

로봇 사이버나이프에서 위치인식시스템을 이용한 Targeting Error값 보정의 정확성 평가

순천향대학교서울병원 방사선종양학과, ¹순천향대학교부천병원 방사선종양학과

정영준 · 정재홍¹ · 임광채¹ · 조은주

목 적: 로봇 사이버나이프에서 환자의 움직임에 의한 기준점의 위치변화 오차가 위치인식시스템(target location system, TLS)을 통하여 targeting error값이 정확히 보정(correction)되는지 평가하고자 한다.

대상 및 방법: 본 실험은 targeting의 정확성을 분석하기 위해 head and neck팬텀에 Gafchromic 필름(MD-55)을 삽입한 후, 사이버나이프(CyberKnife Robotic Radiosurgery System G4, Accuray, US)의 6 MV X선을 조사하였다. 필름 분석은 Accuray사에서 제공하는 End to End (E2E) 프로그램을 이용하였다. 기준점의 위치에서 x, y, z방향으로 0±0.2 mm, roll, pitch, yaw방향으로 0±0.2° 이내로 유지하여 12회 조사한 대조군과 인위적으로 움직임을 주어 실험을 시행한 6회의 실험군의 targeting 오차를 구하고, 대조군과 실험군의 평균값에 대한 유의성을 t-검정을 통해 분석하였다. 또한, gamma-index method (dose difference: 3%)를 통해 2차원적 선량분포의 일치성을 distance to agreement (DTA)를 각각 1 mm, 1.5 mm, 2 mm로 달리하여 정량화하고, 비교 분석하였다.

결 과: E2E test 시행 결과, 기준 필름의 targeting 평균오차 0.405 mm, 표준편차 0.069 mm, 실험 필름의 평균오차 0.413 mm, 표준편차 0.121 mm으로 나왔으며, t-검정 결과 유의확률 P=0.836 (신뢰구간 95%)으로 두 집단에서 유의한 차이를 볼 수 없었다. 또한, DTA를 각각 1 mm, 1.5 mm, 2 mm로 선량분포의 일치성을 비교한 결과 기준필름 3,314개 위치에서 axial필름 평균은 각각 95.04%, 97.56%, 98.13%, sagittal필름 평균은 각각 95.47%, 97.68%, 98.47% 일치하였다. 실험필름과 비교한 결과 3,323개 위치에서 axial필름 평균은 각각 96.38%, 97.57%, 98.04%, sagittal필름 평균은 각각 95.50%, 97.87%, 98.36% 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

결 론: 로봇 사이버나이프는 치료 시 환자의 움직임에 의해 발생하는 기준점의 위치변화 오차를 실시간 추적하여 보정하며, targeting 오차를 1 mm 이내, 선량분포는 95% 이상 일치하는 정확성을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 사이버나이프, 위치인식시스템, End to End, 감마 인덱스

서 론

방사선치료에 있어서 발생할 수 있는 여러 오차 중 움직임으로 인한 기준점의 위치변화 오차는 종양조직에는 최대의 선량을 주고 정상조직에는 최소한의 선량을 조사한다는 방사선치료의 궁극적임 목적에 있어서 매우 중요한 요인이다. 실제 임상에서는 각종 고정기구 및 보조기구를 적용하여 최소한의 움직임으로 정확한 targeting을 하고자 노력하고 있다. 하지만 환자의 호흡, 자세 그리고 장시간 치료 등에 따른 환자의 움직임에 의한 오차가 생기고 있으며, 사이버나이프(CyberKnife)와 같은 고정밀 정위방사선수술을 요하는 치료

시 움직임에 의한 기준점의 위치변화 오차는 치료성적에 영향을 미칠 수 있다.^{1,2)}

본원에서 시행하고 있는 사이버나이프는 이 같은 환자의 움직임을 위치인식시스템(target locating system, TLS)을 이용하여 병변의 위치를 정확하게 인식하고 보정(correction)함으로써 환자의 set-up 오차뿐만 아니라 기준점의 위치변화 오차까지 확인이 가능한 치료 장비이다. 실시간 영상추적을 실현하는 위치인식시스템은 6차원적인 공간좌표를 인식하여 기존의 정위적 틀에 의한 좌표인식이 아닌 영상추적을 통한 위치보정이 가능하다. 이는 일정범위 내에서 움직임을 인식하고 보정함으로써 기준점에 정확한 targeting이 가능하다고 볼 수 있다.^{3,4)}

