



· 论 著 ·

自动超声扫查机器人在甲状腺检查应用中的可行性研究

张龙辉¹, 陈雪君¹, 林乐武¹, 陆清^{1,2}, 孙逸康², 严丽霞², 周泊阳², 张少华³, 赵崇克²,
徐辉雄^{1,2}

1. 复旦大学附属中山医院(厦门)超声科, 福建 厦门 361015;
2. 复旦大学附属中山医院超声科, 上海 200032;
3. 武汉库柏特科技有限公司, 湖北 武汉 430206

[摘要] 目的: 探讨库柏特(Cobot)自动扫查超声机器人在甲状腺检查中的影像获取能力与应用可行性。方法: 回顾并纳入在2024年8月—2024年12月于复旦大学附属中山医院厦门医院进行甲状腺检查的患者。患者先后采用人工超声和自动超声机器人进行甲状腺扫查, 比较两种扫查方式的甲状腺径线测量值和甲状腺最大结节的长径测量值、检查耗时、影像质量评分、诊断结果一致性, 以及对患者针对机器人检查进行问卷调查。采用SPSS 31.0软件进行统计学分析; 符合正态分布的计量资料采用配对 t 检验, 非正态资料采用Wilcoxon符号秩检验; 采用组内相关系数与Kappa系数评估一致性; 双侧检验以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。结果: 共36例患者均安全顺利地两组检查, 人工扫查组和自动机器人扫查组的甲状腺径线测量值及甲状腺最大结节的长径测量值一致性高(组内相关系数为0.74~0.99); 在检查耗时方面, 机器人组均显著长于人工组[(222.6 ± 58.9) s vs (123.3 ± 66.8) s, $P < 0.05$]; 在影像评分方面, 机器人组略低于人工组(4.6 ± 0.7 vs 4.9 ± 0.4), 差异有统计学意义($P = 0.001$); 在影像诊断方面, 人工组与机器人组甲状腺结节诊断和分类高度一致(Kappa值0.90~1.00); 问卷调查显示患者对机器人检查接受度高。结论: 库柏特(Cobot)自动扫查超声机器人具有良好的安全性和较高的患者接受度。在甲状腺超声扫查方面, 与人工扫查相比, 虽然自动机器人的扫查耗时较长, 图像质量评分略低于人工组, 但其图像评分均较高, 且在甲状腺腺体测量、病灶测量及诊断效能方面与人工扫查具有较高一致性。该机器人系统在减轻医师负担和标准化甲状腺筛查方面展现出高度的临床可行性和良好的应用前景。

[关键词] 机器人; 自动扫查; 超声; 甲状腺; 评价

中图分类号: R736.1; R445.1; 文献标志码: A

DOI: 10.19732/j.cnki.2096-6210.2025.06.005

基金项目: 无。

利益冲突声明: 作者声明无利益冲突。

伦理批件: B2024-012。

知情同意: 有。

引用本文: 张龙辉, 陈雪君, 林乐武, 等. 自动超声扫查机器人在甲状腺检查应用中的可行性研究[J]. 肿瘤影像学, 2025, 34(6): 596-604.

Funding: no.

Conflict of Interest: authors declare no conflict of interest.

Ethical Approval: B2024-012.

Informed Consent: available.

Cite this article: ZHANG L H, CHEN X J, LIN L W, et al. Feasibility study of automated scanning ultrasound robot for thyroid examination [J]. Oncoradiology, 2025, 34(6): 596-604.

Feasibility study of automated scanning ultrasound robot for thyroid examination ZHANG Longhui¹, CHEN Xuejun¹, LIN Lewu¹, LU Qing^{1,2}, SUN Yikang², YAN Lixia², ZHOU Boyang², ZHANG Shaohua³, ZHAO Chongke², XU Huixiong^{1,2} [1. Department of Ultrasound, Zhongshan Hospital (Xiamen), Fudan University, Xiamen 361015, Fujian Province, China; 2. Department of Ultrasound, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China; 3. Wuhan Cobot Technology Co., Ltd., Hubei 430206, Wuhan Province, China]

Correspondence to: ZHAO Chongke E-mail: zhaochongke123@163.com

[Abstract] Objective: To evaluate the image acquisition capability and clinical application feasibility of the Cobot-assisted

