

基于光学定位的三维超声引导肌肉注射仪设计研究

姜鑫玉, 王贝琪, 莫伟平*, 刘寅淳, 刘镇铭, 王心仪

(东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要: **目的** 解决光学定位技术在引入肌肉痉挛治疗的注射手术应用中, 光学定位设备与现有医用超声仪器之间的不匹配问题, 旨在进一步提升理论定位精度稳定性, 简化必需操作并降低实际应用难度。**方法** 在现有超声仪及相关设备功能基础上, 结合光学定位设备工作条件需求进行需求分析, 重新构建产品元件功能流模型并映射为网络节点, 并基于复杂网络节点重要度评价方法, 确定目标产品设计重心点并分层设计, 最后采用仿真验证测试设计合理性。**结果** 实验结果符合预期假设, 目标节点所对应功能元件与其它节点的相关性程度与目标元件所需兼容连接的复杂度呈正相关。基于实验得出能够适配光学定位仪与超声设备的设计方案, 有效解决二维超声导航引导肌肉注射所面临的不直观、不可视等问题。**结论** 基于复杂网络节点的重要度评价方法更适用于复杂功能产品的设计研究, 评价结果重要度差异更为显著。

关键词: 光学定位; 肌肉注射; 三维超声引导; 复杂网络节点; 医疗产品设计

中图分类号: TB427 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)10-0023-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.10.003

Design of Three-dimensional Ultrasound-guided Intramuscular Injection Instrument Based on Optical Positioning

JIANG Xinyu, WANG Beiqi, MO Weiping*, LIU Yanchun, LIU Zhenming, WANG Xinyi

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

ABSTRACT: To solve the mismatch between optical positioning equipment and existing medical ultrasound instrument in the application of injection surgery with the introduction of optical positioning technology in muscle spasm therapy, the work aims to further improve the stability of theoretical positioning accuracy, simplify the necessary operation, and reduce the difficulty of practical application. Based on the functions of the existing ultrasound instrument and related equipment and combined with the requirements of optical positioning equipment working conditions, the demand analysis was carried out and the functional flow model of product components was reconstructed and mapped to network nodes. At the same time, based on the importance evaluation method of complex network nodes, the design center of the target product was determined and designed in layers. Finally, the rationality of the test design was verified by simulation. The experimental results were in line with the expected hypothesis, and the correlation between the functional element corresponding to the target node and other nodes was correlated with the complexity of compatible connections required by the target element. On the basis of experiments, a design scheme that could adapt to optical locator and ultrasound equipment was obtained, which effectively solved the problems of nonintuitive and invisible intramuscular injection guided by two-dimensional ultrasound navigation. The importance evaluation method based on complex network nodes is more suitable for the design and research of complex functional products, and the importance difference of evaluation results is more significant.

KEY WORDS: optical positioning; intramuscular injection; 3D ultrasound-guided; complex network nodes; medical product design

收稿日期: 2023-08-13

基金项目: 上海市教委教育科学基金资助项目 (C202400911); 东华大学美育精品课程资助项目

*通信作者

肌肉痉挛是指肌肉不自主的运动过度现象,易并发于中枢神经系统受到损伤的患者。目前,常用的有效治疗措施为借助二维超声图像对患部肌肉注射肉毒毒素^[1],然而二维超声成像过程中仍面临着注射目标不可视、注射引导不直观等问题^[2]。

本文将基于光学定位系统的标定原理,以目前广泛使用加拿大NDI公司生产的Polaris光学定位系统作为研究基础^[3],结合现有超声成像导航设备在实际需求,以肌肉注射手术为应用研究对象,通过需求分析与功能建模构成目标产品的功能流元件节点网络,采用基于多属性决策的复杂网络节点重要度评价方法,提炼功能元件作为设计工作重心,将产品整体功能与需求转换为模块结构问题,并进一步对基于光学定位的三维超声肌肉注射仪进行结构整合与设计优化。

1 产品功能网络构建

1.1 光学定位系统工作条件与特征

NDI公司的Polaris光学定位系主要涉及如下基本装置或设备:用于注射的医用注射器;一台装配有手持二维线阵探头的便携超声扫描仪;光学定位设备,包括一个红外光学位置传感器及两个定位刚体(带标记球);一台置有图像采集卡的数据处理设备,包括一台电脑主机与2~3个显示屏用于输出位置图像信息^[2],系统的使用演示场景见图1。

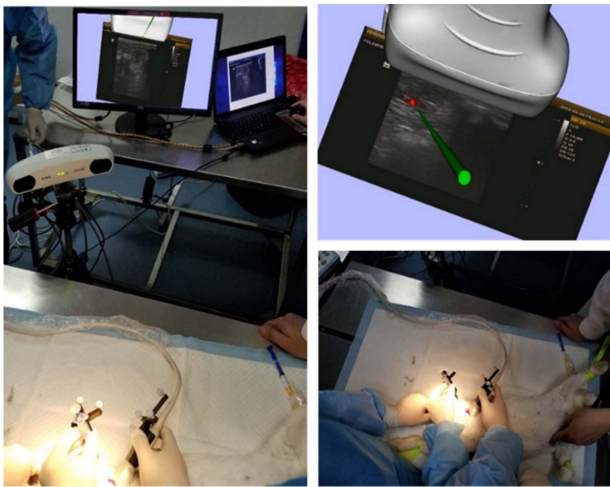


图 1 三维超声导航系统的使用演示
Fig.1 Demonstration of 3D ultrasound navigation system

红外光学位置传感器能够将超声探头的空间位置信息进行收集并传输至计算机主机,由转换算法求得二维超声图像所在平面的空间位置坐标^[4-5],从而与图像信息一起进行处理,呈现出三维立体影像,该光学定位系统具有如下使用特征与条件:位置传感器与手术区域之间避免有包括医务人员在内的任何遮挡;能够有效连接固定传感器与显示设备,且各需有一定的调节空间;医生能够同时观察到三维图像与患者情况;主要手术器械应安装相应定位刚体^[6];安装定位刚体

