

退修意见回复说明

一、第一审稿人外审意见：

论文面向航天舱内设备自动化总装需求，进行混联式舱内装配调姿机器人系统设计与分析，选题有重要的理论意义和工程应用价值。但由于论文多处描述不够清晰，导致评审人难以判断论文设计与分析的合理性与成果。

主要疑问如下：

- 1 第 1.2 节标题将论文所研究的机器人描述为“七自由度”，但文中又说是八自由度机器人。请澄清对自由度的描述。
- 2 第 2 节把三维六自由度工作空间的运动等效为平面连杆机构，这种降维等效如何对应空间六自由度的分析问题？是由图 7 的串联机构与图 6 的平面机构合并形成空间机构？
- 3 图 4 的机器人并联机构如何等效为图 6 的平面连杆机构，文中图形和文字描述不太清晰。仅从图 7 的结构难以辨识构件的连接方式，应表达更明显一些。
- 4 第 1.2 节介绍混联机构是冗余的，冗余的自由度在第 2 节运动学分析的方程中是否没有包含？有冗余和无冗余对运动学方程的表达、解算和对运动的控制是否有区别？
- 5 第 5.2 节刚度及力映射模型验证中，在 0-1000 和 0-1 中任取 50 组数据，这两个范围指什么物理量？其上限是根据什么确定的？6 维力和力矩与这两个范围是什么关系？

二、第二审稿人外审意见：

本论文针对舱段类内部空间狭小，待安装设备种类多、批量大、载荷重且需要快速高效精准定位安装的工况需求，提出适用于狭长舱体类空间内装配机器人系统，设计基于 PRR/PR(PRR)R 机构的含移动、转动关节的大负载冗余八自由度大负载混联调姿装配机器人。推导混联装配调姿机器人运动学位置正解、逆解、速度解、加速度解、雅可比矩阵，建立机器人刚度数学模型，以仿真实验验证了混联装配机器人系统设计的有效性与合理性。论文有创新，叙述过程完整。

建议修改：

- (1) 摘要第一句中“结构尺寸小，工作空间大，负载能力高，灵活度高”，应改为顿号为好！
- (2) 在正文中，注意标点符号的正确使用！
- (3) 文中图、公式部分可精简，比如一些简单的几何关系推导可精简，图 6 与图 8 可合并等等。
- (4) 注意变量、物理单位的字体的正确规范使用。
- (5) 突出创新性工作重点，精炼论文。

修改说明：

第一审稿人意见修改说明：

意见 1 修改：机器人总体机构构型为 P-PRR/PR(PRR)R-RRPR，为串-并-串混联构型，自由度分别为 1、3、4，总体自由度为 8，其中串联机构总自由度为 5，并联总自由度为 3，并联机构的 P_y 与 R_z 两个运动冗余，可以进一步扩大机器人工作空间。根据您的修改意见，更改 1.2 标题为冗余 8 自由度装配调姿机器人设计。

意见 2 修改：PRR/PR(PRR)R 并联机构，本质上是平面机构，只有在 xoy 平面内的 X 方向移动、Y 方向移动、绕 Z 轴转动自由度，所以机构简图为图 6 所示。由于混联机构分析过程较为复杂，所以单独分析并联机构与串联机构，再将并联机构运动等效为串联机构关节，以分析混联机构运动学问题。总体的机构简图示意图为：

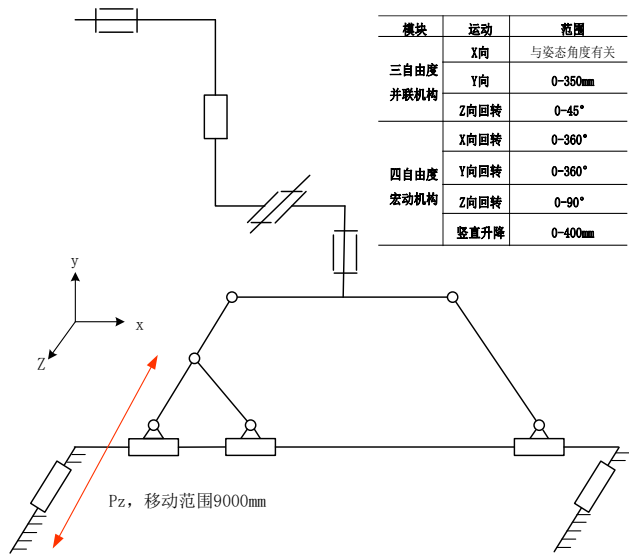


图 混联机器人机构示意图

意见 3 修改：修改了图 3，在图中补充组成混联构型的各部分结构介绍以及连接方式。修改了图 4，在图 4 中标注机构运动副。

意见 4 修改：冗余的自由度为并联机构部分的并联机构的 P_y 与 R_z 两个运动冗余，在运动学分析过程中，分别对串联部分和并联部分进行分析，并联部分等效为串联机构的关节进行总体分析，在实际控制问题中，采用分步控制的方式解决自由度冗余带来的多解问题，即机器人工作流程分为宏动微动两个部分，宏动过程中并联机构与串联机构冗余的 P_y 、 R_z 不参与运动，机器人自由度为 6；微动过程中，串联机构的 P_y 、 R_z 不参与运动，机构自由度为 6。（即固定关节法求解）。

