

전자포탈영상을 이용한 다엽시준기의 정도관리

가톨릭대학교 의과대학 의공학교실*,
 Department of Radiation Oncology[†], Ireland Cancer Center,
 Case Western Reserve University

진호상* · Jason W. Sohn[†] · 서태석* · 최보영* · 이형구*

삼차원 입체조형방사선치료나 세기조절방사선치료와 같은 다엽시준기(Multileaf Collimator, MLC)를 이용하는 보다 복잡한 방사선 치료 기술은 다엽시준기의 위치 및 운동의 검증의 중요성을 증가시키고 있다. 이러한 다엽시준기의 검증은 신뢰성과 그동안 축적된 경험적 검증능력으로 인하여 주로 필름을 가지고 수행되어왔다. 그러나 전자포탈영상장치(Electronic Portal Imaging Device, EPID)의 사용의 편이성과 디지털 영상 제공 능력은 낮은 임상편이성, 효율성, 비용대 수익률에도 불구하고 정기적인 정도확립(Quality Assurance, QA)에 현실적인 필름의 대체재로 관심을 모아왔다. 본 연구에서는 EPI를 활용한 다엽시준기의 정기적인, 특히 일간 정도확립법을 개발하였다. 정기적 정도확립을 위한 전자포탈영상(Electronic Portal Imaging, EPI)의 적용가능성에 대한 검증은 방사선 조사시 동시에 획득된 필름과 다엽시준기의 제어장치에 입력한 다엽시준기의 처방과의 비교를 통해 수행되었다. 특별히 설계된 두가지 형태의 시험형(test pattern)이 영상 획득 및 비교에 적용되었다. 정성적인 온라인 육안 검증과 함께 윤곽 검출 알고리즘을 이용한 정량적인 오프라인 분석이 검증 절차에 이용되었다. 결론적으로, 본 연구에서 개발된 EPI를 이용한 다엽시준기의 일간 정도확립법은 필름의 정확도를 가지고 편리하게 수행될 수 있었다.

중심단어 : 전자포탈영상, 필름, 다엽시준기, 정도확립

서 론

다엽시준기(multileaf collimator, MLC)를 사용하는 입체조형방사선치료나 세기조절방사선치료(intensity modulated radiation therapy, IMRT)에서 중요한 것 중의 하나는 치료하는 다엽시준기의 위치와 움직임의 신뢰도이다. 이러한 정확성을 보장하기 위해서 다엽시준기의 정도관리(quality assurance, QA)는 주기적으로 이루어져야 한다. 필름과 전자포탈영상장치(electronic portal imaging device, EPID)는 이러한 다엽시준기의 정도관리에 가장 일반적인 도구들이다.

다엽시준기의 움직임 및 위치의 선량 및 기계적 검증에 대한 연구들이 필름과 전자포탈영상(electronic portal image, EPI)를 이용하여 수행되어 왔다. 필름과 EPID를 이용한 다엽시준기의 위치 검증은 세기조절방사선치료에서 매우 중요한環節 중에 하나이다.¹⁻³⁾ Partridge⁴⁾ 등은 변형된 상업 영상

장치들의 잎추적법(leaf-tracking method)을 이용하여 선형가속기를 사용한 동적다엽시준(dynamic multileaf collimation, dMLC) 빔 조사에 활용하였다. Zhou 등⁵⁾에 의해 EPID를 활용한 새롭고 신뢰성 있는 다엽시준에 대한 MLC 위치검증법이 개발되기도 하였다. Partidge 등⁶⁾은 동적다엽시준법의 검증을 위해 'dynamic wedge'와 비균질한 세기 분포를 가지는 작은 조사면을 활용하였다. Heijmen⁷⁾ 등은 포탈 선량과 EPID를 이용하여 측정된 영상의 그레이 스케일(gray scale) 값의 연관성을 밝히기도 하였다. 외부 빔조사 방사선치료시 EPID를 이용하여 포탈 선량을 측정하는 것이 선형가속기에 대한 정기적인 선량 정도관리와 치료의 검증에 활용될 수 있다는 점이 Pasma와 Kirby 등에 의해 연구되었다.^{8,9)} Chui 등¹⁰⁾은 필름 위의 선량도표를 활용하여 정기적인 정도관리법을 설명하였으나 단지 정성적인 시각적 검증만을 활용하였다. Yin¹¹⁾ 등은 네 곳의 치료부위(폐, 골반, 뇌, 두경부)에 대한 전자포탈영상과 필름영상간의 임상적 효율성에 대한 비교연구를 수행하였다.

윤곽 검출법은 포탈영상에서 다엽시준기의 잎에 의한 조사면 가장자리를 찾는 널리 활용되는 방법이다. 윤곽 검출을 위한 1차원 Laplacian-of-Gaussian (LoG) 연산자가 이것을 위해 Eilertsen 등에 의해 활용되기도 하였다.¹²⁾ James¹³⁾ 등은 전자포탈영상의 화소값의 도수분포표(histogram)에서 배

* 본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(200108902) 연구비 지원에 의해 수행되었음

† 논문은 2003년 5월 28일 접수하여, 2003년 7월 9일 채택됨.