的手术器械保持在光学传感器的最大覆盖探测范围内。

1.2 功能模块元件分解

超声引导肌肉注射仪自身具备多重功能模块,在其模块内元件的形态与结构呈多样化的同时,本研究待引入的光学定位系统又涉及多种输入输出设备元件的连接,进一步提升了目标产品设计的复杂性。为了划清产品模块间的界限,将不同模块有效地整合为产品整体,采用能够描述产品装配顺序的反向鱼骨图法进行初步分析^[7]。通过对各模块零部件进行拆解,确定现有产品的基本组成模块与基本支持功能。

根据产品的装配与拆卸关系建立目标产品的反向鱼骨图。将整体产品划分为光学定位、超声成像、注射导航、肢体固定、箱体承载等5个模块,并以功能的主要输入输出连接端为依据,挑选主要功能元件,进一步划分为22个功能元件,见表1。

表 1 功能模块元件及其功能类型
Tab.1 Functional module elements and their functional types

功能模块	具体元件	功能类型
光学定位模块	红外光学传感器	连接
	定位刚体	连接
	被动标记球	输入
	定位显示屏	输出
超声成像模块	二维超声探头	输入
	超声成像屏	输出
	超声处理器	连接
	超声控制界面	输入
注射导航模块	计算机主机	连接
	导航屏幕	输出
	注射针	输入
	交互面板	输入
	图像采集卡	连接
	旋转支臂	连接
	导轨	连接
肢体固定模块	上肢固定架	输入
	下肢固定架	输入
	躯体固定架	输入
箱体承载模块	置物台面	连接
	底座转轮	输入
	箱体	连接
	推车扶手	输入

1.3 功能流网络建模

根据TRIZ的基本功能定律概念,通过功能符号进行产品模块的具体功能分析。本研究对象目标产品的主要功能传递,根据产品功能元件的输入输出功能类型,确定各功能元件之间的作用关系^[8],建立整体产品功能,见图2。

