集成激光制造系统加工过程计算机模拟

钟 雷，虞 钢，王建伦，王恒海
(中国科学院 力学研究所 激光智能制造实验室，北京 100080)

摘 要：激光制造是一种有别于传统方式的先进制造系统。针对集成激光制造系统，在分析其结构组成及激光加工特点的基础上，得到了机器人运动学逆解表达式，**提出了一种基于碰撞检测的三角网格简化算法，设计并建立了模拟系统的模块化结构。**基于 VC 开发环境并使用 OpenGL 图形接口技术开发了集成化激光制造系统加工过程计算机模拟系统，为工艺规划和优化提供有效支持，并实现了系统的通用性、易维护性和可扩展性。

关键词：激光制造系统；加工过程仿真；三角网格；简化算法
中图分类号：TP391.9 **文献标识码：**A **文章编号：**1004-731X (2009) 14-4536-04

Machining Processes Simulation for Integrated Laser Manufacturing System

ZHONG Lei, YU Gang, WANG Jian-lun, WANG Heng-hai
(Laboratory for Laser Intelligent Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Laser machining system is one of advanced manufacturing systems. Investigating the feature of system and processing, *a modularized structure and triangular mesh simplification algorithm was established.* Based on VC develop environment and OpenGL technology, a machining processes simulation system was developed for integrated laser manufacturing system. Practically, processing planning and optimizing was efficiently supported and the property of universality, maintenance and expansibility were obtained in whole system.

Key words: laser manufacturing system; machining processes simulation; triangular mesh; simplification algorithm

引 言

激光制造技术是综合光、机、电、计算机为一体的高新技术，属于 21 世纪先进制造系统。具有框架式机器人结构的集成化智能激光加工和柔性制造系统是基于光电一体化和计算机集成制造系统(CIMS)的概念由中国科学院力学所提出并实现的[1]。工艺规划和优化是整个激光制造中的关键步骤。而加工过程仿真可为激光制造系统中提供完备的仿真环境、加工过程轨迹验证、加工效果预测、工艺参数验证等重要功能环节，对提高系统运行效率、消除工艺设计缺陷提供支持，为激光制造向集成化、智能化方向发展奠定基础。

目前，传统机械加工仿真技术在国内外都有广泛的报道，已成为 CAD / CAM 技术研究的热点[2-4]；Pro/Engineer、I-DEAS 等大型商用 CAD 软件也具有相应的加工仿真模块。而激光制造有别于传统制造，主要表现在激光制造的工艺方法方面，是一种非接触、无污染、低噪声的绿色制造。针对激光制造系统的虚拟仿真技术，文献[5]首先做了探索性的研究，但仍存在以下问题：①使用商业化 IGRIP 软件，开放性、可扩展性有限；②软件独立性差(软件只能在配有相关硬件的条件下使用)，难于在不同的系统之间移植。

针对以上问题，本文进一步研究和探索其中的一些关键技术，提出一种基于 VC 编程环境和 OpenGL 图形函数库实现激光加工过程仿真的方法，各加工过程仿真功能采用模块化设计，便于系统功能维护和扩展。

1 集成激光制造系统组成与建模

1.1 集成激光制造系统组成结构

集成激光制造系统主要由以下五个部分组成：全数控工业 Nd:YAG 激光器系统、柔性激光传输和整形二元光学变换系统、框架式五轴机器人系统、基于 PC 机的控制系统以及辅助系统[1]，系统组成如图 1 所示。

在制造过程中，为了适应不同的加工目的(如切割、打孔、强化等)，基于过程现场总线的激光器控制和基于开放式运动控制器的机器人控制系统方案，实现激光参数改变和机器人实时、准确的协调控制实现[6]。整个系统是以机器人系统为载体，由 X 轴、Y 轴、Z 轴构成其直角坐标系中的三维运动，另外可绕 A 轴旋转、C 轴摆动。系统加工范围为 3000mm×2000mm×900mm，旋转为 370 度，摆动为±120 度可满足大型模具的加工处理要求。

