

论著·临床研究

doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2022.22.009

头颈放疗中 Catalyst 系统监测摆位误差的参数依赖性分析*

彭海燕,毛开金,何 阳,罗焕丽,靳 富[△]

(重庆大学附属肿瘤医院/重庆市肿瘤研究所/重庆市肿瘤医院放疗科 400030)

[摘要] 目的 分析不同参考影像(定位 CT:Imag_{CT};体表光学:有膜 Imag_{Cat}、无膜 Imag_{Cat})、配准算法(弹性:Algo_{ela};刚性:Algo_{rig})、感兴趣区(头+颈:ROI_{HN};头:ROI_H;颈:ROI_N)对 Catalyst HD 引导头颈部放疗摆位的影响。**方法** 随机选取 33 例头颈部肿瘤患者,均用热塑膜仰卧位固定。首次基于激光摆位,锥形束 CT(CBCT)验证后分别获取有膜 Imag_{Cat}、无膜 Imag_{Cat},再次 CBCT 验证后治疗;非首次则每天 Catalyst 系统结合每周 1 次 CBCT。改变上述参数,记录相应摆位误差(SE_{CBCT}、SE_{Cat})。**结果** 采用 ROI_{HN} 模式,Imag_{CT} 与无膜 Imag_{Cat} 的 SE_{Cat} 除左右(LR)方向均差异有统计学意义($P < 0.05$);以 Imag_{Cat} 为参考,SE_{CBCT} 与无膜 SE_{Cat} 的差异小于其与有膜 SE_{Cat} 的差异,Algo_{ela} 与 Algo_{rig} 对比发现:无膜平移 SE_{Cat} 对于 >60 岁男性在头脚(SI)方向、女性在腹背(AP)、SI 方向,旋转 SE_{Cat} 除女性在左右旋转(Roll)方向外均差异显著($P < 0.05$)。ROI_{HN}、ROI_H、ROI_N 模式两两比较,基于 Algo_{ela} 的无膜平移 SE_{Cat} 仅 ROI_{HN}、ROI_N 之间差异无统计学意义($P > 0.05$),其余差异均有统计学意义($P < 0.05$)。对比 Imag_{CT} 与 Imag_{Cat},≤45 岁男性、>60 岁女性的 SE_{Cat} 3 种模式下在头脚旋转(Rot)、腹背旋转(Pitch)方向规律一致,差异均无统计学意义($P > 0.05$)。此外,在 SI 方向≤45 岁女性无膜 SE_{Cat} 与年龄呈负相关,>45~60 岁男性则呈正相关。**结论** Catalyst 系统监测与其参考影像、配准算法、ROI 等参数关联显著。

[关键词] 放射治疗;体表光学;Catalyst HD;头颈癌;摆位误差**[中图法分类号]** R730.55**[文献标识码]** A**[文章编号]** 1671-8348(2022)22-3824-08

Analysis of parameter dependence of Catalyst system monitoring positioning error in head-neck radiotherapy*

PENG Haiyan, MAO Kaijin, HE Yang, LUO Huanli, JIN Fu[△]

(Department of Radiotherapy, Affiliated Cancer Hospital of Chongqing University/Chongqing Cancer Institute/Chongqing Cancer Hospital, Chongqing 400030, China)

[Abstract] **Objective** To analyze the impact of different reference images (CT positioning; Imag_{CT}; surface optics; mask Imag_{Cat}, non-mask Imag_{Cat}), registration algorithm (Algo_{ela}, Algo_{rig}) and region of interest (ROI, head+neck: ROI_{HN}; head: ROI_H; neck: ROI_N) on the positioning of Catalyst HD head-neck radiotherapy. **Methods** A total of 33 patients with head-neck tumor were randomly selected and fixed in supine position with the thermoplastic masks. For the first time, based on the laser positioning, after verification by cone-beam CT (CBCT), mask Imag_{Cat} and non-mask Imag_{Cat} were obtained, and the treatment was given after CBCT verification again; for non-first time, daily Catalyst was combined with CBCT once a week. The above parameters were changed, and the corresponding setup errors (SE_{CBCT}, SE_{Cat}) were recorded. **Results** In ROI_{HN} mode, the differences between non-mask SE_{Cat} with Imag_{CT} and Imag_{Cat} and were statistically significant except for the left and right (LR) direction ($P < 0.05$); with Imag_{Cat} as reference, the difference between SE_{CBCT} and non-mask SE_{Cat} was less than that between SE_{CBCT} and mask SE_{Cat}. The comparison between Algo_{ela} and Algo_{rig} found that the differences for the non-mask translation SE_{Cat} in the head and foot (SI) direction for the males whose age was >60 years old, in the ventral dorsal (AP) and SI direction for the females, rotation SE_{Cat} except for the left to right rotation (Roll) had statistical significance ($P < 0.05$). The pairwise comparison of ROI_{HN}, ROI_H and ROI_N modes; for the non-mask translational SE_{Cat} based on Algo_{ela}, only the difference between ROI_{HN} and ROI_N had no statistical difference ($P > 0.05$), and the other differences were statistically significant

* 基金项目:国家自然科学基金项目(11575038);重庆市科委科研院所绩效激励引导专项(cstc2017jxjl130017)。 作者简介:彭海燕(1993—),中级技师,硕士,主要从事肿瘤放射治疗技术相关研究。 [△] 通信作者, E-mail: jfajz@126.com。

($P < 0.05$). The rules in the Rot and Pitch directions for the comparisons of three SE_{cat} modes for $Imag_{CT}$ and $Imag_{cat}$, the males whose age was ≤ 45 years old and the females whose age was > 60 years old in Rot and Pitch directions were same, and the differences were not statistically significant ($P > 0.05$). In addition, the non-mask SE_{cat} in the SI direction for the females whose age was ≤ 45 years old was negatively correlated with the age, and positively correlated with the males whose age was $> 45-60$ years old. **Conclusion** The Catalyst monitor has the significant correlation with the parameters of reference image, registration algorithm and ROI.