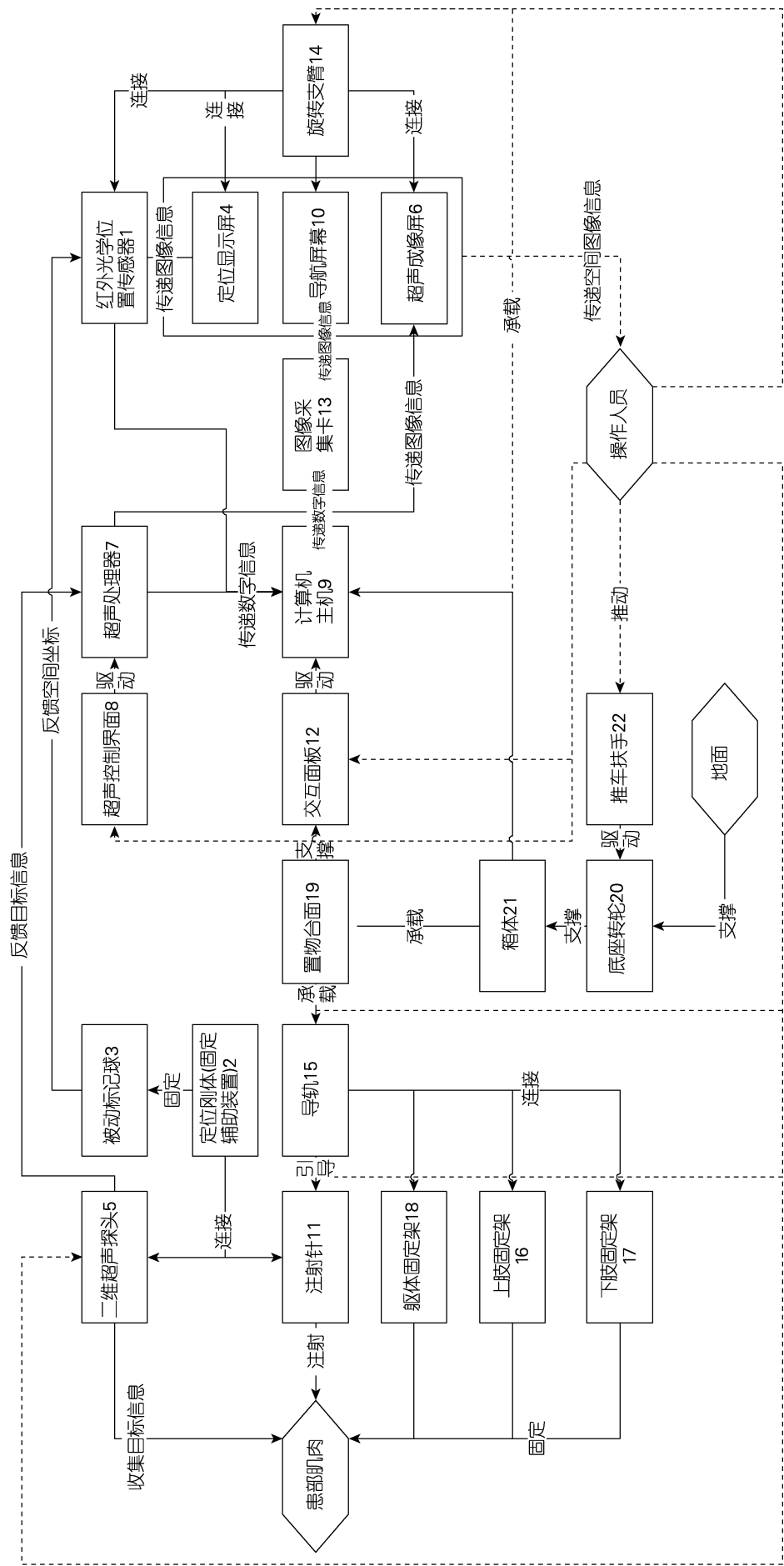


图 2 功能流网络建模
Fig.2 Functional flow network modeling

以红外光学位置传感器为例进行说明,该传感器受到可旋转支臂的支撑功能作用,同时又接收来自定位刚体上的被动标记球发出的光线信息,并将光线处理后将位置信息传递给计算机主机,因此是两个单向作用箭头的终点,同时也是一条指向计算机主机的单向作用箭头的起点。

整个系统架构于地面提供的支持作用,操作人员、患部肌肉与地面这三者将构成整体系统的输入端、输出端与场景环境,不参与整个功能网络的构成。各功能元件之间均简化为单向作用关系。

2 节点网络映射与重要度评价

2.1 节点网络映射

由于目标产品作为研究对象涉及多个模块与元件之间的功能作用关系,具有客观复杂性,依据其功能流建立的功能模型具有网络状结构特征,实际上构成了小型复杂网络。为了进一步梳理产品的功能元件关系,研究选用理论体系已趋完善的复杂网络节点重要度评价法^[9]。首先将已建立的功能流模型中的功能元件映射为复杂网络节点,同时由于产品仅存在单一的输入与输出端,其元件间作用关系的方向性参考价值较小,为简化后续处理与分析,删除输入输出节点,并选择将单向作用关系映射为各节点之间的无向边,见图 3。

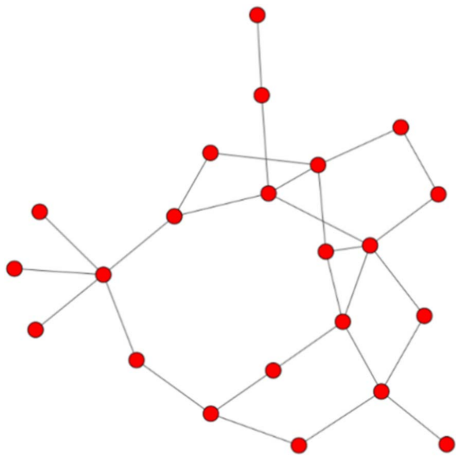


图 3 由 Python 生成的网络节点映射图
Fig.3 Network node map generated by Python

2.2 指标权重赋予

根据于会等^[10]提出的基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法,可基于实际应用情境自行选适用的评价指标。本次重要性评估将重点着眼于部分节点之间的连接数量与连接质量,节点之间整体流通性的权重比例相应进行降低并作为适度参考。选用度中心性 (Degree Centrality, C_D)、接近中心性 (Closeness Centrality, C_C)、介数中心性 (Betweenness

Centrality, C_B)与特征向量中心性 (Evcnt Centrality, C_E) 这 4 个评价指标进行^[11]。

通过层次分析法对以上评价指标分别确立权重,由 1~9 标度对每个指标之间进行重要度比较后,建立比较矩阵如表 2。其中,数字 1 表示两者同等重要,数字 2~9 逐级表示前者比后者更为重要的强烈程度。该矩阵的构建基于以下因素考虑:度中心性作为衡量节点连接数量最直接的指标,能够反映目标节点所对应的功能元件与其他节点相关性的程度,与目标元件所需满足的兼容连接的复杂度呈明显正相关,在设计过程中需优先考虑该节点的设计以保证其他元件的有效连接。特征向量中心在性能够兼顾连接数目的同时,给予具有高重要度邻居的节点更高的权重,对以度中心性为主的评价结果进行一定程度的修正,使设计目标的复杂度集中于起主要关键作用的元件而非边缘零部件。因此赋予这两个指标相对更高的权重。

表 2 重要性指标的比较值 Tab.2 Value of comparison for importance indicators				
比较矩阵 B	C_D	C_C	C_B	C_E
C_D	1	7	3	3
C_C	1/7	1	1/5	1/4
C_B	1/3	5	1	1/3
C_E	1/3	4	3	1

对比较矩阵进行规范化处理得到判断矩阵,经计算, $I_C=0.081\ 8$; $R_C=0.091\ 9$, 本矩阵满足一致性检验要求。对应的权重结果见表 3。

表 3 各指标对应权重 Tab.3 Corresponding weight of each indicator				
指标	C_D	C_C	C_B	C_E
对应权重	0.514 6	0.053 4	0.162 8	0.269 2

2.3 节点重要度评价

由 Python 函数,计算生成该网络的相关指标结果,并构建加权规范化决策矩阵,见表 4。

由 AHP 生成权重得到加权规范化矩阵,其中正理想节点 $A+$ 为 {0.514 6,0.053 4,0.162 8,0.269 2}; 负理想节点 $A-$ 为 {0.102 9, 0.030 4, 0.000 0, 0.020 2}。经计算得到每个节点 A_i 到正理想节点 $A+$ 和负理想节点 $A-$ 的距离分别为 $D+i$, $D-I$, 以及每个节点到正理想节点的贴近度 Z_i , 结果见表 5。