사이버나이프 제작사인 Accuray에서 권고하는 translation correction limits 값은 x (superior-inferior), y (right-left), z (anterior-posterior) 방향으로 ±10 mm, rotation correction

이 논문은 2008년 11월 3일 접수하여 2009년 1월 25일 채택되었음.
책임저자 : 정영준, 순천향대학교병원 방사선종양학과
Tel: 02)709-9416, Fax: 02)709-9414
E-mail: jungyj80@schmc.ac.kr

limits값은 roll (right-left), pitch (head up-down), yaw (cw-ccw)방향으로 각각 1°, 1°, 3°이다.⁵⁾ 실제 치료시 TLS를 이용하여 환자의 움직임에 대한 정보를 길이(mm)와 각도(°)로 나타내고, 그 표시된 값으로 manipulator에 의해 보정된다.

본 연구는 사이버나이프 치료시 기준점의 위치를 인위적으로 변화시킴으로써 TLS를 통한 보정의 정확성을 head and neck팬텀과 Gafchromic필름(MD-55, 1inch)을 이용한 End to End (E2E) test 통하여 targeting의 정확성과 필름 선량분포의 일치성을 평가해보고자 한다.

대상 및 방법

실험에 사용된 장비는 사이버나이프(CyberKnife Robotic Radiosurgery System G4, Accuray, US)를 사용하였으며, 6 MV의 X선을 800 MU/min까지 방출한다. 치료실에는 iso-center로부터 좌, 우 45° 방향으로 40~125 kVp 에너지 범위를 갖는 X선 tube가 천장에 있으며, 아모퍼스실리콘(a-Si)으로 구성된 imaging detectors가 바닥에 있다. Detector는 TLS 컴퓨터에 연결되어 매 치료시마다 재현성을 유지하고, 치료 중에는 환자의 내·외적인 움직임을 실시간 추적하는데 사용된다.

실험방법은 head and neck 팬텀을 1 mm 슬라이스 두께로 전체 CT 스캔하였고, 획득한 영상은 치료계획용 컴퓨터

(Multiplan system, Accuray, US)로 전송하여 Xsight spine tracking system으로 70%의 등선량곡선에 30 Gy 선량을 처방하였다. Mini ball-cube targeting tool에 Gafchromic필름을 axial (anterior-left, AL), sagittal (anterior-superior, AS)방향으로 삽입한 후, 팬텀의 mini cube slot에 넣고 고정시킨다. CT영상으로 디지털재구성(digital reconstruction radiography, DRR)한 영상과 치료실내 진단용 X선 장비로 획득한 영상을 fusion하여 팬텀을 CT촬영 시와 같게 유지하고, 15 mm collimator를 이용하여 총 8,113 MU를 108개의 beam 방향에서 조사하였다.

1. Targeting test

1) 대조군 선정

2008년 7월부터 2009년 6월까지 시행한 월간품질관리 (quality assurance, QA) 항목을 대조군으로 선정 하였으며, 팬텀의 움직임은 x, y, z 방향 0 ± 0.2 mm, roll, pitch, yaw 방향 $0 \pm 0.2^\circ$ 이내로 유지하여 총 12회 E2E test를 시행하였다 (Fig. 1).

2) 실험군 선정

(1) 팬텀을 x, y, z 방향으로 각각 10 mm씩 couch이동 후 고정하였고, roll, pitch, yaw 방향은 $0 \pm 0.2^\circ$ 이내로 유지하여 E2E test를 실시하였다(Fig. 2).

(2) 팬텀을 x, y, z 방향으로 각각 10 mm, 5 mm, 0 mm, -5

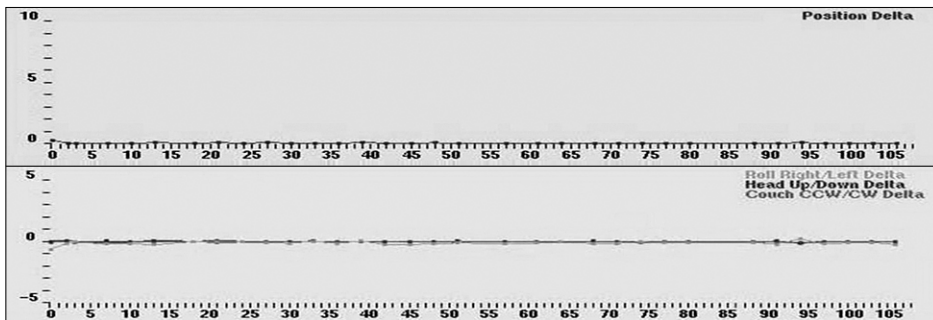


Fig. 1. Position delta result of phantom in whole therapy x, y and z directions within 0 ± 0.2 mm, roll, pitch and yaw direction $0 \pm 0.2^\circ$.