[Key words] radiotherapy; surface optical system; Catalyst HD; head-neck cancer; setup error

零辐射光学引导放疗已成功应用于临床^[1-2]。Catalyst 系统采用结构光原理,可实时跟踪患者体表轮廓并与参考影像配准,获取患者六维方向的亚毫米偏差并及时反馈,通过不同颜色光指导治疗师快速纠正摆位误差。在患者治疗期间还可驱动呼吸门控开关^[3-4]。

近年来 Catalyst 系统内置算法逐渐升级,在原有刚性算法下新增一套弹性算法。弹性算法可在配准计算中优化权重比,理论上针对形变位移更具有优势,误差计算准确率更高。基于肿瘤患者,前期研究发现^[7-10],Catalyst 系统易受患者的年龄、BMI、膀胱容积及皮肤状态的影响^[5-6];而基于 Catalyst 系统本身,有学者针对模体展开研究^[11],发现弹性算法与刚性算法在非形变位移中基本无差异,而在形变位移中差别较大。

Catalyst 系统在头颈部肿瘤患者放疗中的应用目前已有深入研究^[12-13],在头颈放疗过程中,形变位移和非形变位移均存在。但 Catalyst 系统内由不同参考影像、不同算法、不同感兴趣区(ROI)导致的头颈患者的摆位误差差异鲜有报道,故本研究旨在探讨 Catalyst 系统采用不同配准算法、参考影像、ROI 对不同年龄、性别的头颈部肿瘤患者的影响。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取 2019—2020 年收治的头颈部肿瘤患者 33 例,均为鼻咽癌,其中男 18 例,年龄 27~69 岁,中位年龄 53 岁,女 15 例,年龄 33~84 岁,中位年龄 54 岁。所有患者均由资深物理师在 Varian Eclipse 三维治疗计划系统中制订计划,9 野调强放疗(IMRT),剂量 50 Gy 分 25 次实施,治疗计划由 Varian IX 直线加速器传输。

1.2 摆位固定和影像配准

用 Daily QA3 和 Daily Check phantom 分别对加速器和 Catalyst 系统进行晨检。33 例头颈部肿瘤患者均采用头颈肩热塑膜仰卧位固定体位。首次摆位流程:基于激光与膜上标记摆位后,采用瓦里安机载锥形束 CT(CBCT)影像系统验证,平移摆位误差均 ≤ 3 mm,移床纠正误差;应用 Catalyst 系统进行头颈部参考影像的采集,先采集有膜图像并拍照,随后嘱患者保持不动,一位治疗师监督,另一位治疗师取膜迅速采集无膜图像并拍照,完毕后迅速扣膜,再次采集

有膜图像验证,并再次行 CBCT 验证。第 2 次 CBCT 在左右(LR)、头脚(SI)、腹背(AP)的偏差均 ≤ 1 mm 认为是有效数据,否则舍弃,2 次拍照图像分别为有膜、无膜的参考影像(有膜 $Imag_{cat}$ 、无膜 $Imag_{cat}$)。以后每次摆位流程:常规摆位后,应用 Catalyst 系统分别采集患者无膜、有膜的实时影像并配准,治疗师依据投射至患者体表的的不同颜色光进行局部校准,采集无膜影像后迅速扣膜,再采集有膜影像验证无误,每周进行 1 次 CBCT 验证。CBCT 曝光条件为 75 kV, 200 mA, 25 ms,影像匹配均为骨性配准。Catalyst 系统增益与积分时间参数设置标准:获取的表面影像呈灰白色且刚好出现红色曝光点。在 Catalyst 系统软件后台进行参考影像(定位 CT: $Imag_{CT}$, 体表光学:有膜 $Imag_{cat}$ 、无膜 $Imag_{cat}$)、配准算法(弹性: $Algo_{ela}$ 、刚性: $Algo_{rig}$)、ROI(头+颈: ROI_{HN} 、头: ROI_H 、颈: ROI_N)的更改并计算相应的摆位误差。记录患者性别、年龄,CBCT 摆位误差(SE_{CBCT})及 Catalyst 系统在 3 个平移方向下(LR、SI、AP)及 3 个对应旋转方向[左右旋转(Roll)、头脚旋转(Rot)、腹背旋转(Pitch)]的摆位误差(SE_{cat})。

1.3 统计学处理

采用 SPSS22.0 软件分析数据,计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用配对 t 检验分析 CBCT 与 Catalyst 系统摆位的差异性,以及 Catalyst 系统监测在不同配准算法、参考影像、ROI 下的差异性;采用 Pearson 法分析患者年龄、性别与 Catalyst 系统摆位的关联性。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 CBCT 与 Catalyst 系统在头颈放疗中的摆位差异

33 例患者(共计 262 组数据)的摆位误差见表 1, Varian IX 直线加速器常规行 CBCT 验证时只考虑三维平移误差。差异性分析可见: SE_{CBCT} 与患者有膜状态下的 SE_{cat} (有膜 SE_{cat});无膜状态下的 SE_{cat} (无膜 SE_{cat}) 在平移方向均存在一定差异($P < 0.05$),无膜 SE_{cat} 与 CBCT 更接近。