由表 5 可见,在以上 22 个由功能元件映射构成的网络节点中,编号为 14、21、1、15 的节点占据了网络中更为重要的位置,所对应的功能元件分别为:旋转支臂、箱体、红外光学传感器、注射导轨。合理的解释为:可旋转支臂不仅需要用于支撑红外光学定位仪这一最重要的信息处理节点,同时也需要固定和

表 4 加权规范化决策矩阵
Tab.4 Weighted normalized decision matrix

编号	C_D	C_C	C_B	C_E
1	0.415 5	0.047 0	0.156 4	0.122 2
2	0.311 6	0.040 5	0.113 4	0.032 3
3	0.207 8	0.041 7	0.048 9	0.048 1
4	0.311 6	0.044 6	0.057 4	0.116 3
5	0.207 8	0.037 6	0.054 7	0.034 5
6	0.207 8	0.041 7	0.037 2	0.071 0
7	0.415 5	0.041 1	0.131 0	0.078 5
8	0.103 9	0.031 3	0.000 0	0.024 4
9	0.415 5	0.046 1	0.108 2	0.101 8
10	0.207 8	0.039 2	0.021 5	0.062 5
11	0.207 8	0.040 5	0.107 5	0.021 3
12	0.207 8	0.041 1	0.030 0	0.050 6
13	0.207 8	0.036 1	0.007 8	0.051 1
14	0.519 4	0.051 6	0.229 4	0.149 7
15	0.519 4	0.044 6	0.275 7	0.036 0
16	0.103 9	0.033 3	0.000 0	0.011 2
17	0.103 9	0.033 3	0.000 0	0.011 2
18	0.103 9	0.033 3	0.000 0	0.011 2
19	0.311 6	0.047 7	0.211 8	0.060 9
20	0.207 8	0.038 7	0.078 2	0.037 5
21	0.415 5	0.052 6	0.278 3	0.108 9
22	0.103 9	0.029 9	0.000 0	0.011 7

表 5 功能网络节点的多属性决策评价结果
Tab.5 Evaluation results of multi-attribute
decision-making for functional network nodes

方案距离	D^+	D^-	Z
1	0.134 737	0.379 261	0.737 865
2	0.310 435	0.219 836	0.414 573
3	0.383 207	0.126 304	0.247 893
4	0.250 497	0.281 833	0.529 433
5	0.394 448	0.115 891	0.227 086
6	0.367 934	0.150 909	0.290 858
7	0.185 903	0.340 533	0.646 866
8	0.497 189	0.023 811	0.045 703
9	0.167 238	0.355 139	0.679 852
10	0.377 709	0.139 105	0.269 159
11	0.398 481	0.122 443	0.235 05
12	0.385 111	0.126 697	0.247 548
13	0.389 954	0.125 725	0.243 806
14	0.028 613	0.499 995	0.945 871
15	0.204 544	0.444 641	0.684 922
16	0.508 318	0.003 433	0.006 708
17	0.508 318	0.003 433	0.006 708
18	0.508 318	0.003 433	0.006 708
19	0.263 47	0.256 671	0.493 464
20	0.3871 95	0.122 173	0.239 853
21	0.1263 87	0.391 072	0.755 754
22	0.5080 53	0	0

连接起主要信息输出功能的各个导航显示屏，因此是整个产品系统中最为关键的功能元件。导轨作为直接连接注射针与固定架等输出元件的节点，是实现最终注射功能的重要手段，因此也具有较高的重要性。该评价结果符合预期设想，与本设计目标具有一致性，将基于此优先度评价结果进行后续设计。

3 可旋转支臂设计与箱体整合

3.1 支臂终端空间分布关系

由上文所述的产品功能流建模网络图，光学定位传感器为光学定位系统中的独立元件之一，需要通过有线方式与本产品中的计算机主机之间进行信息传输，需具有一定程度的可调节性，以适应于作业区域的潜在位置变化。同时，显示屏作为本系统信息手机与处理后的主要输出端，通过三维图像呈现的方式，对于指示与引导手术进行具有十分重要的作用。

根据上文所述的光学定位系统工作条件与实际应用需求，将显示屏数量确定为 2 块。同时根据现有关于多屏布局研究所述，沿水平方向布置显示器可以提高用户工作效率。具体水平高度位置则应对最适宜水平倾斜角 α 进行探寻，并能够依据医务人员的个人情况与工作习惯进行一定程度的调整。整理后可对传感器与两块显示屏之间的空间分布关系方案，见图 4。

其中，图 4a、4d 方案在进一步考虑患者与医生身位时，与设备分布产生了冲突；4f 方案占用空间较大，且手术作业区域的分布不利于医生使用惯用手进行系统控制面板的操控。在 4b、4c 方案的选择中，虽然 4b 方案的空间占地更小，但 4c 方案更便于分化传感器与屏幕支臂的结构设计，有利于手术中设备角度的调整。因此，最终选用 4c 方案作为最优支臂空间分布方案，4f、4c 作为待选分布方案。

3.2 传感器支臂设计

根据传感器探测范围，其最小探测平面距离为 557 mm 最大探测平面距离为 1 222 mm。另根据 GB10000—1988《中国成年人人体尺寸》，一般成年人上臂长在 279~349 mm，前臂长在 206~268 mm。取百分位 90 的数据 586 mm 作为预期上肢全长，并以 1.5 倍数值作为期望作业区域。如图 5 所示，对于传感器，其连接支臂需保证 40.8°以上的可调节角度，以覆盖作业区域。因此，传感器连接支臂所需的转动轴角度较小，选择采用单轴向自由度支臂进行组合。即可控制传感器在侧视角空间内的位置，同时提供调节角度^[13]。