책임저자: 서태석, (137-701) 서울특별시 서초구 반포동 505

가톨릭대학교 의과대학 의공학교실

Tel : 02)590-2414, Fax : 02)532-1779

E-mail : suhsanta@catholic.ac.kr

경 영상 화소값의 최대값과 방사선 조사면 영상 화소값의 최대값 사이에 뚜렷한 구별을 나타내는 값을 기준으로 영상을 분석하여 잎 움직임방향을 알 수 있다는 것을 보였다. 포탈 영상의 조사면 윤곽검출을 위하여 Bijhold¹⁴⁾ 등은 포괄적인 통계적 정보와 네가지 Sobel compass 필터의 반응을 사용하는 두위상법(two phases method)을 사용하기도 하였다.

필름을 사용하는 다엽시준기 정도관리법은 신뢰성과 오랜 임상경험에도 불구하고 몇 가지 제약을 가진다. 필름을 이용하는 법은 선량조사에 대한 육안검증이기 때문에 정량적 분석을 위해서는 디지털화가 필요하다. 또한 현상하는데 일정 정도 시간을 요하고 필름의 저장을 위한 공간을 필요로 한다.¹⁵⁾ 전자포탈영상장치들은 이러한 필름의 단점을 극복하는 현실적인 대체재로서 각광을 받아왔다. 본 연구에서는 전자포탈영상이 필름영상을 대체할 수 있는지에 대해 알아보고자 했다. 다엽시준기 제어기에 개발된 두 가지 시험형(test pattern)을 전송하여 필름영상 및 전자포탈영상을 획득하고 기존의 실험에서 조사면 윤곽 검출에 활용된 적이 없는 윤곽검출력이 뛰어난 Canny 연산자를 활용하여 조사면 윤곽검출을 수행하였다. 따라서 본 연구의 목적은 (1) 필름영상과 전자포탈영상 위의 다엽시준기의 위치를 처방된 선형가속기의 다엽시준기 위치와 비교하는 간단한 치료 직전 일간 다엽시준기 정도관리법을 제시하는 것이며, (2) 전자포탈영상이 필름을 대체할 수 있는지 검증해보기 위한 것이다. 전자포탈영상이 선량 검증에 활용되기도 하는데 이는 매우 복잡한 절차를 요하므로⁴⁾ 본 연구의 범위를 벗어나는 것이다.

재료 및 방법

1. 사용된 장비 및 재료

방사선 조사를 위하여 80쌍의 다엽시준기가 장착된 Varian Clinac 2300C (Varian Associates Inc., 미국)을 활용하였다. 방사선을 조사하는 필름연구를 위하여 Kodak V 필름 (Eastman Kodak Co., 미국)을 전자포탈영상 연구를 위한 전자포탈영상장치로는 매트릭스 액체충전 이온전리함(matrix liquid-filled ion chamber)형을 활용하였다. 전자포탈영상을 얻기 위한 컴퓨터 소프트웨어로 PortalVisionTM (Varian Associates Inc., 미국)을 활용하였다. 이 소프트웨어를 활용하여 전자포탈영상은 raw data로 획득된 후 영상의 비교를 위하여 JPEG형식의 영상파일로 변형하였다. 필름영상과 전자포탈영상은 총 300 MU (moniter unit)의 방사선을 조사하여 동시에 획득하였다. 필름영상은 EPID의 표면에 밀착하여 획득하여 거리에 따른 두 영상간의 차이를 가능하면 배제

하도록 하였다. SSD (source to detector distance)는 120 cm이었으며 간단한 실험법을 제공하기 위해 방사선원과 조사면 사이에 어떠한 buildup 물질도 놓지 않았다. 다엽시준기의 움직임을 제어하기 위하여 두 가지 유형의 시험형 파일을 개발하여 다엽시준기 제어기에 적용하였다.

2. 다엽시준기 두 가지 시험형

특별하게 설계된 두 가지 유형의 시험형이 다엽시준기 제어기에 적용되었다. 각 시험형은 방사선이 조사되는 동안 18개의 다엽시준기 분절(segment)를 가진다. 시험형 1에서는 모든 잎 쌍들이 왼쪽에서 오른쪽으로 움직이며, 우리의 주요 관심영역(region of interest, ROI)인 다엽시준기가 정지되어 선도잎(leading leaf; leaf B)와 추적잎(trailing leaf; leaf A) 간의 간격이 1 mm이고 서로 2 cm의 간격을 가지는 5개의 분절에서만 방사선 조사가 이루어진다. 시험형 2는 움직임이 시험형 1과 동일하나, 처방된 값과 영상 위의 다엽시준기의 간격의 관계를 알 수 있도록 중심부에 각각 2, 3, 4 mm의 간격을 가지는 2개씩의 잎 쌍을 가진다(Fig. 1). 조사면의 크기는 총 80개 중 14개의 유효 잎 쌍이 나타나는 15×15 cm² 이었다. 설명의 편의를 위해 영상의 맨 위쪽 온전한 잎 쌍이 영상에 나타나는 것에서부터 잎1로 번호를 부여하였고 맨 아래쪽을 잎14로 명명하였다. 영상의 획득은 통계적 분석을 위해 각 시험형당 5번씩 수행하였다.