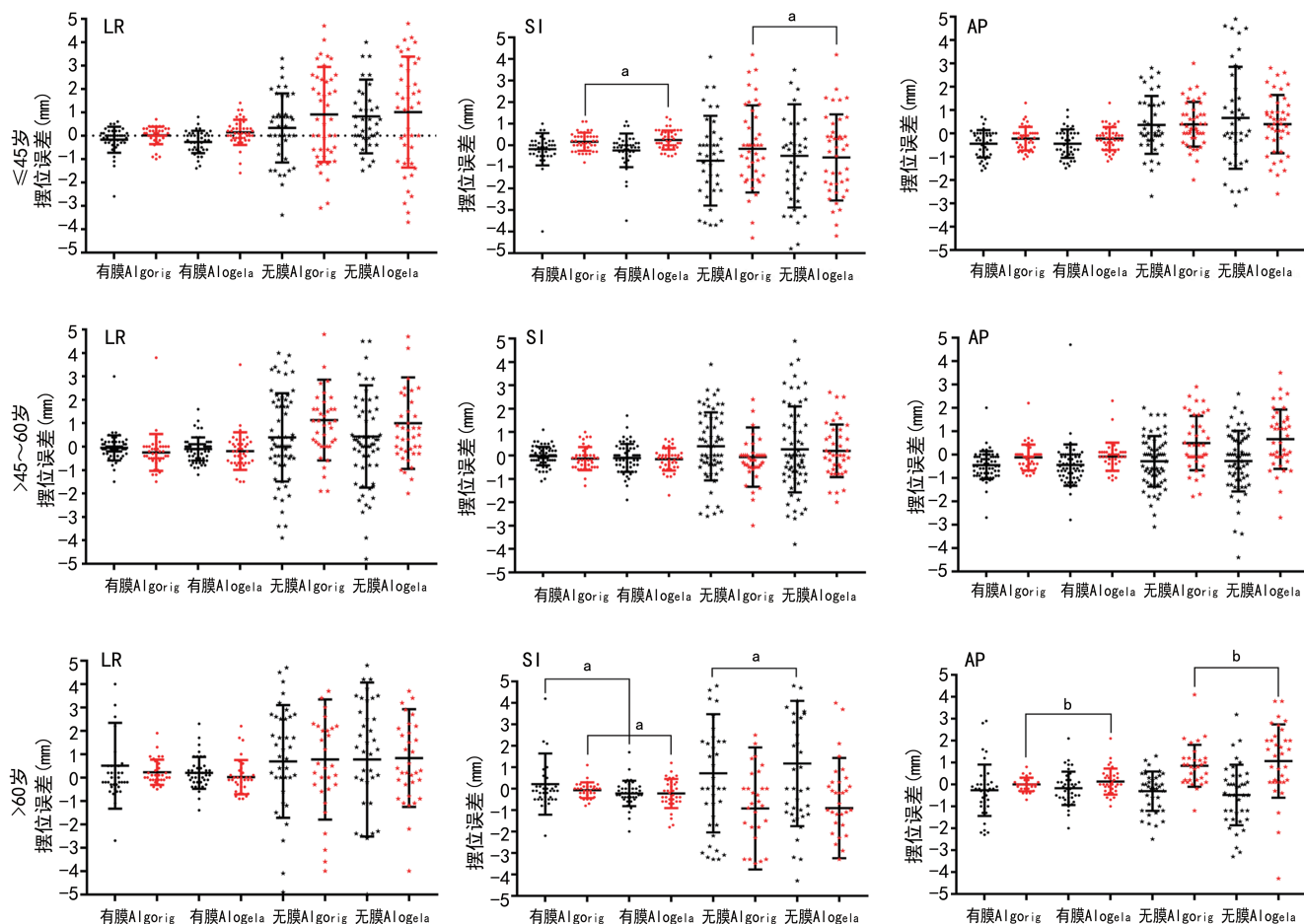
2.2 头颈放疗中 Catalyst 系统监测在不同参考影像、配准算法下的摆位误差比较

以 $Imag_{CT}$ 和 $Imag_{cat}$ 为参考的 SE_{cat} 比较:在 LR 方向上, $> 45-60$ 岁的男性患者、 > 60 岁的女性患者有膜 SE_{cat} 和无膜 SE_{cat} , ≤ 45 岁的患者无膜 SE_{cat} , $>$

60 岁的男性患者有膜 SE_{cat} 差异均无统计学意义 ($P>0.05$)。在 $Algo_{ela}$ 下,除 SI 方向外, ≤ 45 岁的男性患者无膜 SE_{cat} 差异也无统计学意义 ($P>0.05$)。

以 $Imag_{cat}$ 为参考, $Algo_{ela}$ 与 $Algo_{rig}$ 的 2 种配准算法的 SE_{cat} 比较,见图 1:红色为女性,黑色为男性, P 值越小,两者差异性越大。LR、SI、AP 方向上的 SE_{cat} 分析显示: ≤ 60 岁的男性患者 $Algo_{ela}$ 与 $Algo_{rig}$

的有膜 SE_{cat} 和无膜 SE_{cat} 差异均无统计学意义 ($P>0.05$), >60 岁时在 SI 方向开始出现较小差异: $Algo_{ela}$ 与 $Algo_{rig}$ 的有膜 SE_{cat} 分别为 (0.22 ± 1.43) 、 (-0.27 ± 0.51) mm,无膜 SE_{cat} 分别为 (0.72 ± 2.76) 、 (1.24 ± 2.93) mm。女性患者在 LR 方向上, $Algo_{rig}$ 和 $Algo_{ela}$ 的有膜 SE_{cat} 和无膜 SE_{cat} 差异无统计学意义 ($P>0.05$)。