通过对系统的组成结构分析，框架式机器人系统作为整个集成激光制造系统的载体，在几何结构上具有如下结构特点：

① 系统由相对比较独立的模块构成，各模块之间具有层次性装配关系；

② 激光制造过程中，系统中各模块装配拓扑关系不变；

③ 激光头位姿随框架机器人做复合运动，为保证加工质量应尽量保证激光头垂直于待加工面；

收稿日期：2008-01-25 **修回日期：**2008-03-24
基金项目：中国科学院仪器研制项目 (Y2003004)
作者简介：钟雷(1983-)，男，四川中江人，硕士，研究方向为激光智能制造中的 CAD\CAM；**虞钢**(1958-)，男，上海人，博士，研究员，研究方向为激光智能制造及相关工艺力学；**王建伦**(1975-)，山东莱芜人，博士，研究方向为激光制造中逆向工程及工艺优化；**王恒海**(1982-)，山东即墨人，博士，研究方向为激光智能制造及控制工程。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

④ 与传统加工方式不同，激光加工不存在铣、刨、车、镗、磨等诸多工艺类型，激光制造具有单一的工艺方法，即激光与材料的相互作用。针对切割、打孔、强化等不同的加工方式，激光加工可以通过适当地调节激光工艺参数(如激光功率、光斑大小、离焦量等)来实现，因此在制造过程中无需更换加工头等辅助运动。

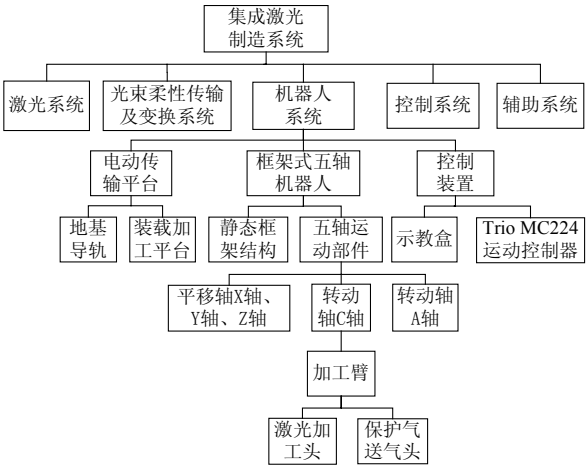

图 1　集成激光制造系统组成示意图

1.2 机器人系统建模

机器人系统建模包括几何建模和运动学建模。对于几何建模，针对加工过程中激光加工机器人系统的结构特点，采用分层结构并使用 CAD 法[7]，生成机器人框架、静态部件和五轴运动部件等组件的三维几何模型，并将这些几何模型通过位置和运动关系装配成机器人；运动学建模的任务就是通过对静态实体模型增加其动态特性，实现几何模型在动态参数和任意输入变量在一定条件下的动态响应，如表 1 所示。

表 1　部分部件结点关系与属性

名称	代号	父节点	节点属性	运动描述
机器人	Robot	Root	固定	Static
框架	Frame	Robot	固定部件	Static
X 轴	X	Frame	X 向平移运动	Trans(X)
Y 轴	Y	Frame	Y 向平移运动	Trans(Y)
Z 轴	Z	Frame	Z 向平移运动	Trans(Z)
A 轴	A	Z	A 轴转动	Rotate(A)
C 轴	C	A	C 轴转动	Rotate(C)
激光头	LaserHead	C	固定部件	Static
保护气头	GasHead	C	固定部件	Static