如图 6 所示，传感器支臂结构主要由上下 2 支单轴向自由度支臂的 3 根转动轴构成，底部的支臂与主转动轴连接，用于控制整体支臂在侧方位上的调整角度；上部的支臂通过一根可收缩的长转动轴与底部支臂相连接，用于调整支臂整体高度与角度；传感器则

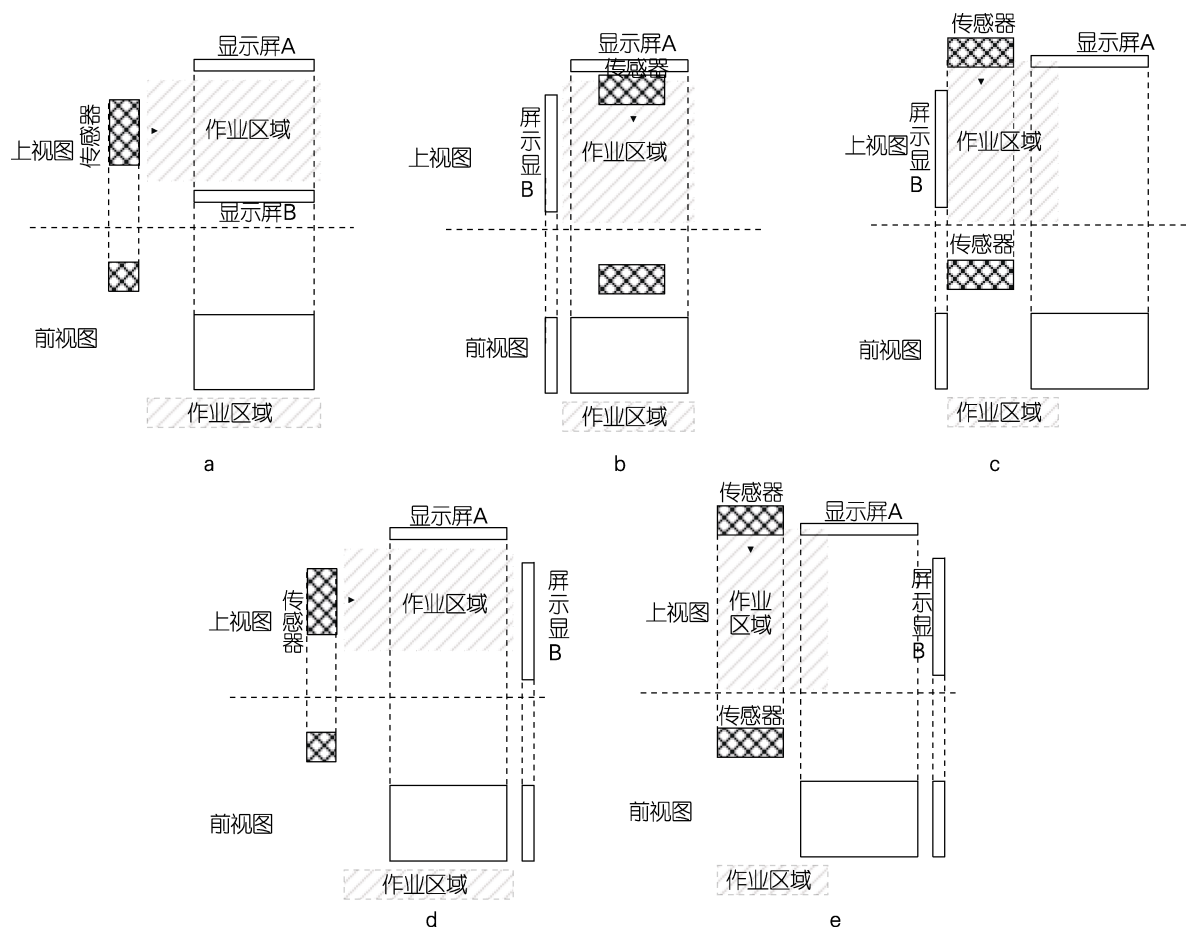


图 4 支臂位置布局方案
Fig.4 Arm position layout scheme

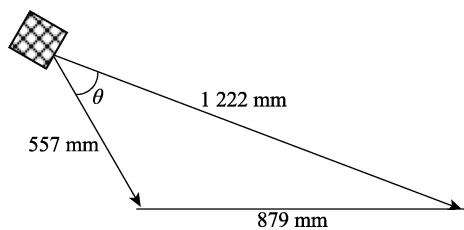


图 5 传感器探测范围计算示意
Fig.5 Schematic diagram of the calculation of the detection range of the sensor

通过可旋转结构将一支短转动轴与上部支臂相连接，用于保证其在三维空间下能够到达多种可调节角度下的特定位置。

3.3 显示屏支臂设计

根据对显示器倾斜角度对于头部舒适度影响的研究，当显示器中心在视水平线下方时，在顶端固定的情况下，舒适度随倾斜角从0~20°逐渐增大而递增^[14]。而关于视觉识别，当显示器的显示平面与人体坐姿的垂直平面成90°夹角时，所需的识别时间最短，工作效率与稳定性最高^[15]。即显示器的布局角度涉及复杂规划问题，应在实际工作场景下进行确定，因此对于显示器支臂设计，应尽可能保留灵活性，选择采用三向自由度支臂进行连接，如图7所示。