automated scanning ultrasound robot in thyroid examination. **Methods:** This study retrospectively enrolled patients who underwent thyroid examinations at Zhongshan Hospital (Xiamen), Fudan University, between August 2024 and December 2024. Each patient sequentially received manual ultrasound scanning and automated robotic ultrasound scanning. The following parameters were compared between the two methods: thyroid dimensions measurements, longest diameter measurements of the largest thyroid nodule, examination duration, image quality scores, diagnostic concordance, and patient feedback via questionnaires regarding the robotic examination. Statistical analyses were performed using SPSS software (version 31.0). The paired *t*-test was used for normally distributed continuous data, and the Wilcoxon signed-rank test was used for non-normally distributed data. The intraclass correlation coefficient and Kappa coefficient were employed to evaluate consistency. A two-sided *P* value < 0.05 was considered statistically significant. **Results:** All 36 patients successfully completed both examinations without adverse events. The manual and robotic scanning groups showed high consistency in thyroid dimensions measurements and the longest diameter measurements of the largest nodule (intraclass correlation coefficient values: 0.74-0.99). However, the robotic group required significantly longer examination time [(222.6 ± 58.9) s vs (123.3 ± 66.8) s, *P* < 0.05] compared to the manual group. The image quality score was slightly lower in the robotic group (4.6 ± 0.7 vs 4.9 ± 0.4, *P* = 0.001), though still relatively high. Diagnostic evaluation showed high concordance in thyroid nodule diagnosis and classification between the manual and robotic groups (Kappa values: 0.90-1.00). Questionnaire results indicated high patient acceptance of the robotic examination. **Conclusion:** The automated ultrasound scanning robot demonstrates favorable safety profiles and a high degree of patient acceptance. For thyroid ultrasound examinations, although the robotic system requires longer scanning compared to manual scanning, and its image quality scores are slightly lower, all image ratings remain within a high range. More importantly, the system shows strong consistency with manual scanning in measurements of thyroid gland dimensions, lesion characteristics, and diagnostic performance. These findings indicate significant clinical feasibility and promising application prospects for the automated robot in reducing operator workload and standardizing thyroid screening practices.

[**Key words**] Robot; Automated scanning; Ultrasound; Thyroid; Evaluation

超声检查因实时性、无辐射性及操作便捷性而被广泛采用，但其实际效果在很大程度上仍依赖于操作与诊断医师的经验积累。当前面临的突出挑战包括患者候诊时间较长、医师检查效率有限、不同操作者之间结果一致性欠佳，以及超声科医师培养周期长、优质人才相对短缺；此外，长期重复性的扫查工作易导致疲劳，进而可能增加医疗差错的风险。这些现象在部分基层医院、体检机构和农村偏远地区尤为显著。为此，探索一种能够辅助乃至替代人工超声扫查与诊断的智能系统，已成为行业发展的迫切需求^[1-3]。随着机器人与智能化技术的持续发展，医用机器人日益迈向智能化和无人化，在医学领域的应用范围逐步拓宽，成效也愈发显著。然而，目前相关研究和产品主要集中在手术辅助、影像识别及后勤支持等方面。在超声检查环节，能够完全替代人工、实现自主扫查的机器人系统鲜有报道，现有方案多为人工辅助或远程操控模式，多数产品尚未具备完整的自主操作能力^[3-6]。甲状腺是位于颈部前方的重要的内分泌器官，超声是甲状腺疾病首选的影像学检查方法^[7]，本研究旨在探讨

一种新型超声自动扫查机器人在甲状腺检查中的影像获取能力与应用可行性。

1 资料和方法

1.1 入组患者

回顾并选取2024年8月—12月于复旦大学附属中山医院厦门医院进行甲状腺检查的门诊或住院患者为研究对象。纳入标准：① 患者年龄18~80岁；② 同意参与该研究并签署知情同意书的患者。排除标准：① 患者在研究期间要求退出；② 检查过程中患者不能配合完成检查；③ 因设备故障导致检查无法进行。

1.2 自动超声扫查机器人

本研究所采用武汉库柏特科技有限公司的自动扫查超声机器人，搭载深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司Mindray MX7超声诊断仪，配备L13-3Ns浅表探头，探头在机械臂上可进行180°旋转，最大角速度0.83 rad/s，机械臂扫查范围65 cm × 34 cm × 42 cm（长 × 宽 × 高），机械臂探头扫查速度最高2.2 cm/s，探头底座有六维力

传感器,能感知X-Y-Z 3个方向的力和力矩共六维的受力情况,当机械臂作用在人体平面方向的力 $>4\text{ N}$ 或垂直方向的力 $>3\text{ N}$ 时,机械臂会立即回撤,响应时间 $<0.15\text{ s}$,使患者不会因受力过大而感到疼痛或受到伤害(图1A)。

机器人系统按照国家超声医学质量控制的要求,模拟医师检查手法及顺序扫查甲状腺^[8-9]。具体顺序:先全面扫查右叶(先行横切直线扫查,再行纵切扇形扫查,均由下至上、再由上至下重复1次);随后横切扫查峡部(同样上下往复扫查);最后将探头横切移至左叶,按右叶相同方式完成扫查。扫查过程中,探头始终紧贴患者皮肤。机械臂在按预设速度、角速度及力度进行扫查的同时,基于实时影像与传感器反馈进行自适应微调,以确保图像质量最优。机器人系统同步识别甲状腺腺体与病变,自动测量其最大切面的径线、截取符合质控标准的图像。检查全程由机器人自主完成,无需人工干预。

扫查结束后,系统将自动保存以下影像:

① 所有患者均保存完整的扫查视频1份;甲状腺左、右叶横切图、纵切图,以及峡部横切图共5个切面(每个切面保存无测量标尺、有测量标尺及彩色多普勒血流成像图各1张),共计15张静