黑色为男性,红色为女性。^a: $P 0.05 \sim 0.01$; ^b: $P 0.01 \sim 0.001$ 。

图 1 头颈放疗中 Catalyst 应用不同配准算法的摆位误差

2.3 头颈放疗中 Catalyst 监测在不同 ROI 下的摆位误差比较

在 Catalyst 系统软件后台进行每分次实时影像的截取,在不改变图像质量的前提下分别截至头部和颈部并保存。在软件后台同一参考影像下更替 ROI 下 (ROI_{HN} 、 ROI_H 、 ROI_N) 的不同实时影像并计算相应的摆位误差。因后台不能进行参考影像的截取,参考影像仍为头颈部轮廓。本研究发现在 $Algo_{rig}$ 下实时影像更替为 ROI_H 、 ROI_N 后 Catalyst 配准摆位误差出现异常 (>100 mm),而选择 $Algo_{ela}$ 进行 Catalyst 配准却无异常发生。因此,本研究在不同 ROI 下 (ROI_{HN} 、 ROI_H 、 ROI_N) 的 SE_{cat} 仅纳入 $Algo_{ela}$ 分析。研究发现在 ROI_{HN} 、 ROI_H 、 ROI_N 下,因参考的选取不同而配准得到的 SE_{cat} 差异较大,仅有少数情况差异

无统计学意义 ($P>0.05$),其中包括:(1)分别以 $Imag_{CT}$ 、有膜 $Imag_{cat}$ 、无膜 $Imag_{cat}$ 为参考对比分析时, ≤ 45 岁、 >60 岁的男性患者在 LR 方向的有膜 SE_{cat} 监测, ≤ 45 岁的男性、 >60 岁的女性患者在 Rot 和 Pitch 方向的无膜 SE_{cat} 监测;(2)分别以有膜、无膜 $Imag_{cat}$ 为参考对比分析时,男性患者 ≤ 45 岁在 SI 方向、 $>45 \sim 60$ 岁在 AP 和 Roll 方向、 >45 岁在 Pitch 方向,女性患者 ≤ 45 岁在 Roll 方向、 >45 岁在 SI 方向的有膜 SE_{cat} 和无膜 SE_{cat} 。见表 2。

以有膜 $Imag_{cat}$ 、无膜 $Imag_{cat}$ 为参考的摆位误差,即有膜 SE_{cat} 、无膜 SE_{cat} 与年龄的相关性见表 3: $>45 \sim 60$ 岁的男性患者在 SI 方向,不同 ROI 分析下的无膜 SE_{cat} 与年龄均呈正相关 ($r=0.421$ 、 0.414 、 0.409)。 ≤ 45 岁的女性患者在 SI 方向,无膜 SE_{cat} 与

年龄均呈负相关($r=-0.321$ 、 -0.537 、 -0.601)，>60岁的女性患者在LR方向，有膜SE_{cat}与年龄均呈显著正相关($r=0.557$ 、 0.679 、 0.637)。见表3。采用ROI_{HN}、ROI_H、ROI_N分析的无膜SE_{cat}差异见表4：除ROI_{HN}与ROI_N在LR方向上的无膜SE_{cat}基本无差异外，其他无膜SE_{cat}在各方向、各年龄段均存在一定差异($P<0.05$)。

表1 CBCT与Catalyst引导头颈部肿瘤患者的摆位误差分布($\bar{x}\pm s$,mm)

性别	方向	有膜 Algo _{rig}	有膜 Algo _{ela}	无膜 Algo _{rig}	无膜 Algo _{ela}	CBCT
女	LR	0.31±0.57	0.44±0.58	1.81±1.58	2.08±1.75	1.98±0.82
	SI	0.34±0.31	0.39±0.32	1.14±1.24	1.09±0.92	1.02±0.97
	AP	0.46±0.42	0.43±0.46	0.92±0.85	1.05±0.87	1.05±1.18
	Roll	0.16±0.20	0.21±0.21	0.68±0.59	1.05±0.84	—
	Rot	0.21±0.27	0.28±0.25	0.48±0.48	0.99±0.85	—
	Pitch	0.11±0.15	0.19±0.14	0.57±0.53	0.56±0.43	—
男	LR	0.59±1.09	0.43±0.44	1.45±1.24	1.72±1.65	1.95±0.77
	SI	0.50±0.87	0.50±0.54	1.31±1.05	1.56±1.28	1.43±0.91
	AP	0.71±0.63	0.68±0.64	0.92±0.77	1.28±1.17	1.14±0.95
	Roll	0.23±0.29	0.28±0.30	0.56±0.53	1.08±0.87	—
	Rot	0.22±0.36	0.25±0.26	0.41±0.41	0.92±0.84	—
	Pitch	0.11±0.15	0.18±0.17	0.38±0.33	0.58±0.60	—

—：此项无数据。

表2 分别在ROI_{HN}、ROI_H、ROI_N下采用不同参考影像的摆位误差(P值)

方向	年龄	Imag _{CT} vs. 有膜 Imag _{cat}						Imag _{CT} vs. 无膜 Imag _{cat}		
		男			女			男		
		ROI _{HN}	ROI _H	ROI _N	ROI _{HN}	ROI _H	ROI _N	ROI _{HN}	ROI _H	ROI _N
LR	≤45岁	0.975 ^a	0.515 ^a	0.431 ^a	<0.001	0.146	<0.001	0.478	0.002	0.320
	>45~60岁	0.135	0.886	0.003	0.258	<0.001	<0.001	0.207	0.322	0.007
	>60岁	0.549 ^a	0.709 ^a	0.744 ^a	0.829	0.047	0.591	0.001	0.187	0.134
SI	≤45岁	0.222	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.669	0.824
	>45~60岁	0.337	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.169	0.003	<0.001	<0.001
	>60岁	<0.001	<0.001	0.283	<0.001	0.444	0.452	0.771	<0.001	0.031
AP	≤45岁	<0.001	0.003	<0.001	0.952	<0.001	<0.001	0.126	0.606	0.009
	>45~60岁	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.466
	>60岁	<0.001	0.026	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	0.913	<0.001	0.401
Rot	≤45岁	0.365	0.020	0.002	0.378	0.849	<0.001	0.094 ^a	0.593 ^a	0.478 ^a
	>45~60岁	<0.001	0.179	<0.001	<0.001	0.599	0.011	<0.001	0.082	0.028
	>60岁	0.035	0.449	0.144	0.105	0.001	0.057	0.236	<0.001	<0.001
Roll	≤45岁	0.001	0.008	0.003	0.068	0.888	<0.001	0.209	0.049	0.218
	>45~60岁	0.803	0.010	0.100	<0.001	<0.001	0.972	0.035	<0.001	<0.001
	>60岁	<0.001	0.264	0.804	0.519	<0.001	0.002	0.277	<0.001	0.066
Pitch	≤45岁	<0.001	0.235	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.157 ^a	0.821 ^a	0.786 ^a
	>45~60岁	<0.001	0.961	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.023	<0.001	0.969
	>60岁	<0.001	0.253	<0.001	0.635	0.399	<0.001	0.121	0.001	0.253