意见 5 修改：0-1000 和 0-1 分别对应六维载荷力和力矩的选取范围，即 F_x 、 F_y 、 F_z 选取范围为 0-1000N， M_x 、 M_y 、 M_z 的选取范围为 0-1N·m（对应选取的 50 组数据表格附在文档后附表 1）。机器人的主体材料采用 Q345 钢，除此之外 Z 向导轨车和移动滑台连接件等结构采用 7050T6 铝，自身重量较轻，具有较高的负载/自重比，满足舱内仪器板承载重量 550kg 以内的要求,自重 500kg，在负载范围内选取某一工况下 100kg 待安装设备负载条件，即选取的上下限。根据修改意见，已在文中补充说明。

附表 1：机构变形仿真计算数据表

负载						变形 (mm)					
F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z	理论 X	理论 Y	理论 Z	实验 X	实验 Y	实验 Z
985.2366	325.6533	55.95253	0.145732	0.104822	0.917299	0.035926	0.059814	0.037663	-0.031737	-0.06185	-0.046297
559.4774	630.2051	816.8552	0.585044	0.858353	0.509839	0.011857	0.231253	0.197924	0.030273	-0.24547	-0.17617
933.5919	230.2992	528.9225	0.073362	0.6982	0.974191	0.033032	0.122516	0.088619	-0.030273	-0.12301	-0.092877
720.3432	579.885	694.3506	0.822326	0.733742	0.197279	0.020955	0.215749	0.149564	-0.023213	-0.21498	-0.15509
484.0385	603.1563	212.4049	0.722903	0.650531	0.111185	0.017496	0.131246	0.091264	-0.015407	-0.14119	-0.098711
639.0311	599.8791	543.2799	0.925858	0.516271	0.297354	0.021337	0.186271	0.129643	-0.020526	-0.19416	-0.13891
887.6369	448.4279	702.5203	0.492639	0.326388	0.396419	0.026549	0.203757	0.126395	-0.028696	-0.19146	-0.14037
198.7368	35.42346	956.4346	0.654883	0.661776	0.420756	0.006138	0.144945	0.137112	-0.0067226	-0.16288	-0.12154
395.3663	513.8148	444.5422	0.890123	0.117565	0.311475	0.012515	0.155567	0.127415	-0.012655	-0.16384	-0.11636
992.1753	407.7302	85.39783	0.538526	0.147817	0.693843	0.03632	0.084054	0.05666	-0.03192	-0.081454	-0.059745
402.3516	108.046	57.34015	0.282205	0.019765	0.091872	0.012833	0.02467	0.024935	-0.012976	-0.026362	-0.020087
658.8565	459.8756	629.4505	0.975958	0.964292	0.402089	0.027452	0.167573	0.140805	-0.02128	-0.18283	-0.13262
901.3481	450.8828	796.1791	0.036426	0.970373	0.295181	0.02122	0.218262	0.14104	-0.029174	-0.20742	-0.15226
995.3818	551.1403	691.1913	0.326245	0.123861	0.306497	0.036574	0.219037	0.15086	-0.032115	-0.20758	-0.15141
653.1633	805.4043	345.3079	0.973014	0.46741	0.105561	0.027122	0.178664	0.125887	-0.020805	-0.19867	-0.13937
108.4364	700.8501	946.8167	0.365033	0.656694	0.593828	0.004309	0.26152	0.213712	-0.0034407	-0.28277	-0.20051
36.11403	872.2355	520.1903	0.30915	0.290186	0.282728	0.000967	0.234528	0.142138	-0.00086345	-0.24393	-0.16878
618.0912	52.19215	953.813	0.120912	0.754537	0.155222	0.025153	0.166269	0.136251	-0.020269	-0.1629	-0.12346
567.1444	219.6813	73.59564	0.915766	0.558118	0.000659	0.012167	0.041633	0.037882	-0.018258	-0.048048	-0.035461
961.9647	459.642	207.0319	0.135478	0.427793	0.283595	0.034602	0.121582	0.084275	-0.030943	-0.11129	-0.081014
746.1055	958.5336	775.0278	0.332118	0.267194	0.550811	0.022477	0.278991	0.195974	-0.023866	-0.29701	-0.21069
662.5161	790.0454	914.1878	0.89748	0.753736	0.870902	0.027738	0.269375	0.201997	-0.021315	-0.28979	-0.20733
523.3133	451.8746	782.5506	0.499649	0.898376	0.042253	0.019774	0.201512	0.149431	-0.016934	-0.20769	-0.1505
259.8943	333.4282	295.5342	0.615288	0.728444	0.904722	0.006802	0.10845	0.075264	-0.0083548	-0.10745	-0.076375
961.9938	59.09531	151.8457	0.583133	0.40683	0.130974	0.034568	0.025349	0.023308	-0.031141	-0.029324	-0.025704
540.204	740.9053	847.9105	0.698254	0.938316	0.833729	0.010783	0.290452	0.202258	-0.017367	-0.27078	-0.19328
30.27016	506.7945	784.8546	0.029332	0.255427	0.800468	0.000863	0.219389	0.160676	-0.000968	-0.22141	-0.15731
696.3145	199.9254	270.8315	0.527883	0.533163	0.91788	0.024546	0.074659	0.051151	-0.022533	-0.076292	-0.057393
519.7162	427.1936	227.8107	0.032073	0.954755	0.137304	0.019501	0.118272	0.07187	-0.016667	-0.11176	-0.079562
59.03056	168.6903	321.0232	0.827142	0.267748	0.504732	0.001406	0.064205	0.054647	-0.0019356	-0.083004	-0.05955
890.0362	751.6946	829.5618	0.339986	0.250085	0.404958	0.020629	0.240901	0.183478	-0.028645	-0.26752	-0.19251
330.2022	368.3508	822.1822	0.846711	0.927673	0.173572	0.015826	0.215243	0.125145	-0.01075	-0.20024	-0.14517
229.7012	941.8178	570.6829	0.24607	0.068582	0.575184	0.006317	0.246843	0.162351	-0.0071071	-0.26364	-0.18343
113.9486	17.17254	571.8296	0.581491	0.2994	0.606218	0.003544	0.097137	0.068377	-0.0038733	-0.096627	-0.07214