3. 다엽시준기 위치의 정성적 검증

정성적 분석을 위해 두 가지 형태의 육안검증을 수행하였다. 첫 번째는 기존의 연구에서 활용한 것과 같은 Fig. 1을 활용한 육안검증이였다. 육안검증에서는 영상 전체의 화소값

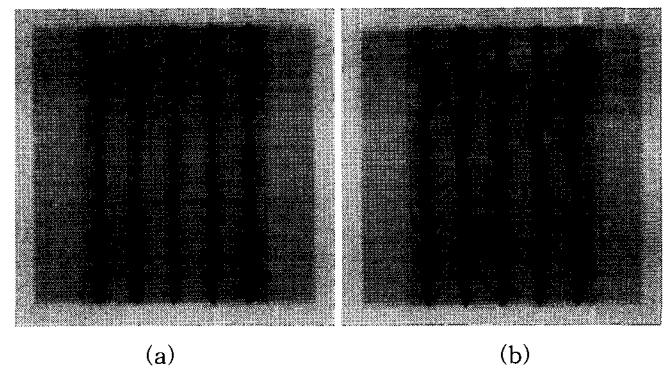


Fig. 1. Film images of (a) test pattern 1 and (b) 2. All the beam widths in test pattern 1 are 1 mm in five regions of interest (ROIs). Test pattern 2 has the beam widths of 2 mm, 3 mm and 4 mm of two leaf pairs in the central ROIs.

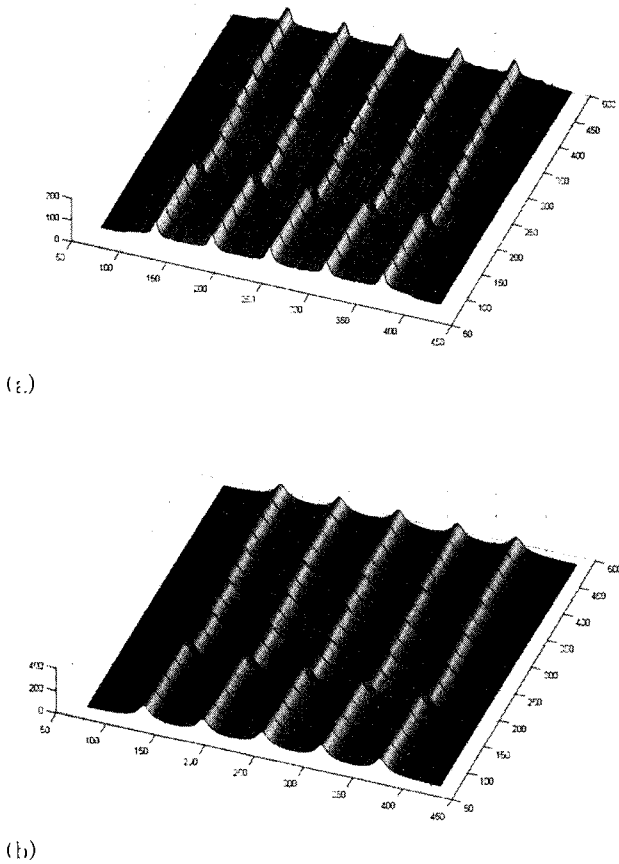


Fig. 2. 3D dose profiles of test pattern 2. (a) Film image and (b) EPI are presented for visual inspection with the function of rotation by arbitrary angle. The center line of each leaf trajectory was scanned and interpolated by the width of the each leaf. The EPID shows smoother profile than film.

의 균질성을 통해 다엽시준기의 움직임과 선형가속기의 방사선 조사가 처방대로 이루어지는지를 검증하고, 관심영역에서 잎끝들이 만드는 수직선을 통해서 다엽시준기가 정확히 처방위치에 놓이는지를 검증하게된다. 더 나은 검증을 위해서 삼차원 선량도표를 Fig. 2와 같이 만들었다. 삼차원 선량도표를 활용하기 위해서는 먼저 두 가지 영상간의 정합을 수행해야 한다. 전자포탈영상은 영상의 시야(field of view, FOV)가 $25 \times 25 \text{ cm}^2$ 이고 행렬의 크기가 256×256 이므로 1 mm의 정사각 화소크기를 가진다. 디지털 스캔한 필름영상의 영상 행렬의 크기는 512×512 이고 화소의 크기는 0.38 mm이다. 방사선 조사간 동시에 획득된 전자포탈영상과 필름영상을 비교하기 위하여, 둘간에 강체 변형(rigid-body transformation)의 하나인 점맞춤법(point matching method)을 활용하여 영상 정합을 수행하였다(Fig. 3). 영상의 윤곽 검출을 수행한 후 각 영상의 마주 보는 두 모서리의 점을 맞춤의 참조점으로 삼아 두 영상간의 확대, 회전, 이동을 수행하였다. 영상 정합을 수행하기 위해서 가장 먼저 두 마주 보는 점들 사이의 거리를 비교하여 확대비율을 결정하여 전자포탈영상의 확대를 수행한다. 그후 두 점을 잇는 선들의 기울기로부터 각의 차이를 결정하여 전자포탈영상의 회전을 시행한 후, 좌측 모서리 참조점의 상하, 좌우의 좌표 차이만큼 전자포탈영상의 이동을 수행하여 영상을 정합하였다.