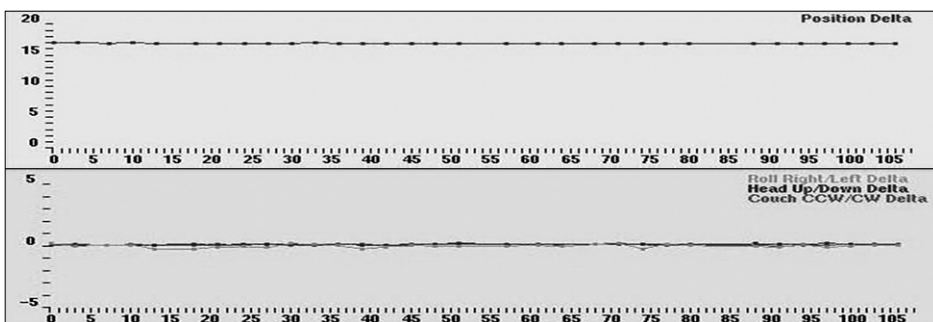


Fig. 2. Position delta result of phantom in whole therapy fixed x, y and z direction 10 mm & roll, pitch and yaw direction within $0 \pm 0.2^\circ$.

mm, -10 mm씩 3 node 마다 한 번씩 couch이동하였고, roll, pitch, yaw방향은 $0 \pm 0.2^\circ$ 이내로 유지하여 E2E test를 총 2회 실시하였다(Fig. 3).

(3) 팬텀을 x, y, z축 방향 0 ± 10 mm, roll, pitch, yaw방향 $\pm 1^\circ, \pm 1^\circ, \pm 3^\circ$ 범위에서 3 node 마다 한번씩 인위적인 움직임을 주어서 E2E test를 총 2회 실시하였다(Fig. 4).

(4) 팬텀을 x, y, z축 방향 0 ± 0.2 mm 이내로 유지하였고, roll, pitch, yaw방향은 $\pm 1^\circ, \pm 1^\circ, \pm 3^\circ$ 범위에서 인위적인 움직임을 주어서 E2E test를 실시하였다(Fig. 5).

E2E test 실시한 MD-55 필름 2장과 방사선이 조사되지 않은 MD-55 필름 1장을 동시에 스캔한다. Target ball calibration값은 AL, AS 방향 각각 15.875 mm로 하였다. 스캔한 필름은 E2E 프로그램으로 필름 선량곡선의 70%영역까지 분석

하여 targeting error값을 산출하였고, 제작사 Accuray에서 권고하는 허용치 0.95 mm 이하로 나오는지 확인하였다.⁶⁾

2. 필름 흑화도 측정

MD-55 필름의 조사선량-흑화도 특성을 측정하고자 1 inch 필름을 가위를 이용하여 4등분으로 자른 후, 선형가속기 (Mevatron, Siemens, Germany)의 6MV X선을 이용하여 10 Gy, 25 Gy, 40 Gy, 55 Gy의 선량을 조사하였다. 필름은 조직 등가물질 폴리스티렌 고체 팬텀 사이 15 mm 지점에 위치하였고, 조사야 10×10 cm², SSD (Source skin distance)는 100 cm으로 하였다. MD-55 필름은 두 개의 흡수선(615 nm, 675 nm)을 가지고 있어 흡수선량이 조사되는 동안의 온도, 조사 후 관독하는 시간의 영향을 받아 변하지만 24시간 이후에는