态图像(注:甲状腺术后患者因腺体已切除,保存的图像减少相应腺体测量图)。

② 若识别出阳性病灶,则额外保存每侧叶恶性程度最高(或体积最大)病灶的横切图、纵切图(包含无测量标尺、有测量标尺及彩色多普勒血流成像图各1张),即每侧叶6张,双侧最多共12张额外图像。

1.3 检查步骤

入组患者去枕平卧,头后仰充分暴露颈部,先由1名经过培训的具有9年工作经验的超声科医师进行人工超声检查,所用超声仪器为深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司Mindray Resona 8s,采用L14-5WU线阵探头。人工采集影像与机器人采集的标准及顺序一致,人工检查结束后,由该医师进行机器人操作。先在机器人操作界面录入患者标识的编号后,在患者甲状腺区域均匀涂抹足够的耦合剂,将机械臂探头轻搭在检查起点的气管根部,点击开始后全程由机器人自动扫查,医师现场观察患者及机器人反应,如有患者不适或机器故障则立即停止并处理,记录不良事件(图1B)。

检查完成后,医师将两组检查的图像、视频及检查报告分别打包成文件夹上传至后台电脑,供后台专家阅片,现场检查医师的检查结果对后台专家医师设盲。



图1 自动扫查超声机器人与检查示意图

Fig.1 Schematic diagram of the automated scanning ultrasound robot and its examination setup

A: 超声自动扫查机器人; B: 机器人检查甲状腺示意图。

1.4 问卷调查

现场检查医师对完成检查的患者进行针对机器人检查的问卷调查,包含4个提问:① 机器人检查时是否疼痛不适(是、否);② 机器人检查时是否紧张或担心(是、否);③ 是否愿意为机

器人检查付费(是、否);④ 是否接受机器人单独检查(是、否)。

1.5 甲状腺径线测值及病灶测值比较

比较人工测量和机器人自动测量在甲状腺双侧叶的横径、前后径以及峡部前后径测量值;选

取双侧叶分类等级最高的结节（若同一侧叶有多个结节分类相同则选取最大结节），比较现场检查医师人工测量和机器人自动测量的最大病灶长径测量值。

1.6 检查耗时比较

通过比较人工扫查与机器人扫查耗时来评估两者操作效率。人工扫查耗时通过全程录屏进行测定：计时自探头首次接触患者皮肤开始，至完成全部标准切面扫查并成功保存图像后结束，总录屏时长即为人工扫查耗时。机器人扫查耗时则直接提取其系统自动生成的完整检查视频时长作为依据，其视频的起止点与人工录屏一致。

1.7 影像质量评价比较

为实施盲法评估，本研究先对所有超声影像中的患者信息和仪器标识进行了隐匿处理，再由2名拥有10年以上工作经验的超声专家分别对两组超声影像（包含静态图片及视频）进行质量评价，影像质量评分采用5分制李克特（Likert）量表评分法^[10]，当评分结果不一致时，由二人协商确定（表1）。

表1 五分制李克特（Likert）量表评分法

Tab.1 Scoring method of the 5-point Likert scale

分数	等级	解释
1分	无诊断价值	影像无法辨认关键解剖标志（如甲状腺、颈动脉、气管），无法用于诊断
2分	较差	影像提供了部分标准切面，但解剖结构显示不清或切面不完整，可能影响诊断
3分	良好	至少包含双侧叶纵、横切面，主要解剖结构（甲状腺、颈动脉）可辨认，基本可满足诊断需要
4分	优秀	切面完整、规范，所有关键解剖结构清晰，影像质量仅需微小改进
5分	完美	切面标准，解剖结构层次分明，影像质量无需任何改进

1.8 诊断结果比较

本研究参考2021年中国甲状腺影像报告和数据库系统（Chinese-Thyroid Imaging Reporting and Data System, C-TIRADS）^[11]，由专家对两组甲状腺双侧叶分类最高的结节（或相同分类最大结节）进行描述和分类，并比较两组结节超声特征及C-TIRADS分类的一致性。

1.9 统计学处理

采用SPSS 31.0统计软件进行数据分析。符合正态分布的配对计量资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示，组间比较

采用配对t检验；不符合正态分布的计量资料以M（ P_{25}, P_{75} ）表示，组间比较采用Wilcoxon符号秩检验。检查方法之间一致性评估采用组内相关系数（intraclass correlation coefficient, ICC），ICC < 0.4一致性差，0.4~0.75一致性较好，0.75~0.9一致性高，> 0.9一致性极好。分类特征一致性比较采用Kappa分析，Kappa值 < 0.2为一致性差，0.2~0.4一致性一般，0.4~0.6一致性中等，0.6~0.8一致性较强，0.8~1.0一致性很强^[12]。所有检验均为双侧，P < 0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 患者信息