4. 정량적 분석

정량적 분석을 위하여 필름영상과 전자포탈영상에 나타난 관심영역에서의 다엽시준기 잎들의 위치와 잎간격을 추출하여 처방과 비교하였다. 영상들로부터 잎 위치와 잎간격을 추출하기 위하여 조사면 영상의 반응영에서의 최대 구배를 잎

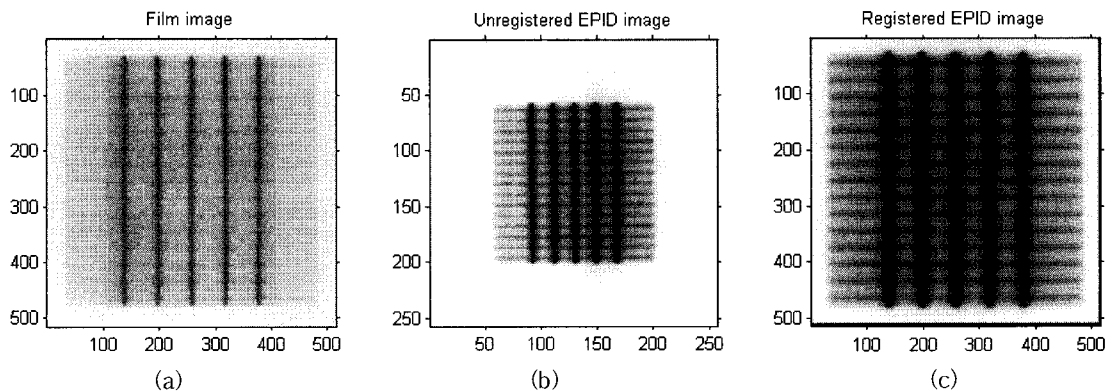


Fig. 3. Image registration between film and EPI. (a) Original film image 512×512 matrix and 0.38 mm pixel size. (b) Original EPI with 256×256 matrix and almost 1mm pixel size. (c) Registered EPI using a point matching algorithm. The registration and comparison software was written in MATLAB (Mathworks, Natick, MA).

진호상 외 4인 : 전자포탈영상을 이용한 다엽시준기의 정도관리

위치의 참조점으로 삼았다. Fig. 4는 다엽시준기의 정보를 얻기 위하여 영상 정합후 필름과 전자포탈영상을 윤곽검출을 수행한 결과를 보여준다. 두 개의 문턱값을 가지는 Canny 윤곽검출기가 최적의 윤곽검출을 위해 사용되었다.^{16, 18)} Canny 윤곽검출기는 다음과 같이 작동한다. 윤곽을 추출하고자 하는 영상을 Gaussian convolution을 이용하여 먼저 부드럽게 한다. 그리고 나서 높은 1차 공간 미분계수를 가지는 영상의 부분을 강조하기 위하여 간단한 2차원 일차 미분계수 연산자를 부드럽게한 영상에 적용한다. 윤곽들은 영상 내에서 마루(ridge)를 형성한다. 그러면 연산자는 이러한 마루의 정상에 따라 움직이며 마루에 놓이지 않은 모든 화소값을 0으로 한다. 이러한 추적 절차는 두 개의 문턱값인 TH와 TL (TH > TL)을 갖는 이력 현상(hysteresis)을 나타낸다. 검출은 TH보다 높은 화소값을 갖는 한 점으로부터 마루의 높이가 TL보다 낮아지는 점까지 양쪽방향으로 계속된다. 이러한 조건을 만족하는 점들이 윤곽으로 검출되게 된다. 이진영상의 검출된 윤곽들은 두 잎간의 간격을 계산하기 위하여 사용되었고 처방된 잎간격과 비교되었다. 본 연구에서는 영상에서 검출된 잎간격은 Fig. 6에서와 같이 5개의 관심영역에서 세기도표의 FWHM (full width at half maximum)와 일치한

