q}_e$ = [-0.077 6, -1.012 3,1.412 0, -2.003 6,1.220 0, 0.000 0],对应的机械臂末端姿态为 $\boldsymbol{T}_e$,用七阶样条曲线进行插值所得 6 个关节在 2 s 内的运动轨迹如图 4 ~ 10。

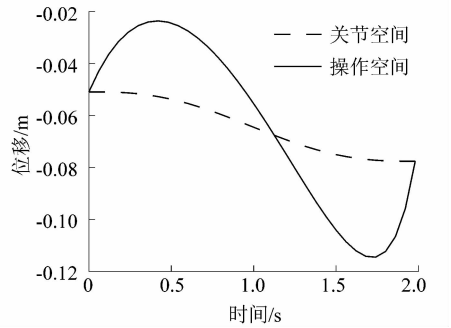

图 4 关节 1 位移轨迹

Figure 4 Displacement of joint 1

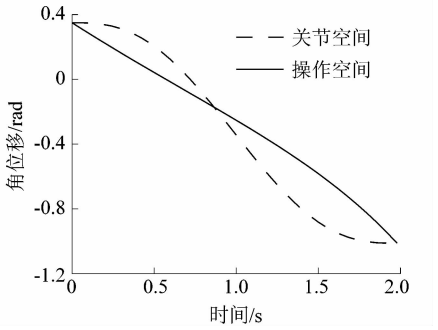

图 5 关节 2 角位移轨迹

Figure 5 Displacement of joint 2

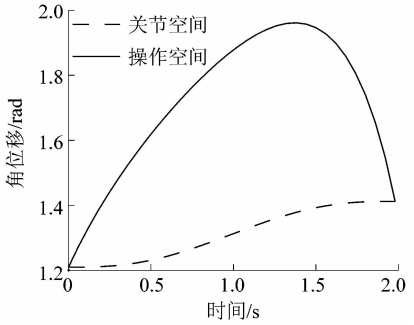

图 6 关节 3 角位移轨迹

Figure 6 Displacement of joint 3

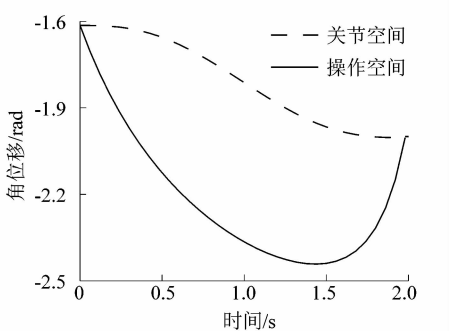

图 7 关节 4 角位移轨迹

Figure 7 Displacement of joint 4

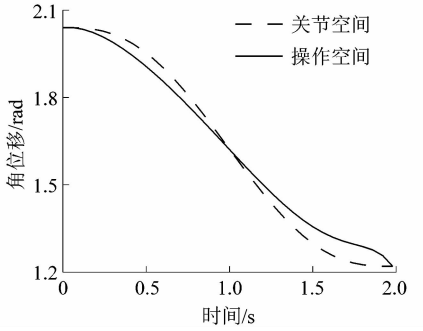

图 8 关节 5 角位移轨迹

Figure 8 Displacement of joint 5

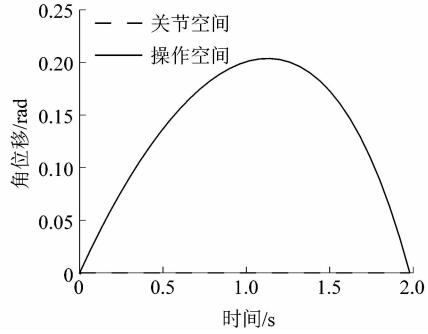

图 9 关节 6 角位移轨迹

Figure 9 Displacement of joint 6

图 4 ~9 机械臂关节空间和操作空间中轨迹规划的仿真结果表明:同样的起始与终止位姿,由于操作空间的轨迹规划的反解过程会出现多解,所以 2 种空间轨迹规划的关节变量的变化趋势完全不同,甚至会导致终止状态的关节变量与关节空间轨迹规划时的完全不同,机械臂末端的轨迹也完全不同(图 10)。