1.3 激光加工工艺力学建模

集成化激光制造系统是由计算机控制系统在同一框架式机器人平台下实现对不同种类的加工方式(切割、焊接、表面处理等)的一种自动化系统。加工件宏、细、微观质量缺陷与激光制造过程中的热-力学机制密切相关，激光制造过程具有时变、多场、多尺度、多参数的特点。其中，时变是指典型的激光制造过程中，成形零件与外界发生质量和能量交换，是一个包含时变边界、时变质量的时变力学问题，在不同时刻系统的边界由不同的质点组成，并伴有能量的流入和流出，以及非定常传热而产生的热应力和变形；多场是指激光制造涉及激光能量场、气/粉两相流场、熔池流场等多场耦合作用，并引发温度场、应力场和变形场，这些物理场在时域和空域上既相互耦联又各自独立，其作用机制非常复杂；多尺度是指既包含激光-粉末-熔池体系的细观作用，也包括微观组织演化及裂纹和缺陷形成的微观力学机制，而对熔池形态、温度场、应力场、变形场的表征则属于宏观力学范畴；多参数是指激光制造过程是多参数共同控制的结果，包括激光功率，光强分布，保护气/粉末流速，机器人速度，材料热物理性能，路径规划等众多参数都会影响制造质量。对具有上述特点的复杂系统难以进行准确的表征，以解决工程实际问题为目标，可以将模型中的本征物理参数与工程参数建立关联即提取特征量，使用神经网络来建立工艺力学模型[5]。

2　仿真实现的关键技术

2.1 运动学逆解

对五轴框架式机器人系统来说，在机器人加工路径规划中加工件表面上待加工点的机器人腕部的位姿，即加工路径上每一点的位置坐标与法矢量 (X,Y,Z,A_x,A_y,A_z)。与数控系统仿真环境[8]不同，在激光实际加工控制以及仿真过程中，机器人运动是靠五参数坐标进行驱动。五参数坐标的含义为：(x,y,z) 是法兰盘中心的坐标，θ_A、θ_C 则分别为 A 轴和 C 轴的转角 $(-120^\circ \le \theta_A \le 120^\circ, -90^\circ \le \theta_C \le 90^\circ)$。这里两类坐标中的空间位置坐标都是机器人的基本空间直角坐标。故六参数需转化为五参数坐标，运动学关系矩阵记为 $\boldsymbol{T}_6$：

$$\boldsymbol{T}_6 = \mathrm{Trans}(x,0,0)\cdot\mathrm{Trans}(0,y,0)\cdot\mathrm{Trans}(0,0,z)\cdot \mathrm{Rot}(z,\theta_A)\cdot\mathrm{Trans}(y,-L)\cdot\mathrm{Rot}(y,\theta_C)\cdot\mathrm{Rot}(y,180^\circ) \tag{1}$$

则五维关节值为：

$$\begin{aligned}
&\theta_A = \arctan(A_x / A_y) \ \text{ or } \ \theta_A = \arctan(A_x / A_y) \pm 180^\circ \\
&\theta_C = \pm\arctan(-\sqrt{A_x^2 + A_y^2} / A_z) \\
&x = X - L\cdot\sin\theta_A - A_x\cdot T \\
&y = Y - L\mathrm{g}\cos\theta_A - A_y\cdot T \\
&z = Z - A_z\cdot T
\end{aligned} \tag{2}$$

其中，L 为机器人腕部手臂长度，T 为加工工具头的长度。注意到式(2)中 θ_A 的取值范围为 $[-120^\circ, 120^\circ]$，所以实际可能的解最多有两组，具体转化时应根据轨迹连续及光滑性的要求取解，由轨迹点的上一点坐标来进一步确定。

2.2 基于碰撞检测的三角网格简化算法

三维物体表面重建广泛采用三角网格方法，本系统也采用此方法。密集的数据采样可重建出精确的三维表面，但是庞大的数据量不利于多分辨率三维实时显示和三维物体网络传输。基于上述考虑，三角网格简化问题得到了广泛的研究，并发展出了很多相应的算法，文献[9]对现有的一些三角网格简化算进行了归纳总结。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

针对加工过程仿真干涉检测的特点以及实时显示的需要，本文设计了一种基于网格覆盖，误差控制及加工头尺寸效应的三角网格简化算法。其中，加工头效应原理如下：设加工头的特征尺寸为 d_t，三角网格三边的边长分别为 L_1, L_2, L_3，如果满足：$L_i < d_t, i = 1,2,3$，且三角网格投影域内没有高出三角网格面的顶点，则从干涉检测的角度而言，该三角网格已没有必要再加以细分。