在随机招募的40例患者中有4例患者拒绝参与该研究（2例表示因时间冲突无法参与，1例表示人工检查已满足其需求，1例表示担心受意外伤害），最终共纳入36例甲状腺检查患者，其中男性10例，女性26例，年龄18~79岁，平均年龄（47.0 ± 14.2）岁，包含甲状腺全切术后1例，左侧甲状腺叶及峡部切除术后2例（图2，表2）。

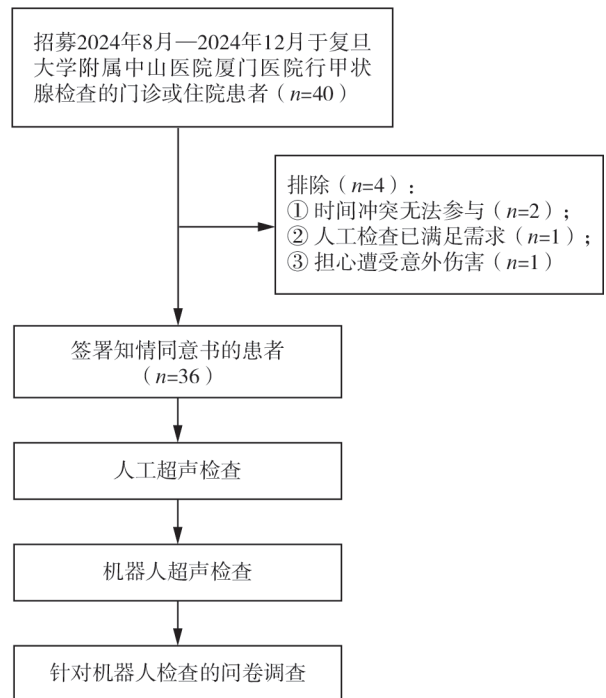


图2 患者纳入流程图

Fig.2 Flow chart of patient enrollment

表2 纳入患者的临床基线特征

特征	$\bar{x} \pm s$ 或 n (%)
年龄/岁	47.0 \pm 14.2
性别	
男性	10 (27.8)
女性	26 (72.2)
就诊主诉	
甲状腺结节复查	11 (30.6)
体检	9 (25.0)
其他恶性肿瘤治疗后筛查(肝、肾、足底、卵巢)	4 (11.1)
甲状腺弥漫性病变复查(甲亢治疗后、桥本甲状腺炎)	4 (11.1)
甲状腺切除术后复查	3 (8.3)
颈部疼痛不适	2 (5.6)
糖尿病、系统性红斑狼疮检查	2 (5.6)
甲状腺术前检查	1 (2.8)

2.2 超声机器人的安全性及患者接受度

36例入组患者均安全地完成人工及机器人检查, 均未报告不良事件。对接受机器人检查的甲状腺患者进行的问卷调查结果如表3所示。

表3 患者对机器人接受程度调查

问卷内容	是	否
① 机器人检查时是否疼痛不适?	8.3% (3/36)	91.7% (33/36)
② 机器人检查时是否紧张或担心?	5.6% (2/36)	94.4% (34/36)
③ 是否愿意接受机器人付费检查?	88.9% (32/36)	11.1% (4/36)
④ 是否接受机器人单独检查?	94.4% (34/36)	5.6% (2/36)

2.3 机器人检查组与人工检查组结果比较

2.3.1 测量准确性比较: 甲状腺径线与结节大小

在甲状腺各径线的测值及结节最大径测值比较方面, 两组差异无统计学意义 ($P > 0.05$), Bland-Altman图显示两种方法测量甲状腺结节最大径一致性良好(表4, 图3、4)。

2.3.2 检查效率比较: 检查耗时

在检查耗时方面, 机器人组耗时长于人工组, 差异有统计学意义 ($P < 0.01$, 表4)。

2.3.3 影像质量评分比较: 影像评分

影像评分方面, 机器人组略低于人工组, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$, 表5)。

2.3.4 诊断性能比较: 特征描述与分类一致性

诊断一致性方面, 专家共识别出符合要求的甲状腺结节33个, 对两种扫查方法所获的影像结节的超声特征描述及分类一致性很强(Kappa值为0.90~1.00, $P < 0.01$, 表6)。

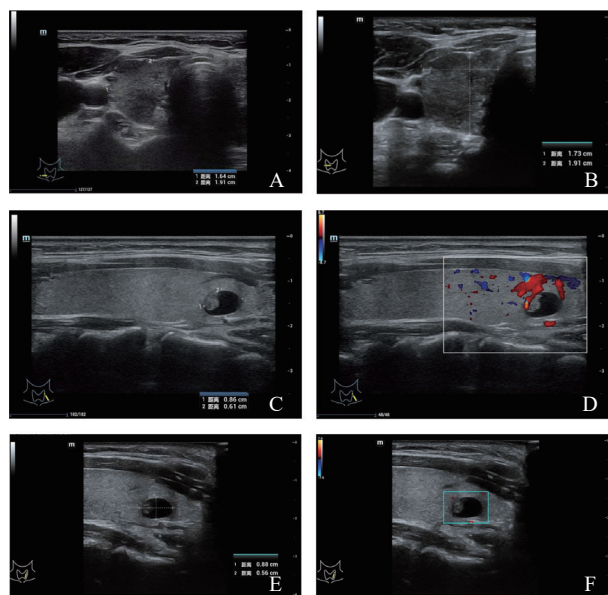


图3 人工扫查与机器人扫查的超声灰阶图和彩色多普勒血流图

Fig.3 B-mode and color Doppler flow imaging images obtained by manual and robotic scanning