图 11 和图 12 分别是通过 MATLAB 仿真得出各个关节在关节空间的速度、加速度在 2 s 内的变化情况。可以看出七次样条函数插值获得的机械臂的速度、加速度轨迹变化都比较平稳,柔性冲击较小,符合机械臂轨迹规划的要求,减少机械磨损,增长机械结构

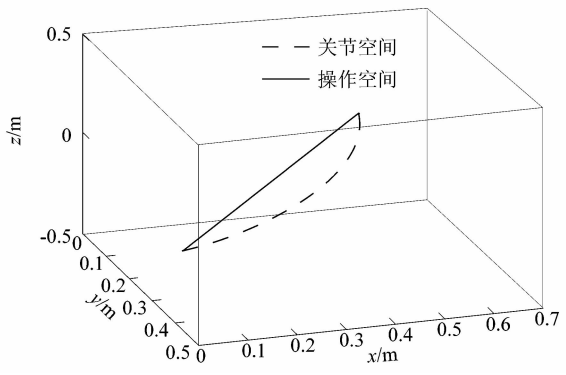

图 10　机械臂末端轨迹

Figure 10　End trajectory of manipulator

的寿命。虽然随着插值函数次数的增加会提高轨迹的平滑性和稳定性,但是同时也会增加算法的复杂程度和容易产生龙格现象,所以在满足运动要求的情况下,插值曲线次数越低越好。

2.2　三次 B 样条函数的轨迹规划

B 样条曲线方程

$$q(u) = \sum_{i=0}^{n} P_j N_{j,k}(u)。$$

式中:P_j为控制顶点($j=0,1,\cdots,n$),j 表示 B 样条序号;$N_{j,k}(u)$($j=0,1,\cdots,n$)是 k($k+1$ 阶)次规范 B 样条基函数[9],可以由 DeBoor 递推公式求出基函数的表达式为

$$\begin{cases} N_{j,0}(u) = \begin{cases} 1, u_j \leqslant u \leqslant u_{j+1} \\ 0, \text{其他} \end{cases}, \\ N_{j,k}(u) = \dfrac{u-u_j}{u_{j+k}-u_j} N_{j,k-1}(u) + \dfrac{u_{j+k+1}-u_j}{u_{j+k+1}-u_j} N_{j+1,k-1}(u)。 \end{cases}$$

因为每个关节三次 B 样条插值($k=3$)规律是一样的,在此就以关节 1 为例与七次样条曲线插值函数得到轨迹进行比较。

图 13 ~ 15 是关节 1 的三次 B 样条函数和七次样条函数插值所得的轨迹随时间的变化规律,2 种插值函数选取了相同的机械臂的起始状态 $\boldsymbol{q}_s$ = [-0.050 9, 0.349 1, 1.209 5, -1.614 4, 2.040 3, 0.000 0] 和终止状态 $\boldsymbol{q}_e$ = [-0.077 6, -1.012 3, 1.412 0, -2.003 6, 1.220 0, 0.000 0],通过对比可以得出:

1)在图 13 中 2 种插值方法获得位移基本一致,图 14 ~ 15 中 2 种插值函数得到的速度、加速度轨迹误差非常小。

2)三次 B 样条插值算法较七次样条函数插值降低了算法的复杂性行,提高了算法的运算效率以及对机器人运动的控制。

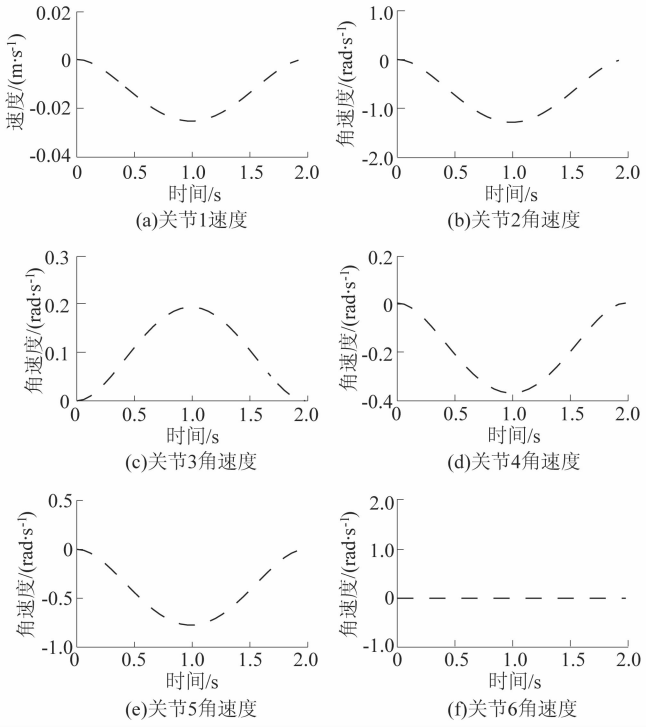

图 11　各关节速度

Figure 11　Velocity of 6 joints

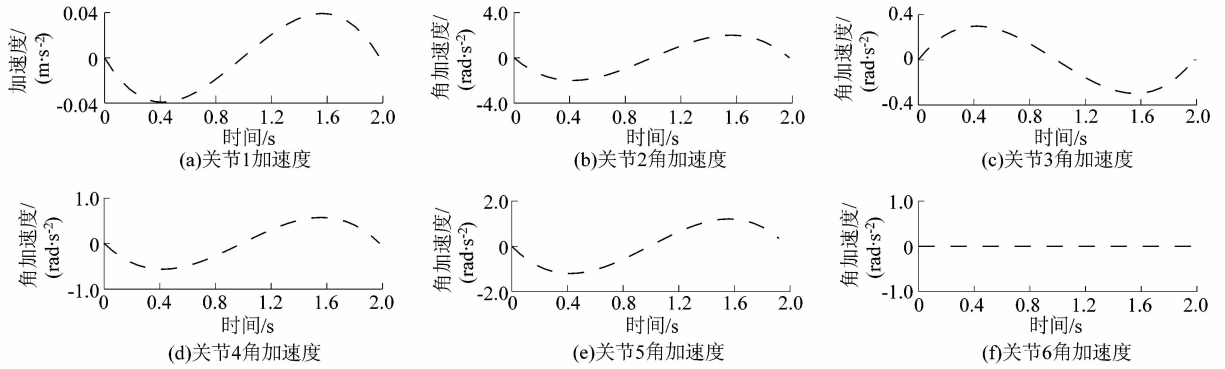

图 12　各关节加速度

Figure 12　Acceleration of 6 joints

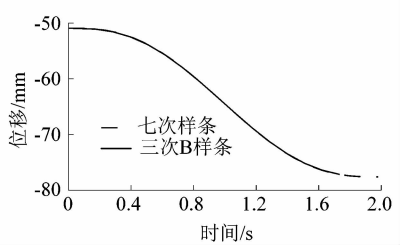

图 13 关节 1 的位移

Figure 13 Displacement of joint 1

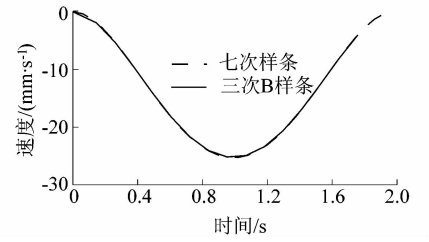

图 14 关节 1 的速度

Figure 14 Velocity of joint 1

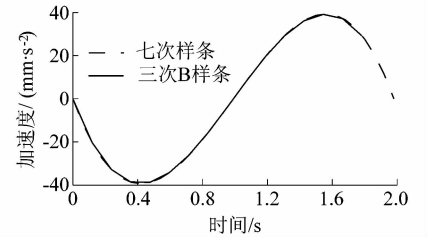

图 15 关节 1 的加速度

Figure 15 Acceleration of joint 1

3 结语

利用 Croe2.0 和 MATLAB 建立了六自由度机器人的机械模型和仿真模型,通过调节 6 个关节的控制面板演示了机器人运动状态,直观地理解了机械臂整体的工作原理,分析了关节空间和操作空间轨迹规划的差异性。通过 MATLAB 进行运动学的正反解运算,求出各个关节在关节空间的经过点的坐标,利用三次 B 样条函数与七阶样条函数插值得到位移、速度、加速度的轨迹曲线对比可以得出:①利用三次 B 样条的局部支撑性质,可以较好地用于机械臂轨迹规划,并可以获得平稳机器人轨迹,有利于减小机械磨损;②由于插值函数次数较低,从而可以提高了算法的执行效率,同时可以避免出现龙格现象。但从图 14 中可以看出在机器人启动阶段会有一定的柔性冲击,这一点有待于优化。通过该研究为 B 样条曲线在机器人轨迹规划领域的实际应用提供了实验基础。

参考文献:

[1] 蔡自兴. 机器人学基础[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2015:140 – 155.

[2] LIN Chun shin, CHANG Porong, LUH J Y S. Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial robots [J]. IEEE transactions on automatic control, 1983, 28(12): 1006 – 1074.