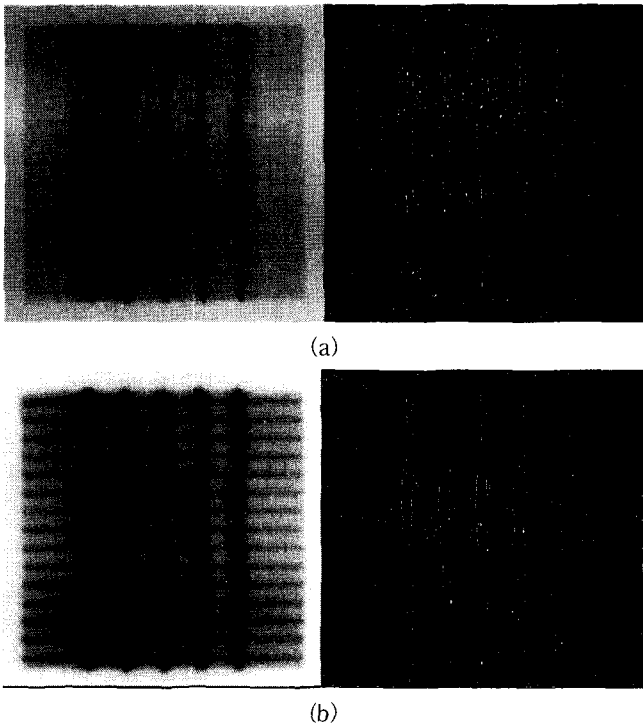


Fig. 4. Edge detected images of (a) a film image and (b) an EPI by the Canny edge detector (Images of test pattern 2). A film image has relatively more noises than an EPI.

다. 전자포탈영상의 정거적 정도관리에의 이용가능성은 전자포탈영상의 FWHM을 필름영상에서의 추출된 FWHM에 의한 잎간격과 비교하여 검증하였다.

Partridge⁶⁾ 등은 다엽시준기 잎들의 위치 정확성을 결정하는 값들로 각 잎의 전체 평균위치에 대한 상대적 편차, 평균으로부터의 계통적 편차, 그리고 처방된 위치와 비교된 각 잎의 절대 편차와 같은 세 가지 방법을 제안하였다. 다른 연구^{2, 4)}에서 그들은 잎의 위치의 정확성을 측정하여 분석하는데 사용되는 계통오차(systemic error)와 임의오차(random error)를 구하는 법을 설명하였다. 이 방법에 의하면 주어진 영상 프레임 f에 대하여 주어진 잎 l의 처방된 위치를 P_{l,f}라고 하고 측정된 잎의 위치를 M_{l,f}라고 하면 단위 영상 프레임, 단위 잎 당 잎 위치의 절대 오차는 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon_{l,f} = M_{l,f} - P_{l,f} \dots\dots\dots (1)$$

모든 잎에 대하여 평균한 단위 영상 프레임당 계통 오차는 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\epsilon}_f = \frac{1}{L} \sum (M_{l,f} - P_{l,f}) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 L은 전체 잎의 숫자이며 본 연구에서는 관심영역의 잎의 수가 14이기 때문에 L=14를 사용하였다. 유사하게 각각의 잎당 모든 영상 프레임에 대하여 평균한 계통 오차는 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\epsilon}_f = \frac{1}{F} \sum (M_{l,f} - P_{l,f}) \dots\dots\dots (3)$$

여기서 F는 총 영상 프레임으로 5번 영상을 획득하여 비교하였기 때문에 F=14가 본 연구에 사용되었다. 한편, <M>를 평균 측정된 위치로부터의 제곱평균제곱근 편차라고 하고, <M_l>_f를 주어진 영상 프레임에 대한 모든 잎에 대하여 평균한 위치로부터의 편차라고 하며, <Mf>_l를 주어진 잎에

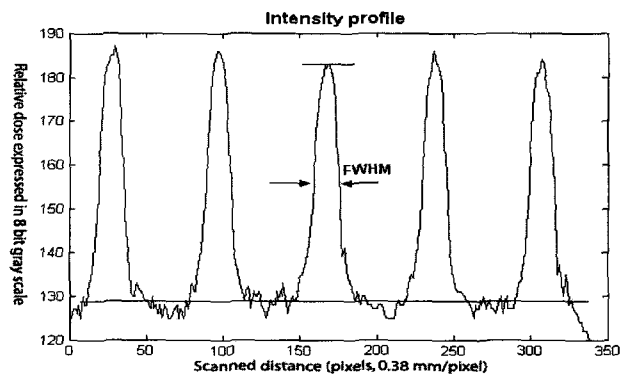


Fig. 5. Horizontal intensity profile of an image showing full width at half maximum as an indicator of real beam width.

대한 모든 영상 프레임에 대하여 평균한 잎의 위치라고 하면 임의오차는 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\sigma}_j = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum (M_{l,i} - \langle M_l \rangle)^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\bar{\sigma}_i = \sqrt{\frac{1}{F-1} \sum (M_{l,i} - \langle M_l \rangle)^2} \dots\dots\dots (5)$$

또한, 전체 계통오차와 임의오차는 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\varepsilon}_T = \frac{1}{L \times F} \sum \sum (M_{l,i} - P_{l,i}) \dots\dots\dots (6)$$

$$\bar{\sigma}_T = \sqrt{\frac{1}{L \times F - 1} \sum \sum (M_{l,i} - P_{l,i})^2} \dots\dots\dots (7)$$

유사하게 본 연구에서도 영상획득당 모든 잎들(Fig. 6(a), (b)) 혹은 각 잎당 모든 영상획득(Fig. 6(c), (d))의 평균 잎 위치와 잎간격의 평균편차를 계통오차로 정의하였다. 임의오

차로서는 각 경우에 해당하는 계급 평균의 계급근(root mean square, rms)으로 정의하였다. 이와 더불어 상기 논문 들에서 보인 것처럼 잎 위치와 잎간격 전체의 평균편차와 전체의 계급 평균의 계급근 편차를 계통오차와 임의오차의 단순한 확장 계산에 의하여 계산할 수 있다.