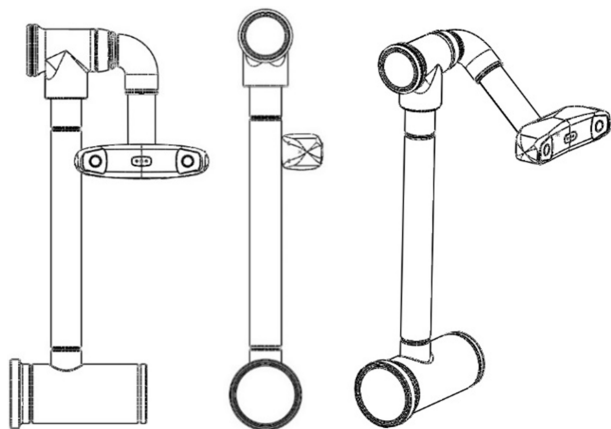


图 6 传感器支臂结构设计
Fig.6 Sensor arm structure design

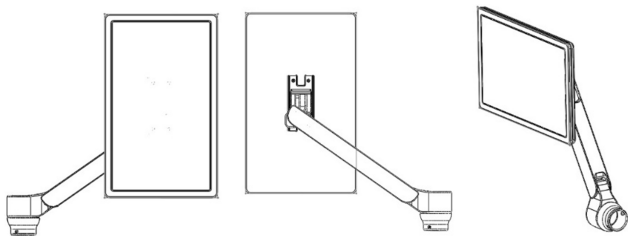


图 7 屏幕支臂结构设计
Fig.7 Screen arm structure design

3.4 箱体结构设计与整合

经过方案筛选与整合,由产品建模软件 Solidworks 进行三维模型细化,并将各个主要模块以装配体的形式进行连接装配,保留可移动结构的自由度。将整合后的模型调整至非作业状态,通过旋转主视角提取产品整体结构的六视图下的线框结构图模型,见图 8~9。

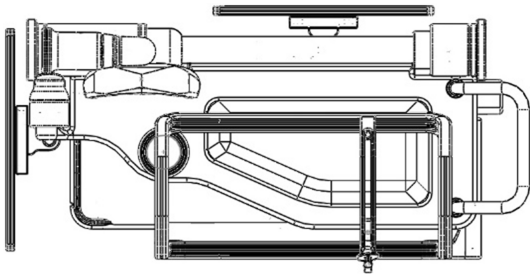


图 8 产品整体结构上视图
Fig.8 Top view of overall product structure

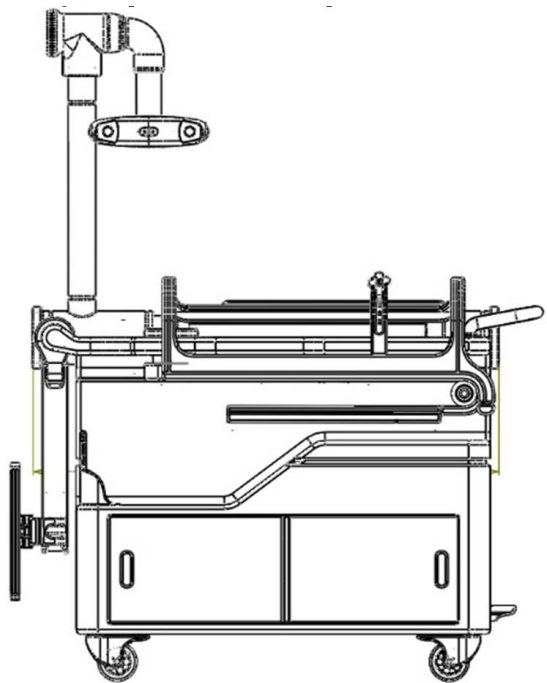


图 9 产品整体结构前视图
Fig.9 Front view of overall product structure

4 Jack 仿真验证

基于 Jack 软件内置的人体测量数据库,采用 GB10000——88 中国成年人 90 百分位人体尺寸作为试验标准对象构建虚拟人物,实验界面如图 10 所示,在标准场景下进行人物创建,并导入产品三维模型。将人物移动至产品展开状态下的预期站点点,将初始

人物设为默认站姿状态,通过虚拟人物控制中的“Vision Target”选项,以“Look at Target”功能建立视觉中心点,对其进行移动,使其与显示屏中心点重合,从而将人眼聚焦于显示屏中心。

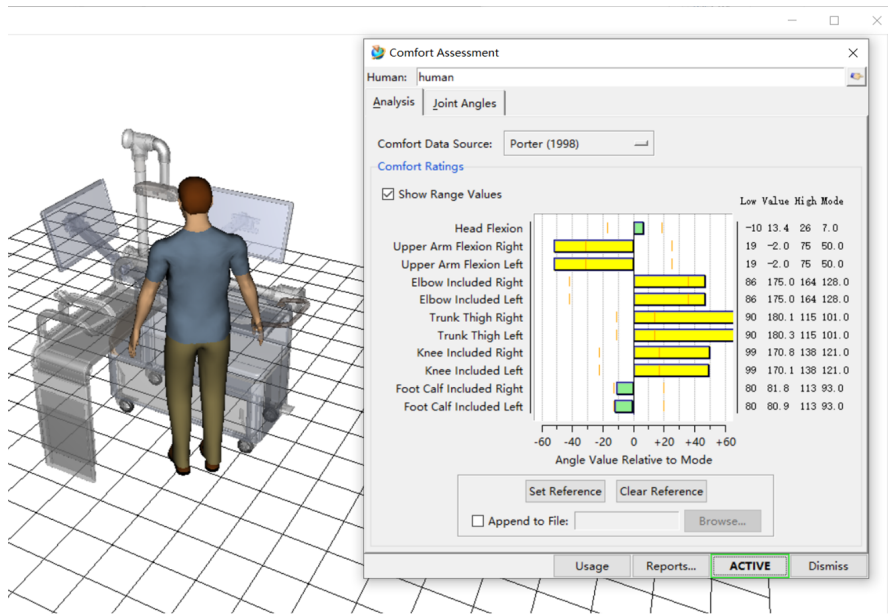


图 10 舒适度评估
Fig.10 Comfort assessment

首先控制显示器方位,将其调整至与水平面成 75°夹角,并保持其高度位置为 150 cm 不变,随后从 0°~90°以 15°为跨度变更人体工作方向,分别测试其在站姿不同朝向下观测两台显示屏 A、B 时,头部与颈部舒适度的变化。随后保持人体处于 45°角,分别