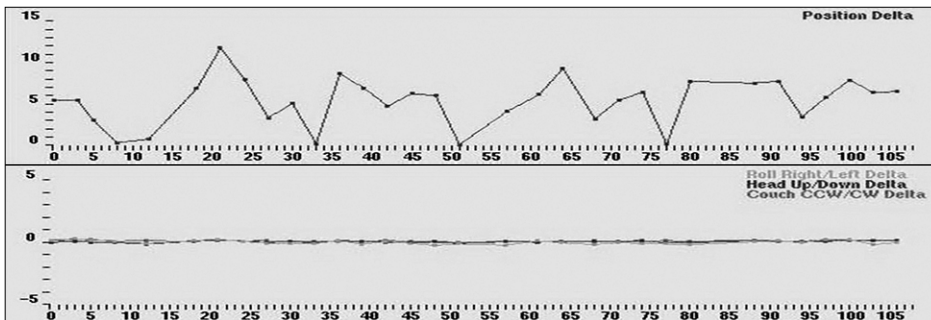


Fig. 3. Position delta result of phantom in whole therapy moved one couch in every 3 nodes (x, y and z direction 10 mm, 5 mm, 0 mm, -5 mm, -10 mm), & roll, pitch and yaw direction $0 \pm 0.2^\circ$.

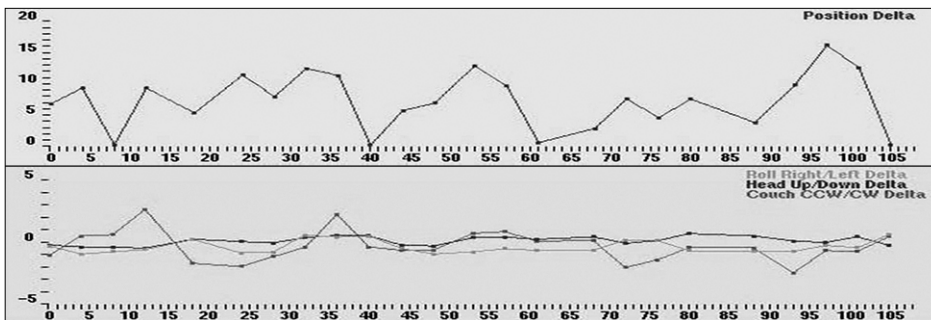


Fig. 4. Position delta result of phantom in whole therapy x, y and z directions within 0 ± 10 mm, & artificial movement in every 3 nodes (roll, pitch and yaw direction within $\pm 1^\circ, \pm 1^\circ, \pm 3^\circ$).

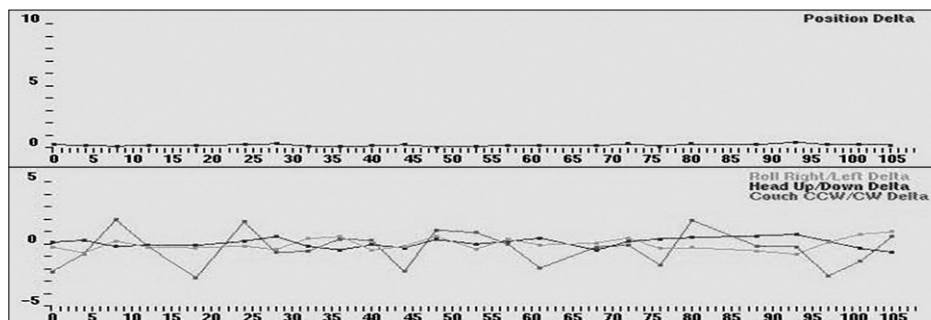


Fig. 5. Position delta result of phantom in whole therapy x, y and z directions within 0 ± 0.2 mm, & artificial movement in every 3 nodes (roll, pitch and yaw direction within $\pm 1^\circ, \pm 1^\circ, \pm 3^\circ$).

안전한 조건이 되어 변하지 않는다.⁷⁾ 이러한 근거로 조사된 필름을 24시간 이후에 광학스캐너(V700, Epson)를 이용하여 흑화도를 측정 한 후 필름특성곡선(H&D curve)를 구하였다.

3. 필름 분석

대조군에서 targeting error값이 가장 적은 AL, AS필름을 각각 선정하여 대조군과 실험군 필름의 선량분포 일치성을 확인하였다. 필름분석에는 상용화된 프로그램 Verisoft (PTW-Freiburg, ver.3.2)의 gamma index method를 이용하였고, 이때 dose difference는 3%로 하였으며, 최대선량에서 5%이하의 값은 계산에서 제외시켰다. Distance to agreement (DTA)를 1 mm, 1.5 mm, 2 mm로 달리하여 gamma값(γ -value)을

정량화하고 비교 분석하였다.⁸⁾

결 과

1. Targeting test 측정 결과

1) 대조군 targeting error값 결과

필름분석 결과 left, superior, anterior error 각각 평균 -0.104 mm, 0.011 mm, 0.075 mm를 보였으며, total targeting error 평균 0.405 ± 0.069 mm를 보였으며, 모든 값에서 허용치 이하로 나타났다(Table 1).