5. 일간 정도관리법

본 연구에서 활용한 일간 정도관리법은 치료 전에 획득된 영상 위의 FWHM와 잎의 위치를 다엽시준기 처방과 비교하여 잘못된 곳을 찾는 것이다. 이를 수행하기 위해서 측정된 FWHM과 처방과의 관계식이 필요하다. Table 1는 전체 영상획득과 전체 잎에 대한 관심영역에서의 처방된 잎간격에 따른 영상의 FWHM의 전체 평균값이다. 본 연구에서는 Fig. 8에서와 같이 처방값과 이에 상응하는 FWHM사이의

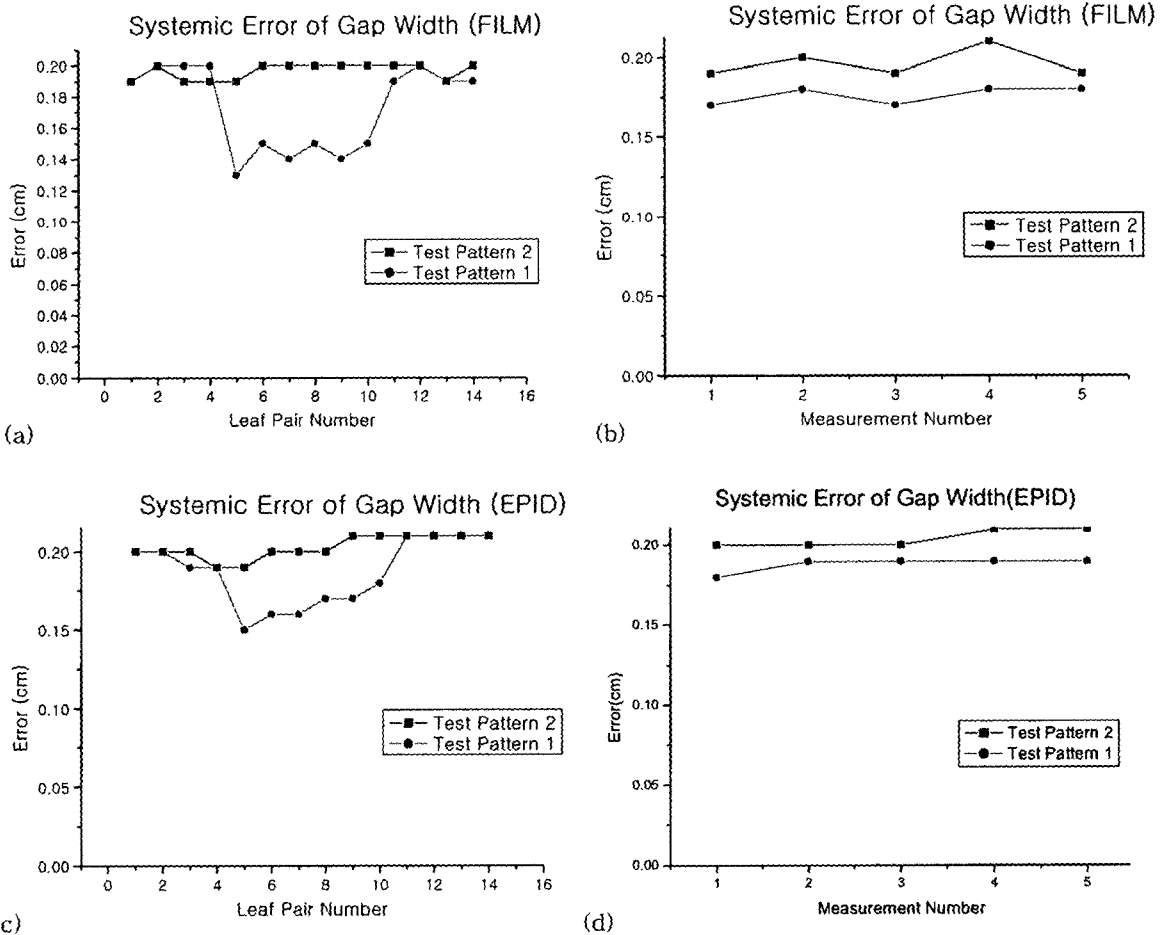


Fig. 6. Systemic errors of beam width. Figure (a) and (c) are the systemic errors along leaf pairs and figure (b) and (d) are the systemic errors by image acquisition. Images were acquired five times for each test pattern. From figures (a)-(d), we concluded that, under the condition of narrow beam width, the FWHM of dose intensity profile of the film and EPID images and the prescribed beam width have a single relation equation but there is a reasonable margin by which it can be referred to the real MLC leaf positions.