设定所需的三个指标：点到三角网格面的最大距离指标 $D_{\max}$；点到三角网格面的最小距离指标 $D_{\min}$；加工头特征尺寸 D_t。具体算法描述如下：

Step1. 构造初始的三角面片覆盖 T_c 和初始点集 V_c：首先将三角网格投影到水平面上，搜索投影面所得轮廓多边形的各个顶点，并确定它们所对应的三角网格顶点,记这些网格顶点为 $v_1, v_2, ... v_n$；取任一三角网格顶点中投影点位于上述投影域中部的某点 v_m，分别连接该点与 $v_1, v_2, ... v_n$，然后顺次(顺时针或逆时针)连接 $v_1, v_2, ... v_n$，从而构成一初始的三角网格覆盖 T_c，$v_m, v_1, v_2, ... v_n \in V_c$。

Step2. 对三角网格覆盖 T_c 中的某个三角网格 $t_i \in T_c$，判断是否有某些顶点的投影落入 t_i 的投影域内。如果没有，直接返回，执行对 T_c 中其它三角网格的判断；如果有，找到这些顶点中与 t_i 距离最大的点，记为 $p_{\max}$，相应的最大距离记为 $d_{\max}$。类似的找到与 t_i 距离最小的点 $p_{\min}$，相应的最小距离记为 $d_{\min}$。另外以 L_1, L_2, L_3 分别标记 t_i 的三条边的边长。然后做如下的判断：当 $|d_{\max}| < D_{\max}$，且 $|d_{\min}| < D_{\min}$ 时，返回，执行对 T_c 中其它三角网格的判断；当 $|d_{\max}| < D_{\max}$，且 $L_i < D_t, i = 1,2,3$ 时，返回，执行对 T_c 中其它三角网格的判断；对于其他情形，将该顶点添加到顶点集 V_c。

Step3. 对初始三角面片覆盖中的每个三角面片执行第 2 步，从而得到一新的顶点集 V_c，对 V_c 进行三角剖分，得新的三角网格覆盖 T_c。

Step4. 对顶点集 V_c 和三角面片覆盖 T_c 重复第 2 步和第 3 步。

Step5. 当顶点集 V_c 不再发生变化时，终止。此时经三角剖分所得的三角面片集 T_c 即为所求的三角网格。用 N_v 表示此时 V_c 中的顶点个数，N_t 表示 T_c 的三角网格个数。

最后，对一个包含 900 个顶点，1781 个三角网格的复杂曲面使用本文提出的基于碰撞检测的三角网格简化算法，在 5 组不同的参数设定下简化结果如表 2 所示，其中 N_v 表示简化后顶点个数，N_t 表示简化后三角网格个数。结果表明，该算法有效减少碰撞检测三角网格的冗余度。

表 2 简化结果比较

	$D_{\max}$/mm	$D_{\min}$/mm	D_t/mm	N_v	N_t
1	0.02	0.05	2	307	573
2	0.05	0.05	2	211	289
3	0.05	0.05	5	145	253
4	0.1	0.1	1	124	157
5	0.1	0.1	5	83	139

2.3 仿真系统的模块化设计

集成激光制造系统加工过程仿真主要的功能是工艺方案的验证，它所要实现的内容可概括如下：模型描述的规范及处理；仿真试验的执行与控制；数据与结果的分析、显示及文档化；对模型、试验程序、数据、图形和知识存储、检索与管理。