2) 실험군 targeting error값 결과

필름분석 결과 left, superior, anterior error 각각 평균

Table 1. Targeting error datas in contrastive group (E2E test-12 films)

	(unit: mm)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Left	-0.269	0.102	0.188	-0.336	-0.370	-0.122	-0.360	-0.180	-0.224	0.376	-0.112	0.060
Superior	0.010	-0.304	-0.287	0.030	-0.106	-0.160	0.055	-0.007	0.042	0.155	0.286	0.412
Anterior	-0.351	0.076	-0.098	0.334	-0.109	0.189	0.382	0.326	0.409	-0.073	-0.220	0.039
Targeting	0.442	0.330	0.357	0.475	0.400	0.276	0.528	0.373	0.468	0.413	0.378	0.418

Table 2. Targeting error datas in experimental group (E2E test-6 films)

	(unit: mm)					
	1	2	3	4	5	6
Left	-0.293	0.235	0.340	-0.306	-0.240	-0.178
Superior	0.260	-0.111	0.417	0.232	0.102	0.493
Anterior	-0.141	0.072	0.025	0.238	-0.062	0.080
Targeting	0.416	0.270	0.539	0.452	0.268	0.531

Table 3. Group statistics and independent samples test

	Group	N	Mean	Std. deviation	Std. error mean				
Error	Contastive group	12	.405	.069	.012				
	Experimental group	6	.413	.121	.049				
Levene's test for equality of variances		t-test for equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig	Mean difference	Std. error difference	95% Confidence interval of the difference	
								Lower	Upper
Equal variances assumed	3.269	.089	-.176	16	.863	-.008	.044	-.101	.086
Equal variances not assumed			-.146	6.676	.888	-.008	.053	-.135	.119

-0.074 mm, 0.232 mm, 0.035 mm를 보였으며, total targeting error 평균 0.413 ± 0.121 mm를 보였으며, 실험군 또한 모든 값에서 허용치 이하로 나타났다(Table 2).

실험군과 대조군의 평균값에 대한 유의성을 독립표본 t-검정을 통해 시행한 결과 유의확률 $P=0.863$ (신뢰구간 95%)으로 두 집단에서는 유의한 차이를 볼 수 없었다(Table 3).

2. 필름 흑화도 측정 결과

MD-55 필름의 흑화도를 측정한 결과는(Table 4)와 같으며, 조사선량과 흑화도의 선형적인 관계를 확인하기 위하여 4차 방정식으로 fitting하였다(식 1).

$$y = -0.0019X^4 + 0.2634X^3 - 16.156X^2 + 837.12X - (3 \times 10^{-8}) \dots \dots \dots (식 1)$$

측정값과 fitting한 공식을 이용한 계산 값의 차이는 55 Gy의 선량에서만 0.43%의 차이를 보였고, 나머지 선량에서는 일치하는 선형적인 관계를 확인 할 수 있었다(Fig. 6).

Table 4. MD-55 film exposure-density datas fitting results

Gy	Measurement	Net. measurement	Net. fitting	Gy/unit
10	21,800	7,000	7,000	0.00143
25	29,000	14,200	14,200	0.00176
40	34,400	19,600	19,600	0.00204
55	38,300	23,500	23,600	0.00233

Background 14,800 unit.

3. 필름분석

대조군에서 targeting error가 가장 적은 필름을 기준필름으로 선정하였고, anterior 0.031 mm, left 0.06 mm, anterior 0.062 mm, superior 0.007 mm, total targeting error값은 0.076 mm이었다.

기준 필름과 대조군 필름의 gamma value를 DTA 1 mm, 1.5 mm, 2 mm로 변경하여 비교한 결과 3,314개 point에서 AL필름은 평균 95.04%, 97.56%, 98.13% (Table 5) 일치하였고, AS필름은 평균 95.47%, 97.68%, 98.47% (Table 6) 일치하였다.