[3] BAZAZ S A, TONDU B. Minimum time on-line joint trajectory generator based on low order spine method for industrial manipulators [J]. Robtics and autonomous system, 1999, 29(4): 257 – 268.

[4] 李东洁,邱江艳,尤波. 一种机器人轨迹规划的优化算法[J]. 机电与控制学报,2009,13(1):123 – 126.

[5] 谭冠政. 工业机器人时间最优轨迹规划及轨迹控制的理论与实验研究[J]. 控制理论与应用,2003,20(2):185 – 192.

[6] 任重,杨灿军,陈鹰. 轨迹规划中的 B 样条插值算法[J]. 机电工程,2001,18(5):36 – 39.

[7] 刘松国,朱世强,吴文祥. 具有运动时间约束的机械手最优平滑轨迹规划[J]. 机电与控制学报,2009,13(6):897 – 902.

[8] 劳立辉. 基于 CAN 总线的果蔬采摘机器人 AGV 控制系统的研制[D]. 杭州:浙江理工大学,2012:8 – 17.

[9] GASPARETTO A, ZANOTTO V. A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators [J]. SCI mechanism and machine theory, 2007, 42(4): 455 – 471.

[信息 · 简讯]

· 产品信息 ·

曼胡默尔推出压缩机物联网解决方案

德国曼胡默尔公司近日推出压缩机物联网解决方案。该方案的核心在于自学系统,即在传感器的辅助下,智能过滤器可与其进程形成联动,进而帮助压缩机提升能效并降低成本。曼胡默尔为压缩机生产商提供如下应用服务:①预见性维护。传感器登记滤清器的载荷状态并测量诸如空气湿度、温度、气压等环境数据。此项数据流可用来持续计算不断增加的载荷消耗对滤清器剩余使用寿命的影响。因而可更为精准预测出滤清器下次更换维护的时间。②原厂配件鉴别。只有原厂替换件可确保压缩机运行顺利且功能正常。传感器可识别原厂替换件是否与该压缩机相匹配。③智能性能监测。该方法采用人工智能技术分析大数据,该数据可用来优化产品及其工艺流程。

物联网是曼胡默尔研发战略中的重要组成部分,目标是开发和提供适合滤清器市场的智能技术。2016 年 8 月,曼胡默尔在新加坡新建了一个专门从事物联网研发的实验室,致力于工业及商用空气滤清器工业物联网技术研发。

(金文俊)