진호상 외 4인: 전자포탈영상을 이용한 다엽시준기의 정도관리

관계식을 최소자승법을 활용한 일차 선형식으로 근사시켜 구하였다. 이 식은 2 mm의 처방에서 약간의 차이를 나타내었지만 전체적으로 잘 맞는 식임을 알 수 있다. 이식으로부터 FWHM에서 실제 일간격을 추측하여 처방과의 차를 바탕으로 이상(異常)일위치도표를 그리게 된다.

결 과

1. 정성적 분석

이차원 영상과 삼차원 선량 도표인 Fig. 1와 2에서 알 수 있듯이 필름영상이 전자포탈영상보다 화소값의 범위가 넓고 삼차원 영상에서 보이는 것처럼 관심영역의 옆 틈에서 더 좁고 날카로운 봉우리를 나타냄을 알 수 있었다. 두 영상의 관심영역이외에서 화소값의 균질성에서 알 수 있듯이 다엽시준기가 잘 작동했으며 방사선 조사가 잘 제어되었음을 나타낸다. Fig. 2의 3차원 선량도표와 Fig. 4의 윤곽검출 영상에서 필름영상이 전자포탈영상보다 더 많은 잡음(noise)을 가지는 것을 확인할 수 있었으나 일간격 검출 실험 결과에 커다란 영향을 미치는 정도는 아니었다. 정성적인 육안 검사에서는 다엽시준기의 일들이 처방된 궤적과 위치에 따라 잘 제어되었음을 확인할 수 있었다.

2. 정량적 분석

윤곽검출을 통해 구한 각 영상의 FWHM은 본래 처방된 다엽시준기의 일간격보다 더 큰 값을 나타내었다. 또한 전자

Table 1. Comparison of gap width among the prescription and the FWHMs of portal images in test pattern 2

Prescribed gap width	Mean FWHM of film imag	Mean FWHM of EPI
1.0 mm	3.0 mm	3.1 mm
2.0 mm	3.5 mm	3.8 mm
3.0 mm	4.5 mm	4.8 mm
4.0 mm	5.5 mm	5.6 mm

Table 2. The total mean deviation and the total rms deviation. This result shows there are significant differences between FWHM of portal images and the prescribed beam width

Compared modality	Test pattern 1		Test pattern 2	
	Mean deviation	RMS deviation	Mean deviation	RMS deviation
Portal film	2.0 mm	0.16 mm	1.7 mm	0.32 mm
EPI	2.0 mm	0.17 mm	1.9 mm	0.28 mm

포탈영상의 FWHM이 필름의 FWHM보다 약간 더 큰 값을 나타내었다. Fig. 7의 (a)-(d) 그래프는 각각 필름과 전자포탈 영상에서 추출된 FWHM에서 처방된 일간격을 뺀 값들의 계통오차를 나타낸다. 이 값들은 일간격이 커짐에 따라 같이 증가하는 모습을 보였다. 필름영상과 전자포탈영상에 의한 전체 평균 편차와 전체 제곱 평균의 제곱근 편차는 Table 2에서 보이는바와 같이 각각 시험형 1에서 2.0 ± 0.16 mm와 2.0 ± 0.17 mm 시험형 2에서 1.7 ± 0.32 mm와 1.9 ± 0.28 mm 이었다.

3. 일 위치의 비교

Fig. 7의 선도일과 추적일의 위치오차의 합은 Fig. 6의 일간격의 오차와 일치한다. 필름영상에서는 원래 처방위치와 영상의 FWHM에 의한 일의 위치의 차이는 다섯 번 획득된 전체 영상의 시험형 1에서 선도일이 0.98 ± 0.26 mm (전체 평균 편차 ± 전체 제곱 평균의 제곱근 편차), 추적일이 0.98 ± 0.27 mm의 값을 나타내었다. 전자포탈영상에서는 이 값은 각각 1.0 ± 0.21 mm (선도일)와 1.0 ± 0.27 mm (추적일)이었다. 시험형 2의 필름영상에서 이 값은 0.88 ± 0.27 mm (선도일)와 0.88 ± 0.30 mm (추적일), 전자포탈영상에서는 0.94 ± 0.24 mm (선도일)와 0.94 ± 0.27 mm (추적일)이었다. 전체 평균 편차는 모두 1 mm 이내였고 이것은 '2. 정량적 분석'에서의 결과값과 일치하는 것이었다.

4. 필름영상과 전자포탈영상의 비교

필름영상과 전자포탈영상에서 추출된 각 일의 전체 FWHM의 차이는 시험형 1에서 0.091 ± 0.068 mm, 시험형 2에서 0.15 ± 0.11 mm이었다. 정합된 두 영상의 한 화소의 크기가 0.38 mm이 점을 감안하면, 이 차이는 매우 미세한 차이로 할 수 있다. 따라서 전자포탈영상장치는 필름의 정확도를 가지고 다엽시준기의 일간 정도관리에 활용 가능한 장비라고 결론지을 수 있었다.