方向	年龄	Imag _{CT} vs. 无膜 Imag _{Cat}			Imag _{Cat} 有膜 vs. 无膜 Imag _{Cat}					
		女			男			女		
		ROI _{HN}	ROI _H	ROI _N	ROI _{HN}	ROI _H	ROI _N	ROI _{HN}	ROI _H	ROI _N
LR	≤45岁	0.305	0.001	<0.001	<0.001	0.057	<0.001	0.025	<0.001	<0.001
	>45~60岁	<0.001	0.105	<0.001	0.049	0.027	0.040	<0.001	0.006	0.001
	>60岁	0.414	0.005	0.676	0.265	0.116	0.021	0.017	0.002	0.001

续表 2 分别在 ROI_{HN}、ROI_H、ROI_N 下采用不同参考参考影像的摆位误差(P 值)

方向	年龄	Imag _{CT} vs. 无膜 Imag _{Cat}			Imag _{Cat} 有膜 vs. 无膜 Imag _{Cat}					
		女			男			女		
		ROI _{HN}	ROI _H	ROI _N	ROI _{HN}	ROI _H	ROI _N	ROI _{HN}	ROI _H	ROI _N
SI	≤45 岁	0.026	0.107	0.120	0.519 ^a	0.186 ^a	0.755 ^a	0.009	0.294	0.690
	>45~60 岁	<0.001	0.391	<0.001	0.118	0.019	0.785	0.072 ^a	0.115 ^a	0.979 ^a
	>60 岁	<0.001	0.001	0.189	0.005	<0.001	0.135	0.125 ^a	0.101 ^a	0.927 ^a
AP	≤45 岁	0.001	<0.001	0.060	0.005	0.005	0.001	0.006	0.129	0.020
	>45~60 岁	<0.001	0.252	0.003	0.357 ^a	0.148 ^a	0.806 ^a	0.001	0.018	0.012
	>60 岁	<0.001	0.010	<0.001	0.109	0.838	0.014	0.002	0.032	0.778
Rot	≤45 岁	0.023	0.006	0.035	0.225	0.013	0.933	0.014	<0.001	<0.001
	>45~60 岁	0.013	0.883	0.229	0.017	0.389	0.522	<0.001	0.373	0.080
	>60 岁	0.462 ^a	0.153 ^a	0.140 ^a	0.088	0.014	0.284	0.300	0.001	0.815
Roll	≤45 岁	<0.001	0.718	0.060	0.086	0.013	0.005	0.094 ^a	0.777 ^a	0.293 ^a
	>45~60 岁	0.006	0.007	0.118	0.323 ^a	0.346 ^a	0.936 ^a	0.191	0.134	0.032
	>60 岁	0.331	<0.001	0.010	0.006	0.428	0.943	0.454	<0.001	0.322
Pitch	≤45 岁	<0.001	<0.001	<0.001	0.007	0.106	0.197	0.395	0.862	0.010
	>45~60 岁	0.349	0.003	0.183	0.896 ^a	0.260 ^a	0.693 ^a	0.039	0.005	0.125
	>60 岁	0.379 ^a	0.820 ^a	0.657 ^a	1.000	0.683 ^a	0.083 ^a	0.001	0.021	0.178

^a: $P>0.05$ 。

表 3 Catalyst 在 ROI_{HN}、ROI_H、ROI_N 下有膜、无膜摆位误差与年龄的相关性(r 值)