A、B: 患者, 女性, 51岁, 甲状腺右叶横切面测量图; A为人工扫查, B为机器人扫查; 专家对两者影像质量评分均为5分, 均未发现结节, C-TIRADS均评为1类。C~F: 患者, 女性, 35岁, 病灶灰阶测量图(卡标)及彩色多普勒血流成像图(取样框), C、D为人工扫查, 影像评分5分, C-TIRADS 3类, 病灶最大径测值8.6 mm; E、F为机器人扫查, 影像评分4分(图像不饱满), C-TIRADS 3类, 病灶最大径测值8.8 mm。

表4 人工扫查与自动机器人扫查在甲状腺超声检查中的比较

项目	人工扫查	机器人扫查	ICC	95% CI	t值	P值
甲状腺腺体测值/mm						
右侧甲状腺横径 (n=35)	17.2 \pm 4.2 (11~28)	17.7 \pm 4.3 (10~29)	0.85	0.7~0.9	-1.25	0.221
右侧甲状腺前后径 (n=35)	15.3 \pm 4.5 (10~32)	15.7 \pm 4.4 (10~30)	0.96	0.9~1.0	-1.26	0.216
甲状腺峡部前后径 (n=33)	2.9 \pm 1.2 (1~7)	2.9 \pm 1.0 (1~6)	0.74	0.5~0.9	-0.44	0.662
左侧甲状腺横径 (n=33)	17.7 \pm 5.3 (9~31)	17.7 \pm 5.8 (9~39)	0.97	0.9~1.0	-0.26	0.801
左侧甲状腺前后径 (n=33)	14.7 \pm 3.8 (10~25)	15.0 \pm 4.2 (10~28)	0.93	0.9~1.0	-1.04	0.306
结节最大径测值/mm (n=33)	11.6 \pm 9.7 (2~36)	11.2 \pm 9.9 (2~37)	0.99	1.0~1.0	0.14	0.890
检查耗时/s (n=36)	123.3 \pm 66.8 (50~358)	222.6 \pm 58.9 (110~412)			-7.77	<0.000 1

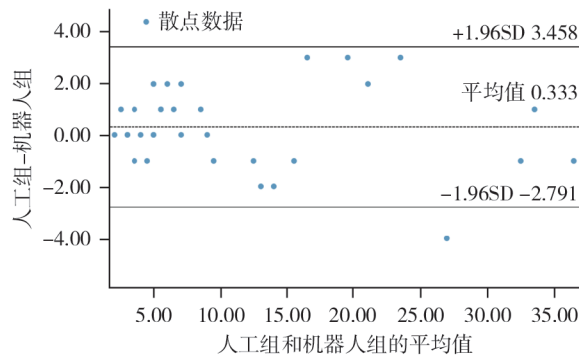


图4 人工与机器人方法测量甲状腺结节最大径一致性的Bland-Altman图

Fig.4 Bland-Altman plot for agreement in measuring the maximum diameter of thyroid nodules between the manual and robotic methods

注：散点基本均落在95%一致性区间（即1.96个标准差范围内），表明一致性情况良好。

表5 人工扫查与机器人扫查超声影像质量评分比较

Tab.5 Comparison of image quality scores between manual ultrasound scanning and robotic ultrasound scanning

评分 (1~5分)	人工 (n=36)	机器人 (n=36)	统计量 (Z)	P值
3	0 (0.0)	2 (5.6)		
4	5 (13.9)	10 (27.8)		
5	31 (86.1)	24 (66.7)		
M (P ₂₅ , P ₇₅)	5 (5, 5)	5 (4, 5)		
众数	5	5		
平均分	4.9 ± 0.4	4.6 ± 0.7	2.32	0.02

表6 人工扫查与机器人扫查对甲状腺结节描述及分类诊断一致性分析

Tab.6 Analysis of thyroid nodules characteristic and diagnostic consistency between manual and robotic ultrasound scanning

特征	人工 (n=33)	机器人 (n=33)	Kappa值	95% CI	P值
位置			0.90	0.77~1.03	<0.01
上极	6 (18.2)	6 (18.2)			
中部	11 (33.3)	13 (39.4)			
下极	16 (48.5)	14 (42.4)			
回声			0.90	0.77~1.03	<0.01
等回声	8 (24.2)	8 (24.2)			
低回声	14 (42.4)	13 (39.4)			
混合回声	7 (21.2)	7 (21.2)			
无回声	4 (12.1)	5 (15.2)			
结构			1.00	1.00~1.00	<0.01
囊实性	7 (21.2)	7 (21.2)			
实性	26 (78.8)	26 (78.8)			
边界			0.94	0.81~1.06	<0.01
清晰	21 (63.6)	20 (60.6)			
模糊	12 (36.4)	13 (39.4)			
纵横比			1.00	1.00~1.00	<0.01
≤1	28 (84.8)	28 (84.8)			
>1	5 (15.2)	5 (15.2)			
血流			0.93	0.80~1.07	<0.01
无	22 (66.7)	23 (69.7)			
有	11 (33.3)	10 (30.3)			