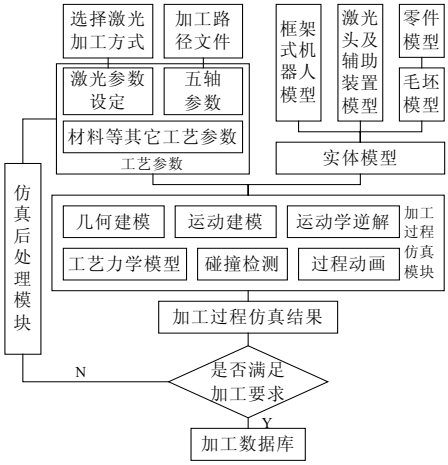

图 2 系统总体结构流程图

针对上述内容，本仿真系统分如下模块分别加以实现：框架式机器人模型、激光头及辅助装置模块、零件模型、毛坯模型、工艺力学模型、碰撞检测模块、运动学逆解模块、仿真后处理模块等。这些模型和模块在激光加工轨迹的驱动下相互协同工作，完成加工过程。根据虚拟制造对虚拟加工环境的需求，开发研制了如图 2 所示结构的计算机模拟系统。系统以 VC 开发环境为支撑，利用工程数据库信息共享方式进行系统集成，三维图形绘制采用 OpenGL 接口技术，其虚拟加工环境操作界面见图 3。

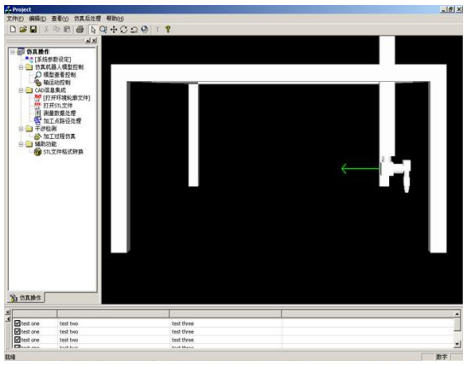

图3 仿真系统的程序主界面

3 加工仿真应用实例

以自由曲面激光强化为例给出该模拟系统运行实例，其加工过程图形化动态显示如图 4 所示。设定一组样本特征参数如下：光斑尺寸为 0.36mm^2，激光功率为 1800W，激光脉宽 70ms，偏转角度 15°，工艺力学模型预测输出与检验样本值对比如表 3 所示。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

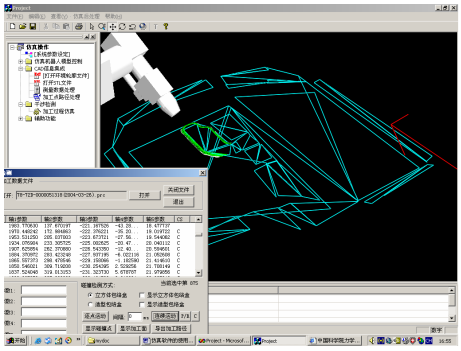

图 4　加工过程仿真显示

表 3　检验样本与工艺力学模型预测值对比

	表面硬度/HV	相对耐磨性	硬化层深度/μm	表面光洁度/Ra
样本数据	742	2.6	462	1.7
模型预测	700	2.3	450	1.76

4　结论

本文针对集成激光制造系统的结构组成特点及动态特性进行建模，并使用 VC 编程开发环境和 OpenGL 图形函数库建立了具有通用性、易维护性和可扩展性的计算机模拟系统。特别讨论了以下几项激光加工过程仿真的关键技术：对激光加工机器人进行运动学分析，并求出了运动学逆解表达式；针对碰撞检测，提出一种基于加工头效应的三角网格简化算法；在功能分析的基础上设计和建立了系统的模块化结构。该仿真系统为激光制造图形仿真系统建立了基本结构和仿真环境，为进一步开发和研究提供了基础。

参考文献：

[1] 虞钢, 虞和济. 集成化激光智能加工工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 296-346.

[2] Girishbabu Parakkal, Rixin Zhu, *et al.* Modeling of turning process cutting forces for grooved tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture (S0890-6955), 2002, 42(2): 179-191.

[3] Won-Soo Yun, Jeong Hoon Ko, *et al.* Development of a virtual machining system, part 2: prediction and analysis of a machined surface error [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture (S0890-6955), 2002, 42(15): 1607-1615.