같은 방법으로 실험군 필름과 비교한 결과는 AL필름 3,323

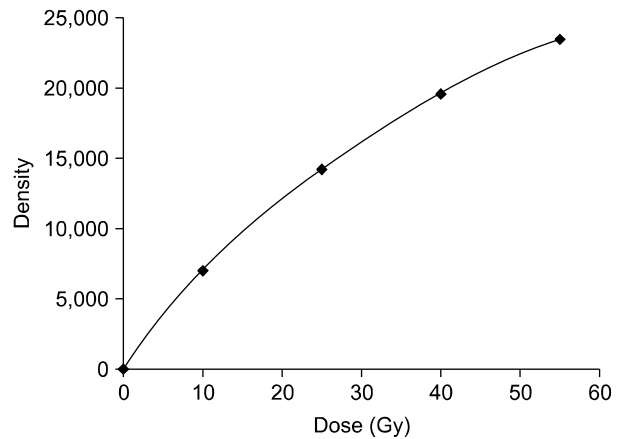


Fig. 6. Characteristic curve MD-55 film (H&D curve).

Table 5. Gamma-value of reference film and contrastive group film (AL)

DTA	Percentage of passing gamma value (%)											Mean
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1 mm	98.52	93.74	97.15	96.25	95.97	96.28	96.16	96.96	93.30	92.04	92.57	95.04
1.5 mm	99.00	96.84	98.27	98.24	98.12	98.09	97.03	98.29	96.48	97.32	96.88	97.56
2 mm	99.30	97.80	98.43	98.73	98.43	98.43	97.76	98.44	97.09	98.14	98.08	98.13

DTA: Distance to agreement

Table 6. Gamma-value of reference film and contrastive group film (AS)

DTA	Percentage of passing gamma value (%)											Mean
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1 mm	97.19	97.61	96.70	96.49	97.13	97.03	92.58	93.64	95.16	94.20	92.43	95.47
1.5 mm	97.97	98.67	98.00	97.70	98.67	97.88	96.00	97.92	97.78	97.11	96.79	97.68
2 mm	98.34	98.88	98.49	98.15	98.94	98.21	97.70	99.19	98.53	98.94	97.78	98.47

Table 7. Gamma-value of reference film and experimental group film (AL)

DTA	Percentage of passing gamma value (%)						Mean
	1	2	3	4	5	6	
1 mm	94.89	93.42	95.76	97.84	97.81	98.53	96.38
1.5 mm	96.88	95.56	97.12	98.80	98.20	98.83	97.57
2 mm	97.45	96.19	98.20	99.01	98.39	98.98	98.04

Table 8. Gamma-value of reference film and experimental group film (AS)

DTA	Percentage of passing gamma value (%)						Mean
	1	2	3	4	5	6	
1 mm	95.58	96.21	93.42	96.70	92.70	98.41	95.50
1.5 mm	98.17	97.96	98.01	98.08	96.21	98.80	97.87
2 mm	98.50	98.17	98.89	98.44	97.18	98.95	98.36

개 point에서 평균 96.38%, 97.57%, 98.04% (Table 7) 일치하였고, AS필름 평균 95.50%, 97.87%, 98.36% (Table 8) 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

라 생각된다.

고안 및 결론

최근 방사선치료의 원칙은 방사선치료율을 높이고자 종양에는 더 많은 선량을 주며 주위의 정상조직에는 선량을 최소화하여 부작용을 줄이는 것이다. 이를 위해 정확하게 종양을 정의하는 것이 필요하고 목표로 삼은 종양에 정확하게 치료를 시행하는 것이 필요하다.

본 실험은 E2E test 및 gamma-index method를 이용하여 사이버나이프의 정확성을 평가, 분석하였다. 사이버나이프는 치료 중 발생하는 환자의 움직임에 대하여 1 mm 이내의 오차로 보정할 수 있고, 움직임 보정에 따른 2차원 선량분포도 기준분포와 95% 이상 일치하는 것으로 나타났다.