续表

特征	人工 (n=33)	机器人 (n=33)	Kappa值	95% CI	P值
钙化			0.91	0.74~1.08	<0.01
无	27 (81.8)	26 (78.8)			
强回声	3 (9.1)	4 (12.1)			
彗星尾征	3 (9.1)	3 (9.1)			
C-TIRADS			0.92	0.78~1.07	<0.01
2	10 (30.3)	11 (33.3)			
3	18 (54.5)	17 (51.5)			
4A	3 (9.1)	4 (12.1)			
4B	2 (6.1)	1 (3.0)			

3 讨 论

当前超声人工扫查存在操作者依赖性高、重复性低等局限性, 而自动超声扫查机器人系统有望通过其标准化扫查模式提升检查的一致性与可重复性。目前常见的乳腺自动容积扫查系统具备自动化扫查特性, 且有着较高的一致性, 但其原理是按照程序预设定的顺序进行检查, 无法根据影像实时反馈调整, 根据机器人0~5级的自主性分级为2级^[13-14]; 同样, 5G远程遥控超声机器人也属于2级自主性, 它依托高速通信网络实现影像传输, 由远端医师根据实时影像, 手动操作模拟探头实现远程操控机械臂探头实时精准扫查, 该技术在解决医疗资源分布不均(远程医疗)方面优势显著, 但本质上仍依赖医师的实时操作, 无法真正解放医师劳动力, 也未能实现自动化扫查与结果的可重复性^[3, 5]。随着机器人自主性技术的发展, 本研究所用的机器人达到3级超声机器人自主性标准, 该机器人系统能够在无需人工指令的情况下实现自主规划并执行超声扫查识别采集影像, 并实时根据传感器及影像反馈动态调整, 具备一定程度的智能自主性扫查, 仅需操作人员的监督^[4, 15-16]。本研究旨在评估该新型超声机器人在甲状腺检查中的临床可行性, 并重点探讨其安全性和患者接受度, 以及与人工检查比较在径线测值、检查效率、影像质量及影像诊断结果方面的一致性, 该研究指标的设计与同类型可行性研究相一致, 能够从多维度全面评估两种检查方式的一致性^[5]。

本研究中机器人在36例患者检查中均顺利完成, 初步验证了其临床应用的安全性。问卷调查结果中尽管有8.3% (3/36) 的受试者报告了轻微不适, 但均表示可耐受且未影响检查完成; 同时, 88.9% (32/36) 愿意为此付费, 94.4% (34/36) 无心理顾虑以及可接受单独由机器人完成检查, 这些数据共同表明该机器人技术获得了较高的整体患者接受度。这些情况与同类研究^[3-5]的结论一致, 即此类超声机器人在甲状腺的扫查中, 在确保技术安全可靠的基础上, 虽可能存在少数受试者的轻微不适, 但仍具备整体良好的患者接受度和临床应用可行性。结合本研究结果, 未来可通过优化接触力控制算法、改进探头贴合机制, 并结合不同解剖部位的软组织特性, 系统性提高检查过程的整体舒适度, 从而加速该技术的临床转化与推广^[17-18]。

在检查效率方面, 自动超声扫查机器人组的平均耗时显著长于人工超声扫查组 $[(222.6 \pm 58.9) \text{ s vs } (123.3 \pm 66.8) \text{ s}]$ 。这一差异主要源于机器人采用全程固定扫查速度(最高2.2 cm/s), 而人工检查可根据实时超声影像反馈灵活调整, 对阴性区域快速扫查, 对病变区域缓慢重点观察, 这也解释了人工组扫查耗时波动大, 标准差较大(66.8 s vs 58.9 s)的现象。另一方面, 机器人检查时长稳定, 耗时波动小也体现其操作的一致性和可重复性, 这对于标准化采集、减少人为检查变异是一个优势。与现有远程遥控超声机器人研究相比, 有研究^[5]显示其甲状腺扫查耗时与人工检查相当(约5 min)。需要说明的是, 该研究除甲状腺外, 还包含对双侧

颈部淋巴结的系统性扫查，其检查范围更广泛，因此总耗时高于本研究。本系统当前主要聚焦于甲状腺结构的自动化扫查流程，尚未集成对颈部淋巴结的自动扫描功能，这也是未来系统功能扩展与完善的重要方向。