[4] 陈修龙, 赵永生. 虚拟轴机床数控加工过程的计算机模拟[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(3): 541-545. (Chen Xiu-long, Zhao Yong-sheng. The Simulation of Numeric Control Milling Process on Virtual Axis Machine Tool [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2004, 16(3): 541-545.)

[5] 张桃红, 虞钢. 虚拟激光柔性加工的完整过程仿真模型研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(7): 574-577.

[6] 虞钢, 张桃红. 一种激光制造系统及激光器数字化控制方法[P]. 中国专利, ZL200510074813.6, 2006-12-06.

[7] 朱名铨, 张树生, 等. 虚拟制造系统与实现[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001: 185-208.

[8] 田树军, 刘万辉, 张宏, 等. 基于 VR 的三维数控加工环境及其关键技术研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(16): 3727-3730. (TIAN Shu-jun, LIU Wan-hui, ZHANG Hong, JIA Chun-qian. Research of VR—based 3D NC Machining Environment and Key Technology [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(16): 3727-3730.)

[9] 马小虎, 潘志庚, 石教英. 基于三角形移去准则的多面体模型简化方法[J]. 计算机学报, 1998, 21(6): 492-498.

(上接第 4535 页)

件以及弹塑性板响应过程等进行了分析，可以得出：

1) 通过合理的参数设置，MSC.Dytran 能够较好地模拟弹塑性边界条件下的水下爆炸气泡运动，并可推广到更复杂的结构边界条件，为解决此类流固耦合问题提供了有效的数值仿真预报手段。

2) 通过确定无量纲参数 n 值的大小，可以较好判别结构边界对气泡运动的影响程度。对于水平弹塑性边界条件，当 $n \geq 2$ 时，气泡受边界影响较小，可按球形气泡模型处理；当 $n < 2$ 时，气泡受边界影响较大，无法充分膨胀，气泡顶端呈椭球形。

3) 受水平弹塑性边界影响的爆炸气泡，会出现环形溃灭，同时在弹性边界和溃灭气泡之间出现明显的锥形空化区域，当气泡溃灭后，空化区域凹陷回缩，形成向上的冲击射流作用于弹性边界。通过高速摄影拍摄到的水下爆炸气泡运动图片，也证实了该现象的存在。

4) 弹塑性板会随着气泡的膨胀、收缩而出现向上、向下的弯曲运动，在气泡收缩阶段，弹性板会出现明显的低频振动。

参考文献：

[1] 方斌, 朱锡, 陈细弟, 等. 水平刚性面下方水下爆炸气泡垂向运动的理论研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4): 345-350.

[2] Kendall S Hunter. Global-shape-function models of an underwater explosion bubble [D]. Colorado, USA: University of Colorado, 2001.

[3] Chahine G L, Kalumuck K M, Hsiao C T. Simulation of Surface Piercing Body Coupled Response to Underwater Bubble Dynamics utilizing 3DYNAFS, a three-dimensional BEM code [J]. Computational Mechanics (S1007-0466), 2003, 32: 319-326.

[4] Klaseboer E, Khoo B C, Hung K C. Dynamics of an oscillating bubble near a floating structure [J]. Journal of Fluids and Structures (S0889-9746), 2005, 21: 395-412.

[5] 张馨, 王善, 陈振勇, 等. 水下接触爆炸作用下加筋板的动态响应[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 257-260. (Zhang Xin, Wang Shan, Chen Zhengyong, *et al.* Research on Dynamic Responses of Stiffened-plate under Underwater Osculatory Explosion [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(2): 257-260.)

[6] 张阿漫. 水下爆炸气泡三维动态特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.

[7] 张振华, 朱锡, 白雪飞. 水下爆炸冲击波的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 182-188.

[8] 朱锡, 牟金垒, 洪江波, 等. 水下爆炸气泡脉动特性的试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(4): 365-368.

[9] Chahine G L, Kalumuck K M. The influence of structural deformation on water jet impaction loading [J]. Journal of Fluids and Structures (S0889-9746), 1998, 12: 103-121.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net