方向	年龄	年龄 vs. 有膜 SE _{cat}						年龄 vs. 无膜 SE _{cat}					
		男			女			男			女		
		ROI _{HN}	ROI _H	ROI _N	ROI _{HN}	ROI _H	ROI _N	ROI _{HN}	ROI _H	ROI _N	ROI _{HN}	ROI _H	ROI _N
LR	≤45 岁	0.054	0.132	0.406	-0.033	-0.409	-0.646	0.037	0.077	0.328	0.276	0.704	0.575
	>45~60 岁	-0.086	-0.254	0.070	-0.146	-0.056	0.040	-0.039	-0.263	0.238	0.029	0.141	-0.034
	>60 岁	0.474	-0.287	-0.164	0.557 ^a	0.679 ^a	0.637 ^a	-0.019	-0.502	-0.325	0.084	0.601	-0.127
SI	≤45 岁	-0.293	-0.404	-0.336	0.124	-0.026	0.099	0.409	0.218	0.634	-0.321 ^a	-0.537 ^a	-0.601 ^a
	>45~60 岁	-0.097	-0.156	0.036	-0.005	-0.387	-0.102	0.421 ^a	0.414 ^a	0.409 ^a	0.196	-0.372	-0.227
	>60 岁	0.101	0.086	0.129	0.057	0.566	0.288	-0.627	-0.137	0.469	0.180	0.692	0.032
AP	≤45 岁	0.549	0.244	0.110	0.273	0.309	0.524	0.113	0.487	0.277	-0.130	-0.257	-0.432
	>45~60 岁	-0.157	-0.078	0.060	-0.211	0.220	0.152	-0.032	0.259	-0.265	0.186	-0.353	-0.567
	>60 岁	0.018	0.147	-0.155	-0.037	-0.488	-0.230	-0.376	-0.065	0.037	0.103	0.484	0.018
Rot	≤45 岁	0.081	0.007	-0.304	-0.104	0.563	0.603	0.014	0.549	-0.152	0.041	0.241	-0.016
	>45~60 岁	0.285	-0.010	0.021	-0.028	0.005	0.379	0.161	-0.368	0.030	0.079	0.410	0.219
	>60 岁	-0.031	-0.211	-0.159	0.198	0.348	-0.505	0.256	-0.514	-0.648	0.248	0.079	0.411
Roll	≤45 岁	-0.237	0.248	-0.543	0.017	-0.012	-0.303	0.006	-0.697	-0.212	-0.031	0.097	0.441
	>45~60 岁	-0.159	-0.076	-0.287	-0.003	-0.142	0.264	0.261	0.204	-0.369	0.103	-0.703	-0.333
	>60 岁	-0.069	-0.354	-0.172	-0.215	-0.370	-0.208	-0.368	0.152	0.021	-0.348	0.001	-0.084
Pitch	≤45 岁	0.131	-0.133	0.197	-0.237	0.199	0.146	0.024	-0.327	0.147	0.115	0.149	-0.333
	>45~60 岁	0.129	0.102	-0.076	0.398	0.106	0.437	-0.012	-0.292	-0.517	0.209	-0.062	-0.086
	>60 岁	0.056	0.191	-0.031	-0.049	-0.078	0.225	0.420	0.251	0.548	0.083	-0.725	0.282

^a: $P<0.05$ 。

表 4 在 ROI_{HN} 、 ROI_H 、 ROI_N 下的 Catalyst 无膜摆位误差 (P 值)

方向	年龄	ROI_{HN} vs. ROI_H		ROI_{HN} vs. ROI_N		ROI_H vs. ROI_N	
		男	女	男	女	男	女
LR	≤ 45 岁	0.082	0.195	0.295	0.093	0.040 ^a	0.600
	$>45\sim 60$ 岁	0.329	0.259	0.908	0.622	0.187	0.371
	>60 岁	0.420	0.017 ^a	0.381	0.041	0.266	0.710
SI	≤ 45 岁	0.351	0.015 ^a	0.148	0.141	0.951	0.015 ^a
	$>45\sim 60$ 岁	0.577	0.002 ^a	0.919	0.081	0.877	0.100
	>60 岁	0.006 ^a	0.091	0.552	0.482	0.452	0.030 ^a
AP	≤ 45 岁	0.623	0.353	0.181	0.783	0.722	0.388
	$>45\sim 60$ 岁	0.009 ^a	0.935	0.636	0.899	0.021 ^a	0.981
	>60 岁	0.418	0.245	0.587	0.486	0.428	0.060
Rot	≤ 45 岁	0.395	0.554	0.003 ^a	0.001 ^a	0.103	$<0.001^a$
	$>45\sim 60$ 岁	0.825	0.203	0.549	0.693	0.205	0.268
	>60 岁	0.211	0.012 ^a	0.635	0.147	0.740	0.002 ^a
Roll	≤ 45 岁	0.044 ^a	0.947	0.015 ^a	0.274	0.965	0.307
	$>45\sim 60$ 岁	0.276	0.064	0.487	0.005 ^a	0.649	0.608
	>60 岁	0.195	0.002	0.079	0.204	0.017 ^a	0.026 ^a
Pitch	≤ 45 岁	0.786	0.871	0.014 ^a	0.033 ^a	0.108	0.070
	$>45\sim 60$ 岁	0.180	0.081	0.535	0.071	0.557	0.005
	>60 岁	0.295	0.001 ^a	0.004 ^a	0.035 ^a	0.034 ^a	0.243

^a: $P<0.05$ 。

3 讨 论

Catalyst 表面光学成像系统通过投射不同颜色的光指导治疗师纠正患者的摆位误差,应用结构光原理进行参考影像和实时影像的配准。CBCT 与 Catalyst 引导头颈放疗摆位存在较好的相关性^[14],鼻咽癌体外误差与体内误差间也具有良好的一致性^[15],本研究中无膜 SE_{cat} 与 SE_{CBCT} 稍有差异,主要是因为 CBCT 未配准旋转方向的摆位误差。而 Catalyst 系统进行了六维方向摆位误差的配准,是否考虑旋转本身存在一定差异^[16]。本研究旨在探讨针对不同年龄、性别的头颈部肿瘤患者,Catalyst 系统采用不同配准算法、参考影像、ROI 计算的摆位误差差异。

Catalyst 系统采用不同参考影像引导头颈摆位,差异性分析发现:Imag_{CT} 与有膜 Imag_{Cat} 差异较无膜 Imag_{Cat} 更大。 ≤ 45 岁的患者在 Catalyst 无膜监测下,Imag_{CT} 替代无膜 Imag_{Cat} 仅 LR 方向应用 Algo_{ela}、Algo_{rig}2 种算法配准的无膜 SE_{cat} 无差异。CT 为断层扫描,由 DICOM 影像中提取图像边缘轮廓,再基于体素的等值面法实现三维重建^[17],扫描参数的选取和扫描时体素位置的不同对三维重建轮廓及放射治疗计划系统(TPS)自动勾画有较大影响^[18],由此导致 Imag_{CT} 和 Imag_{Cat} 存在一定差异。有报道由于鼻和前额的轮廓差异,光学监测鼻部动度更加精准^[19]; ≤ 45 岁的患者头颈部轮廓明显,LR 方向移动会引起较大轮廓曲率改变,Catalyst 系统在 2 种算法下对此信息的捕捉均较敏感,故采用 Imag_{CT} 和 Imag_{Cat} 在 LR