310.9227	829.0559	286.0183	0.937677	0.591584	0.214446	0.007708	0.183217	0.129511	-0.0097095	-0.19543	-0.13483
228.4323	626.591	699.1336	0.047787	0.203299	0.519932	0.006091	0.218661	0.159641	-0.007277	-0.2277	-0.16128
651.9972	538.7465	796.2579	0.053978	0.635883	0.989186	0.027118	0.220483	0.157168	-0.021076	-0.22501	-0.16277
66.16012	650.5076	441.5891	0.020618	0.79837	0.489915	0.001738	0.183079	0.143148	-0.0019472	-0.19058	-0.13252
275.4314	726.6295	446.2156	0.681479	0.501701	0.694873	0.006727	0.202817	0.139096	-0.0086781	-0.20359	-0.14219
281.8202	94.48856	465.6624	0.598629	0.650812	0.411422	0.009604	0.086512	0.064246	-0.0092292	-0.092028	-0.068479
880.0663	877.5739	279.0392	0.11403	0.795955	0.034777	0.029973	0.166901	0.132091	-0.028086	-0.1996	-0.14018
444.3304	14.36214	675.3753	0.796245	0.233374	0.292832	0.015284	0.132433	0.076756	-0.014582	-0.11099	-0.084557
755.9141	294.3026	903.6645	0.617851	0.600839	0.801442	0.023004	0.172439	0.122195	-0.024598	-0.19752	-0.14642
603.2964	179.9149	908.5259	0.070214	0.112462	0.346502	0.015344	0.162588	0.128075	-0.019702	-0.17872	-0.1333
783.2659	926.2943	747.1969	0.069279	0.515766	0.083316	0.024556	0.267036	0.215488	-0.025066	-0.2864	-0.20346
113.9306	68.18044	260.5115	0.136007	0.837841	0.511106	0.003487	0.058194	0.037214	-0.0037569	-0.054609	-0.040186
978.5639	581.0932	689.6378	0.788891	0.92079	0.366833	0.035598	0.21608	0.140714	-0.031571	-0.21273	-0.15474
848.5967	637.1512	131.8307	0.092398	0.498228	0.73948	0.028188	0.137576	0.08615	-0.027171	-0.13185	-0.093157
50.6465	651.2693	123.5008	0.237869	0.277611	0.52474	0.001937	0.138925	0.087295	-0.0013414	-0.13822	-0.093528
466.2018	864.622	190.9029	0.243648	0.65252	0.804521	0.016521	0.16036	0.135088	-0.014702	-0.18536	-0.12764

第二审稿人意见修改说明：

意见 1 修改：已按照意见修改标点符号；

意见 2 修改：已检查全文标点符号，并做修改；

意见 3 修改：图 6 图 8 合并，精简部分计算与推导，全文其他部分对应修改；

意见 4 修改：已对全文中变量与物理单位进行检查与修改；

意见 5 修改：已对全文内容进行重新梳理与总结，删除部分冗余表述，不影响原文表述。

其他修改：修改图片 15、16、17、18、19、20、21、22、23。

感谢您的意见与指导，祝您身体健康，工作顺利！

刘毅
2022/12/17