调整控制显示屏 A、B 的高度,测试其变化。由 Jack 中“Comfort Assessment”功能依据 Porter (1998 年)模型进行分析。如图 10 所示,该软件舒适度分析中,High 值和 Low 值为满足舒适度要求的区间端点值;Value 值表示在该位姿下计算得到的舒适度;Mode

值表示舒适度的标准值，当 Mode 值趋向 Low 值或 High 值时，舒适度变差。Angle Value Relative to Mode 表示计算值同标准值之间的差值，当差值越小时，其舒适度越好^[1]。

根据上述实验条件对屏幕观测舒适度进行测试，其结果见表 6~9。

表 6 不同朝向对显示屏 A 进行观测的舒适度评估
Tab.6 Comfort assessment of viewing display A in different orientations

朝向角度 $\alpha/(^{\circ})$	Low 值	High 值	Mode 值	Valve 值	差值
0	-10.0	26.0	7.0	6.4	0.6
15	-10.0	26.0	7.0	6.4	0.6
30	-10.0	26.0	7.0	6.4	0.6
45	-10.0	26.0	7.0	6.3	0.7
60	-10.0	26.0	7.0	6.3	0.7
75	-10.0	26.0	7.0	6.2	0.8
90	-10.0	26.0	7.0	6.2	0.8

表 7 不同朝向对显示屏 B 进行观测的舒适度评估
Tab.7 Comfort assessment of viewing display B in different orientations

朝向角度 $\alpha/(^{\circ})$	Low 值	High 值	Mode 值	Valve 值	差值
0	-10.0	26.0	7.0	5.1	1.9
15	-10.0	26.0	7.0	5.2	1.8
30	-10.0	26.0	7.0	5.3	1.7
45	-10.0	26.0	7.0	5.4	1.6
60	-10.0	26.0	7.0	5.5	1.5
75	-10.0	26.0	7.0	5.6	1.4
90	-10.0	26.0	7.0	5.6	1.4

表 8 45°朝向对下不同高度位置的
显示屏 A 进行观测舒适度
Tab.8 Comfort observation of display screen A at a downward angle of 45° at different heights

屏幕高度 h/cm	Low 值	High 值	Mode 值	Valve 值	差值
130	-10.0	26.0	7.0	12.8	5.8
140	-10.0	26.0	7.0	9.8	2.8
150	-10.0	26.0	7.0	6.3	0.7
160	-10.0	26.0	7.0	2.5	4.5
170	-10.0	26.0	7.0	0.1	6.9
180	-10.0	26.0	7.0	-0.9	7.9

表 9 45°朝向对下不同高度位置的
显示屏 B 进行观测舒适度
Tab.9 Comfort observation of display screen Vat a downward angle of 45° at different heights

屏幕高度 h/cm	Low 值	High 值	Mode 值	Valve 值	差值
130	-10.0	26.0	7.0	12.1	5.1
140	-10.0	26.0	7.0	9.0	2.0
150	-10.0	26.0	7.0	5.4	1.6
160	-10.0	26.0	7.0	1.5	5.5
170	-10.0	26.0	7.0	-0.4	7.4
180	-10.0	26.0	7.0	-1.4	8.4

可以看出，测试人物朝向发生变化时，随着与屏幕所在平面夹角的递增，对屏幕的观测舒适度逐渐降低，这一点与预期结果与常理相符。然而其舒适度差值变化程度较小，对显示屏 A 影响小于 0.2，对显示屏 B 影响小于 0.5，且差值整体偏小，显示屏 A 中差值不大于 0.8，显示屏 B 中差值不大于 1.9，即在当前高度配置下，整体的观测舒适度较高。可以说明该屏幕支臂结构在合适的特定高度下，对于医务人员在因作业内容而改变至不同朝向时，均能够有效输出与提供屏幕信息，并对减轻工作压力，尤其是头部与脖颈部位的疲劳程度具有帮助。

当屏幕高度从 130~180 cm 逐级递增时，Value 值迅速递减，跨度分别高达 13.7 与 13.5，同时差值变化呈现先递减后递增的趋势，拐点出现在 150~160 cm，对当前虚拟人物身高尺寸来说，最优屏幕配置位置均出现在 150 cm 处。由此可以说明屏幕高度位置对于观测舒适度的影响变化十分明显，并且对不同身高的操作人员，总能够从本产品的屏幕高度配置区间中，找到最佳的屏幕观测位置。

综上所述，可旋转支臂作为本产品中最高优先度的设计模块结构，能够有效进行信息输出，帮助减缓工作负担，并且不同身高或操作习惯的医务工作人员均能够适应该结构的尺寸配置区间。

5 结语

本文主要针对二维超声导航引导肌肉注射面临的不直观、不可视等问题，基于引入光学定位系统的三维超声引导理论基础，对光学定位系统在引入过程中产生的不匹配、设备零散不兼容等问题进行探讨。