方向基本无差异。

以 Imag_{Cat} 为参考,Catalyst 系统采用不同算法进行摆位误差的配准,差异性分析发现:应用 Algo_{rig} 和 Algo_{ela} 的有膜 SE_{cat} 及无膜 SE_{cat} ,平移方向上,男性患者除 >60 岁时 SI 方向存在差异,其他均无差异,女性患者 LR 方向无差异,而 SI 方向差异最大;男性在 Pitch 方向无膜 SE_{cat} 差异最大。因治疗师行头颈摆位时,患者很易下巴过扬或过低,老年患者因不易配合,导致 SI 方向和 Pitch 方向易出现形变位移。PALLOTTA 等^[11]基于模体的研究报道,Algo_{rig} 和 Algo_{ela} 下的无膜 SE_{cat} 非形变位移基本无差异;形变位移中 Algo_{ela} 的无膜 SE_{cat} 在 LR、SI 和 Pitch 方向监测更准确:LR 方向误差可由 1.9 mm 降低至 1.1 mm,SI 由 1.1 mm 降低至 0.6 mm,Pitch 由 0.8° 降低至 0.4° 。由此,本研究建议将弹性算法(Algo_{ela})设置为默认算法,更能准确监测偏差,实现精准放疗。

以 Imag_{Cat} 为参考,采用 Algo_{ela} 进行摆位误差的配准,在不同 ROI 下分别分析参考影像间的差异和患者年龄对摆位误差的影响,发现采用不同 ROI 分析的结果中规律一致(均无差异)的情况较少。有学者应用 AlignRT 光学系统对头颈部模体的 2 个 ROI 进行监测后发现^[19],以鼻为 ROI,监测精度可达 (0.3 ± 0.2) mm,而以前额为 ROI,对 LR、SI、AP 3 个方向的监测均出现更大偏差,其中 SI 方向偏差最大,可达 (0.8 ± 0.5) mm,由此说明 ROI 的选择对光学监测的影响较大,与本次应用 Catalyst 系统基于头颈部肿瘤

患者的研究结果一致。本研究针对 ROI_{HN} 、 ROI_H 、 ROI_N 进一步详细分析,发现仅在 Rot 和 Pitch 方向, ≤ 45 岁的男性患者及 > 60 岁的女性患者对 ROI 及参考影像的依赖较小,这可能是由于青年男性患者面部脂肪少,轮廓明显,而女性患者面部脂肪多,随年龄增加面部脂肪量下降,老年时面部轮廓明显^[20],故在不同参考影像下的光学监测差异较小;同时常规摆位时膜具可控制头颈旋转在较小的范围,因头部旋转会牵引颈部旋转,故在不同 ROI 下 Rot 和 Pitch 方向的旋转基本无差异。 $> 45 \sim 60$ 岁的男性患者在 SI 方向,不同 ROI 分析下的无膜 SE_{cat} 与年龄均呈正相关,有学者也报道随年龄增加,皮肤弹性变弱,头颈部无膜 SE_{cat} 增大,与男性患者年龄呈正相关^[8]。ZHAO 等^[21]将面部和颈部分别行 AlignRT 光学监测,发现颈部的动度较头部更大,由此说明头颈整体的监测结果中,颈部对摆位误差的贡献更大,本研究将 ROI_{HN} 、 ROI_H 、 ROI_N 的摆位误差进行比较也发现, ROI_{HN} 与 ROI_N 的在 LR、SI、AP 方向上的无膜 SE_{cat} 基本无差异,而 ROI_H 与上述差异较大。由此,采用 Catalyst 系统引导头颈摆位时,根据患者靶区位置选择 ROI,更能提高监测精度。

综上所述,光学表面成像系统引导头颈放疗摆位具有一定的临床价值^[22-23],Catalyst 系统目前应用广泛^[24-26]。经论证,本研究建议应用 Catalyst 系统引导头颈摆位时,以 $Imag_{cat}$ 为参考(CBCT、kV-kV 等验证),在 $Algo_{cla}$ 下,选择靶区所在的特定 ROI(头、颈等),并充分暴露体表,可更精确地指导治疗师摆位。