그러나 TLS를 이용한 환자의 위치 확인 X선 조사 후, 6 MV 에너지의 치료용 X선이 조사되기까지 평균 8초의 시간 간격이 있기 때문에 이 시간 내에 움직임에 대한 보정은 이루어 지지 않아 완벽한 실시간 치료를 구현하지 못하는 문제가 있다. 이러한 문제는 software의 업그레이드, 고정기구나 각종보조기구를 이용해 환자의 움직임을 최소화하고, 매 node마다 X선을 조사해 환자의 미세한 움직임도 감지하여 치료를 진행함으로써 정확도를 더욱 향상시킬 수 있을 것이

참고문헌

1. Hoogeman.MS, Nuyttens JJ, Levendag PC, Heijmen BJ: Time dependence of intrafraction patient motion assessed by repeat stereoscopic imaging. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2008; 70(2):609-618
2. 김경태, 주상규, 안재홍, 박영환: 환자 SET-UP ERROR에 따른 선량분포와 DVH 변화분석. *대한방사선치료기술학회지* 2004;16(2):81-89
3. 장지선, 이동한, 강영남 등: 사이버나이프의 품질관리 절차서 개발. *대한방사선종양학회지* 2006;24(3):185-191
4. Calcerrada DSN, Blasco AJA, Cardiel GA, Andradas AE: The safety and efficacy of robotic image-guided radiosurgery system treatment for intra and extracranial lesion: A systematic review of the literature. *Radiother Oncol* 2009;89(3):245-253
5. Accuray Inc. Treatment Delivery In. *CyberKnife Treatment Delivery Manual*. 2008;50-51
6. Accuray Rev. J. *CyberKnife SRS system acceptance tests*. 2007
7. 한승희, 조병철, 박석원 등: 선형가속기를 이용한 정위 방사선 치료 시 Gafchromic film을 이용한 선량측정. *대한방사선종양학회지* 2003;21(2):167-173
8. Sankar A, Goplakrishna Kurup PG, Murali V, et al.: Evaluation of Gafchromic EBT film for intensity modulated radiation therapy dose distribution verification. *Med Phy* 2006;31(2):78-82

Abstract

Evaluation on the Accuracy of Targeting Error Correction Through the Application of Target Locating System in Robotic CyberKnife

Young Joon Jeong, Jae Hong Jung¹, Kwang Chae Lim¹, Eun Ju Cho

Department of Radiation Oncology, SoonChunHyang University Hospital, Seoul,

¹Department of Radiation Oncology, SoonChunHyang University Hospital, Bucheon, Korea

Purpose: The purpose is to evaluate the accuracy of correcting the targeting error through the Target Location System (TLS) for the location change error of the reference point which arises from the movement or motion of patient during the treatment using the CyberKnife.

Materials and Methods: In this test, Gafchromic MD-55 film was inserted into the head and neck phantom to analyze the accuracy of the targeting, and then the 6 MV X-ray of CyberKnife (CyberKnife Robotic Radiosurgery System G4, Accuray, US) was irradiated. End to End (E2E) program was used to analyze the accuracy of targeting, which is provided by Accuray Corporation. To compute the error of the targeting, the test was carried out with the films that were irradiated 12 times by maintaining the distance within the range of 0 ± 0.2 mm toward x, y, z from the reference point and maintaining the angle within the range of $0\pm 0.2^\circ$ toward roll, pitch, yaw, and then with the films which were irradiated 6 times by applying intentional movement. And the correlation in the average value of the reference film and the test film were analyzed through independent samples t-test. In addition, the consistency of dose distribution through gamma-index method (dose difference: 3%) was quantified, compared, and analyzed by varying the distance to agreement (DTA) to 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, respectively.

Results: E2E test result indicated that the average error of the reference film was 0.405 mm and the standard deviation was 0.069 mm. The average error of the test film was 0.413 mm with the standard deviation of 0.121 mm. The result of independent sampling t-test for both averages showed that the significant probability was $P=0.836$ (confidence level: 95%). Besides, by comparing the consistency of dose distribution of DTA through 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, it was found that the average dose distribution of axial film was 95.04%, 97.56%, 98.13%, respectively in 3,314 locations of the reference film, consistent with the average dose distribution of sagittal film that was 95.47%, 97.68%, 98.47%, respectively. By comparing with the test film, it was found that the average dose distribution of axial film was 96.38%, 97.57%, 98.04%, respectively, at 3,323 locations, consistent with the average dose distribution of sagittal film which was 95.50%, 97.87%, 98.36%, respectively.

Conclusion: Robotic CyberKnife traces and complements in real time the error in the location change of the reference point caused by the motion or movement of patient during the treatment and provides the accuracy with the consistency of over 95% dose distribution and the targeting error below 1 mm.

Key words: CyberKnife, target location system, End to End, gamma-index