首先深入解析三维超声成像与引导的原理，并对作为研究基础的光学定位系统的工作特性进行分析，明确了其在特定工作环境下需要满足的条件。随后在对主要操作人员需求及目标场景环境与群体进行分析后，整理得到目标产品的功能需求清单，由功能流建模与元件节点映射得到对应的功能节点网络图。通过复杂网络节点重要度评价法，计算得出在整体产品功能的架构过程中，用于连接屏幕与传感器的可旋转支臂为重要度最高的元件节点，依次分别为产品承载箱体、红外光学传感器与注射导轨。依据此重要度排序，确定产品结构设计的优先度顺序，并结合功能需求分析生成各结构模块设计方案，从中择优与细化。经过 Jack 虚拟仿真结果与主观评价，从方案集中确定最优配置方案。

本文的主要创新点在于从工业设计角度切入，结合多属性决策评价与复杂网络节点重要度评价方法，将产品整体功能与需求转换为模块结构问题，为最新的肌肉痉挛治疗方法提供有效技术支持与优化方案；对光学定位技术进一步应用于医疗超声诊断领域的研究有辅助作用，为基于光学定位系统的全自动超声

引导肌肉注射治疗提供可能;对其他涉及光学定位系统的医疗设备与场景设计具有参考价值。

参考文献:

- [1] BOULIAS C, ISMAIL F, PHADKE C P. Acute Neurophysiologic Effects of Botulinum Toxin Type a Intramuscular Injection on Extensor Digitorum Brevis Muscle in Healthy Adults[J]. *Toxicon: Official Journal of the International Society on Toxinology*, 2022, 211: 6-10.
- [2] 关以行, 刘景隆, 袁浩, 等. 基于空间定位的超声引导肌肉穿刺实验研究[J]. *黑龙江科学*, 2019, 10(14): 116-117.
GUAN Y X, LIU J L, YUAN H, et al. Experimental Study of Ultrasound Guided Muscle Puncture Based on Spatial Location[J]. *Heilongjiang Science*, 2019, 10(14): 116-117.
- [3] NINGTHOUJAM B, NINGTHOUJAM J S, NAMRAM R S, et al. Image and Ultrasonic Sensor Fusion for Object Size Detection[C]// 2019 Fifth International Conference on Image Information Processing (ICIIP). Shimla: IEEE, 2019: 137-140.
- [4] 任亮, 邱天爽, 郭勇. 一种基于光学定位的超声探头标定方法[J]. *中国生物医学工程学报*, 2013, 32(5): 526-531.
REN L, QIU T S, GUO Y. Ultrasound Probe Calibration Method Based on Optical Tracking Systems[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2013, 32(5): 526-531.
- [5] 陈华, 王栋, 曹彤, 等. 针对手术空间的医疗机器人参数优化[J]. *高技术通讯*, 2014, 24(3): 284-288.
CHEN H, WANG D, CAO T, et al. Parameter Optimization of Medical Robots According to the Surgery Space [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2014, 24(3): 284-288.
- [6] 郭晓杰, 林艳萍, 曾祥森, 等. 基于光学定位跟踪的自由臂三维超声精度标定的研究进展[J]. *上海交通大学学报(医学版)*, 2016, 36(10): 1522-1528.
GUO X J, LIN Y P, ZENG X S, et al. Research Progresses of Freehand 3D Ultrasound Calibration Based on Optical Tracking System[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University (Medical Science)*, 2016, 36(10): 1522-1528.
- [7] 檀润华, 苑彩云, 曹国忠, 等. 反向鱼骨图下的现有产品功能模型建立[J]. *工程设计学报*, 2003, 10(4): 197-201.
TAN R H, YUAN C Y, CAO G Z, et al. Function Model for Products Existed Using Reverse Fishbone[J]. *Journal of Engineering Design*, 2003, 10(4): 197-201.
- [8] KOSUKE I, BURTON L. Reverse Fishbone Diagram: A Tool in Aid of Design for Product Retirement[P]. ASME 1996 Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference, 1996.
- [9] 耿秀丽, 王婕. 基于复杂网络和偏好顺序结构评估法的产品服务系统设计方案评价[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(9): 2324-2333.
GENG X L, WANG J. Evaluation of Product Service System Design Based on Complex Network and PROMETHEE II[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(9): 2324-2333.
- [10] 于会, 刘尊, 李勇军. 基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 54-62.
YU H, LIU Z, LI Y J. Key Nodes in Complex Networks Identified by Multi-Attribute Decision-Making Method [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 54-62.
- [11] 任晓龙. 网络节点重要性排序算法及其应用研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2015.
REN X L. The Study of Ranking Algorithm of the Important Node in Networks and Its Applications[D]. Hangzhou: Hangzhou Normal University, 2015.
- [12] 杨毅. 显控台屏幕布局方式对用户态势感知能力的影响[J]. *太原理工大学学报*, 2016, 47(3): 399-404.
YANG Y. The Effect of Monitor Layout on Control Station Users' Situation Awareness[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2016, 47(3): 399-404.
- [13] 李松 黄立新. 基于虚拟样机技术的显示屏支架机构设计[J]. *轻工机械* 2017, 35(4): 74-78.
LI S, HUANG L X. Design of Display Bracket Mechanism Based on Virtual Prototyping Technology[J]. *Light Industry Machinery*. 2017, 35(4): 74-78.
- [14] 姬丽静, 王延琦, 万红, 等. 合理范围内显示器倾斜角度对头部舒适度的影响[J]. *现代制造工程*, 2016(8): 67-70.
JI L J, WANG Y Q, WAN H, et al. The Display Tilt Angle Effect on Head Comfort in Reasonable Range[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2016(8): 67-70.
- [15] HARLOW E R, VAKHARIA A M, ALEXEEV M, et al. Flexible Fixation Technique for Subtle Lisfranc Injuries[J]. *Video Journal of Sports Medicine*, 2022, 2(1): 263502542110551.