参考文献

- [1] REITZ D, WALTER F, SCHNECKER S, et al. Stability and reproducibility of 6 013 deep inspiration breath-holds in left-sided breast cancer [J]. *Radiat Oncol*, 2020, 15(1): 1-9.
- [2] NAUMANN P, BATISTA V, FARNIA B, et al. Feasibility of optical surface-guidance for position verification and monitoring of stereotactic body radiotherapy in deep-inspiration breath-hold [J]. *Front Oncol*, 2020, 10(1): 1-9.
- [3] MCCONNELL K, KIRBY N, RASMUSSEN K, et al. Variability of breast surface positioning using an active breathing coordinator for a deep inspiration breath hold technique [J]. *Cureus J Med Science*, 2021, 13(6): 1-6.
- [4] PAZOS M, WALTER F, REITZ D, et al. Impact of surface-guided positioning on the use of portal imaging and initial set-up duration in breast cancer patients [J]. *Strahlenther Onkol*, 2019, 195(11): 964-971.
- [5] SUMNER R, PAULY M, LI H, et al. Global correspondence optimization for non-rigid registration of depth scans [J]. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2008.
- [6] NUTTI B, KRONANDER Å, NILSING M, et al. Depth sensor-based realtime tumor tracking for accurate radiation therapy [J]. *The Eurographics Association*, 2014: 1-4.
- [7] 彭海燕, 罗焕丽, 靳富, 等. 表面光学系统 Catalyst 在宫颈癌放疗中的临床应用 [J]. *中华放射肿瘤学*, 2019, 28(3): 198-202.
- [8] 何阳, 彭海燕, 靳富, 等. 放疗中皮肤弹性与摆位误差随年龄变化的相关性研究 [J]. *中华放射肿瘤学*, 2020, 29(1): 47-51.
- [9] 罗焕丽, 彭海燕, 靳富, 等. Catalyst 系统在乳腺癌患者放疗摆位应用及影响因素分析 [J]. *中华放射肿瘤学*, 2018, 27(2): 190-194.
- [10] 彭海燕, 罗焕丽, 靳富, 等. 肤色对表面光学系统引导放疗摆位的影响 [J]. *中华放射肿瘤学*, 2021, 30(12): 1297-1303.
- [11] PALLOTTA S, KUGELE M, REDAPI L, et al. Validation of a commercial deformable image registration for surface-guided radiotherapy using an ad hoc-developed deformable phantom [J]. *Med Phys*, 2020, 47(12): 6310-6318.
- [12] HARALDSSON A, CEBERG S, CEBERG C, et al. Surface-guided tomotherapy improves positioning and reduces treatment time: a retrospective analysis of 16 835 treatment fractions [J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2020, 21(8): 139-148.
- [13] KOJIMA H, TAKEMURA A, KUROKAWA S, et al. Evaluation of technical performance of optical surface imaging system using conventional and novel stereotactic radiosurgery algorithms [J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2020, 22(2): 59-68.
- [14] SWINNEN A, LLERS M C, ONG C L, et al. The potential of an optical surface tracking system in non-coplanar single isocenter treatments of multiple brain metastases [J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2020, 21(6): 63-72.
- [15] 罗焕丽, 靳富, 王颖, 等. 肿瘤放疗中体外误差与体内误差的关联性 [J]. *中国医学物理学*, 2016,

33(1):10-15.

- [16] LANGER M P, PAPIE L, SPIRVDOVICH S, et al. The need for rotational margins in intensity-modulated radiotherapy and a new method for planning target volume design [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2005, 63(5):1592-1603.
- [17] 陈作炳, 胡新宇, 李世普, 等. 利用 DICOM 图片实现 CT 图像的三维重建[J]. *武汉理工大学学报*, 2005, 27(2):52-54.
- [18] 杨大为. CT 模拟扫描参数对 TPS 系统影像重建精度的影响研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
- [19] WANG H, XU Z, GRANTHAM K, et al. Performance assessment of two motion management systems for frameless stereotactic radiosurgery[J]. *Strahlenther Onkol*, 2021, 197(2):150-157.
- [20] 邓景成, 张琪, 曹卫刚, 等. 自体脂肪移植在面部轮廓改善与年轻化中的临床应用[J]. *组织工程与重建外科*, 2015, 11(6):365-369.
- [21] ZHAO B, MAQUILAN G, JIANG S, et al. Minimal mask immobilization with optical surface guidance for head and neck radiotherapy[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2018, 19(1):17-24.
- [22] LEE S K, HUANG S, ZHANG L, et al. Accuracy of surface guided patient setup for conventional radiotherapy of brain and nasopharynx cancer[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2021, 22(5):48-57.
- [23] WEI W, IOANNIDES P J, SEHGAL V, et al. Quantifying the impact of optical surface guidance in the treatment of cancers of the head and neck[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2018, 102(3):S150.
- [24] YANG L, HAN G, SONG Q, et al. EP-2170: A feasibility study of optical surface imaging technology in radiotherapy[J]. *Radiother Oncol*, 2018, 127(1):S1198-1199.
- [25] REITZ D, CARL G, SCHNECKER S, et al. EP-1222: Intrafraction motion in CNS and HNC radiotherapy: 399 fractions using an optical surface scanner [J]. *Radiother Oncol*, 2018, 127(1):S678.
- [26] CARL G, REITZ D, SCHÖNECKER S, et al. Optical surface scanning for patient positioning in radiation therapy: a prospective analysis of 1 902 fractions[J]. *Technol Cancer Res*, 2018, 17(1):1-9.

(收稿日期:2022-06-01 修回日期:2022-08-08)

(上接第 3823 页)

- [10] ZHENG C H, HUANG G Y, ZHANG M M, et al. Effects of acupuncture on pregnancy rates in women undergoing in vitro fertilization: a systematic review and meta-analysis[J]. *Fertility and Sterility*, 2012, 97(3):599-611.
- [11] COUGHLAN C, LEDGER W, WANG Q, et al. Recurrent implantation failure: definition and management[J]. *Reproductive Bio Medicine Online*, 2014, 28(1):14-38.
- [12] 李月梅, 孟珍珍, 王冉冉. 赖新生教授通元针法治疗不孕不育经验[J]. *中国针灸*, 2015, 35(3):283-286.
- [13] 张婧怡, 陈卫东, 刘玉蕊, 等. 火针疗法的源流及现代应用[J]. *亚太传统医药*, 2016, 12(3):42-44.
- [14] 吴珮玮, 黄蜀. 火针治疗痤疮的机理研究[J]. *中国民族民间医药*, 2010, 19(10):13-15.
- [15] 李岩, 李平, 周震, 等. 火针对坐骨神经损伤模型大鼠 COX-2、IL-1 β 、BDNF 表达的干预研究[J]. *针灸临床杂志*, 2007(12):36-39.
- [16] 王丽娜, 苏雪松, 乔杰, 等. 子宫内膜内及子宫内下血流对胚胎解冻移植周期妊娠结局的影响[J]. *中国微创外科杂志*, 2012, 12(3):245-249.
- [17] 杨洋, 孙萍. IVF-ET 女性焦虑、抑郁与血清单胺类神经递质和妊娠结局关系[J]. *中国计划生育学杂志*, 2019, 27(12):1671-1674.

(收稿日期:2022-06-16 修回日期:2022-08-20)