在超声影像质量评估方面，本研究对两组超声影像进行去除仪器标识的预处理，并由2名专家对两组超声影像质量采用盲法评估，以最大程度地减少评价误差^[19]。结果显示机器人组超声影像评分略低于人工组（ 4.6 ± 0.7 vs 4.9 ± 0.4 ），表明在追求极致的5分图像质量方面与经验丰富的医师相比存在细微差距，但这种差异的临床意义有限，因为机器人组影像平均分4.6分，且其评分中位数及众数与人工组同为5分，即便在甲状腺术后的患者中，也能够稳定地获取高质量且可用于诊断的影像。同时，甲状腺各径线测值以及甲状腺最大结节的最大径线测值的一致性高，表明机器人系统具备与高年资医师相当的解剖结构识别及成像能力。由于人工扫查中实时超声图像反馈对提升图像质量与诊断可靠性至关重要，提示机器人应加强其在路径优化中的应用，也是当前机器人自主化研究的方向^[18,20]。

尽管人工与机器人存在效率方面差异，两组在对甲状腺结节超声特征描述及诊断分类方面一致性很强（Kappa值0.90~1.00），间接体现了机器人获取高质量影像的能力，也是疾病正确诊断的基础。个别患者中分类不一致的原因分析如下：①当甲状腺结节较大，中部与下极的位置界定模糊；②回声类型的无回声与低回声、边界是否清晰、内部细小强回声的判定，在直径为2 mm的小结节中鉴别困难，且存在较强主观性；③囊性为主的结节中囊内等回声部分未测及血流信号，这类结节在C-TIRADS 2类与3类间鉴别困难；④具有恶性征象的结节在C-TIRADS 4A与4B分类上存在一定主观性。尽管本研究若干结节的两组影像分类存在细微差异，但在鉴别良恶性方面（ ≤ 3 类及 $\geq 4A$ 类）两组诊断完全一致，对患者的临床处理建议方面没有差别^[11, 21]；两组获取的结节影像在诊断分类上的一致性很强，证实该机器人系统基本可达到满足诊断甲状腺疾

病要求的影像质量，与既往自动扫查机器人及远程遥控机器人扫查的影像诊断一致性强的结论相符^[4-5, 9]。

需要指出的是，甲状腺疾病超声诊断在很大程度上依赖于患者的临床表现和病史信息。在诊疗过程中，医师对患者的病史询问、病情解释与建议、紧急情况处理等方面仍具有不可替代的作用。现阶段，机器人系统仍难以实现完全替代超声科医师的功能^[4]。未来可进一步通过人机交互技术的创新，推动甲状腺超声检查的智能化进程，使其有望成为超声科医师可靠的辅助诊断参考工具。

本研究的局限性主要包括以下几方面：第一，本研究为单中心可行性研究，样本量相对有限；第二，文中探讨的机器人扫查图像与医师扫查图像的诊断一致性尚未经过病理学检查金标准验证；第三，所纳入的研究对象年龄范围为18~80岁，未包含更广泛年龄层的研究对象；第四，患者问卷调查仅针对机器人检查的体验进行评价，未同时纳入对人工扫查的比较评估，以上缺憾将在后续研究中加以补充完善。未来将通过多中心、大样本研究进一步验证上述初步结论。

综上所述，超声自动扫查机器人作为一种新型、无创、智能的影像学技术，具有良好的安全性和较高的患者接受度。在甲状腺影像获取方面，与高年资超声科医师相比，虽然机器人的扫查耗时较长，但其整体影像质量评分高，且在腺体及结节径线测值、影像诊断效能方面与人工扫查图像具有较高的一致性，表明该全自动机器人超声系统在实现甲状腺筛查的标准化、有效减轻医师负担方面提供了可行的技术路径，展现出高度的临床可行性和良好的应用前景。

第一作者：

张龙辉（ORCID: 0009-0009-8656-2795），医学硕士，住院医师。

通信作者：

赵崇克（ORCID: 0000-0002-6865-7696），医学博士，主治医师，复旦大学超声医学与工程研究所超声人工智能研究室主任，E-mail: zhaochongke123@163.com。

作者贡献声明：

张龙辉：数据采集、影像处理、论文撰写；陈雪君：问卷调查设计、统计分析；林乐武、严丽霞：影像评分、影像诊断；陆

清: 行政支持、论文修改; 孙逸康: 伦理申请、知情同意书设计; 周泊阳: 数据核对、影像处理; 张少华: 技术支持、操作指导; 赵崇克: 课题负责人、研究设计、方法指导、论文修改; 徐辉雄: 把握总体研究方向, 提供关键学术指导。

[参 考 文 献]

- [1] DE CARLOS J, GARCIA J, BASTERRA F J, et al. Interobserver variability in thyroid ultrasound [J] . *Endocrine*, 2024, 85(2): 730-736.
- [2] FIORINI P, GOLDBERG K Y, LIU Y H, et al. Concepts and trends n autonomy for robot-assisted surgery [J] . *Proc IEEE Inst Electr Electron Eng*, 2022, 110(7): 993-1011.
- [3] ANTOLIN A, ROSON N, PLANES M, et al. Validation of a tele-robotic ultrasound system for abdomen and thyroid gland explorations: a comparison with standard ultrasound [J] . *Ultrasound J*, 2025, 17(1): 2.
- [4] SU K, LIU J W, REN X Q, et al. A fully autonomous robotic ultrasound system for thyroid scanning [J] . *Nat Commun*, 2024, 15(1): 4004.
- [5] ZHANG Y Q, YIN H H, HE T, et al. Clinical application of a 5G-based telerobotic ultrasound system for thyroid examination on a rural island: a prospective study [J] . *Endocrine*, 2022, 76(3): 620-634.
- [6] BAMAAROUF M, PACCOT F, SARRY L, et al. Development of a robotic ultrasound system to assist ultrasound examination of pregnant women [J] . *IEEE Trans Med Robot Bionics*, 2024, 6(3): 796-805.
- [7] RINGEL M D, SOSA J A, BALOCH Z, et al. 2025 American Thyroid Association management guidelines for adult patients with differentiated thyroid cancer [J] . *Thyroid*, 2025, 35(8): 841-985.
- [8] 姜玉新, 李建初, 王红燕. 超声医学质量控制管理规范: 2022年版 [M] . 北京: 人民卫生出版社, 2022: 175-179.
JIANG Y X, LI J C, WANG H Y, et al. Ultrasound medical quality control and management standards. 2022 [M] , Beijing: People's Medical Publishing House. 175-179.
- [9] 童禹铭, 白 鸽, 韩 冬, 等. 自主超声扫查机器人性能评价方法研究 [J] . *中国医学装备*, 2025, 22(6): 30-34.
TONG Y M, BAI G, HAN D, et al. Research on evaluation method for performance of autonomous ultrasound scanning robot [J] . *China Med Equip*, 2025, 22(6): 30-34.
- [10] MALAPANE T A, NDLOVU N K. Assessing the reliability of likert scale statements in an E-commerce quantitative study: a cronbach alpha analysis using SPSS statistics [C] //2024 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS). May 3-3, 2024, Charlottesville, VA, USA. IEEE, 2024: 90-95.
- [11] 中华医学会超声医学分会浅表器官和血管学组, 中国甲状腺与乳腺超声人工智能联盟. 2020甲状腺结节超声恶性危险分层中国指南: C-TIRADS [J] . *中华超声影像学杂志*, 2021, 30(3): 185-200.
ZHAN W W, ZHOU J Q, YIN L X, et al. 2020 China guidelines for ultrasonic malignant risk stratification of thyroid nodules: C-TIRADS [J] . *Chin J Ultrason*, 2021, 30(3): 185-200.
- [12] VACH W, GERKE O. Gwet's AC1 is not a substitute for Cohen's Kappa - a comparison of basic properties [J] . *MethodsX*, 2023, 10: 102212.
- [13] MA Q Q, WANG J L, XU D J, et al. Automatic breast volume scanner and B-ultrasound-based radiomics nomogram for clinician management of BI-RADS 4A lesions [J] . *Acad Radiol*, 2023, 30(8): 1628-1637.
- [14] IBRAHEEM S A, MAHMUD R, MOHAMAD SAINI S, et al. Evaluation of diagnostic performance of automatic breast volume scanner compared to handheld ultrasound on different breast lesions: a systematic review [J] . *Diagnostics*, 2022, 12(2): 541.
- [15] ELMEKKI H, ISLAM S, ALAGHA A, et al. Comprehensive review of reinforcement learning for medical ultrasound imaging [J] . *Artif Intell Rev*, 2025, 58(9): 284.
- [16] LEE A, BAKER T S, BEDERSON J B, et al. Levels of autonomy in FDA-cleared surgical robots: a systematic review [J] . *NPJ Digit Med*, 2024, 7(1): 103.
- [17] ZHANG Y Q, SUN L P, HE T, et al. A 5G-based telerobotic ultrasound system provides qualified abdominal ultrasound services for patients on a rural island: a prospective and comparative study of 401 patients [J] . *Abdom Radiol*, 2024, 49(3): 942-957.
- [18] MUNIR K, AL-BATTAL A F, ALSHEGHRI A, et al. A survey of autonomous robotic ultrasound scanning systems [J] . *IEEE Access*, 2025, 13: 103178-103197.
- [19] WARNEKE K, SIEGEL S D, DRABOW J, et al. Examiner experience moderates reliability of human lower extremity muscle ultrasound measurement - a double blinded measurement error study [J] . *Ultrasound J*, 2025, 17(1): 20.
- [20] LIN X X, LI M D, RUAN S M, et al. Autonomous robotic ultrasound scanning system: a key to enhancing image analysis reproducibility and observer consistency in ultrasound imaging [J] . *Front Robot AI*, 2025, 12: 1527686.
- [21] HAUGEN B R, ALEXANDER E K, BIBLE K C, et al. 2015 American Thyroid Association management guidelines for adult patients with thyroid nodules and differentiated thyroid cancer: the American Thyroid Association guidelines task force on thyroid nodules and differentiated thyroid cancer [J] . *Thyroid*, 2016, 26(1): 1-133.

(收稿日期: 2025-09-22 修回日期: 2025-11-16)