5. 일간 정도관리를 위한 이상일위치도표

Fig. 8에서 구한 관계식을 이용하여 다엽시준기 일 위치의 이상유무를 검출하는 능력을 검증하기 위하여 우리는 시험형 1을 처방으로 시험형 2로 획득된 영상을 잘못된 일위치로 간주하여 시험형 2에서 획득된 일간격과 시험형 1의 처방값의 차이를 이용하여 이상일위치도표로 나타내었다. 필름영상을 위한 이 관계식은 (측정된 일 간격) = $2 + 0.85 \times$ (처방된 일 간격), 전자포탈영상에 대하여는 (측정된 일 간격) = $2.2 + 0.85 \times$ (처방된 일 간격)으로 구해졌다(단위는 mm). Fig. 9는

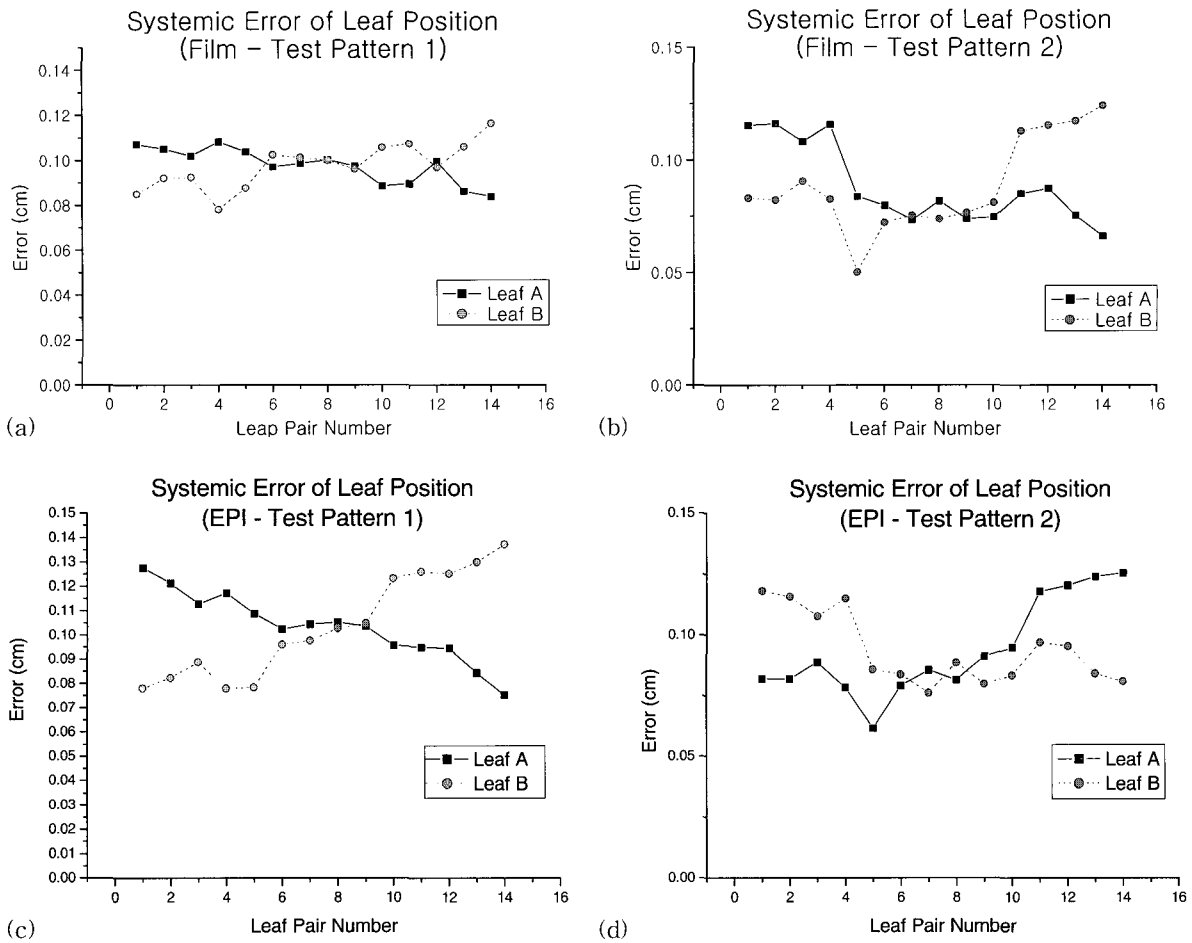


Fig. 7. Systemic errors of leaf A and B position. Figure (a) and (c) are the systemic errors of test pattern 1 and figure (b) and (d) are those of test pattern 2. In test pattern 2, the position of leaf B bank was prescribed to form wider beams of 2 mm (leaf pair number 5 and 6), 3 mm (leaf pair number 7 and 8), and 4 mm (leaf pair number 9 and 10) than those of the corresponding leaf pairs in the test pattern 1. In all figures, the slanted tendency along leaf pair number was caused by the deviated determination of a reference center line of the images perpendicular to leaf movement and the rotational error during image registration.

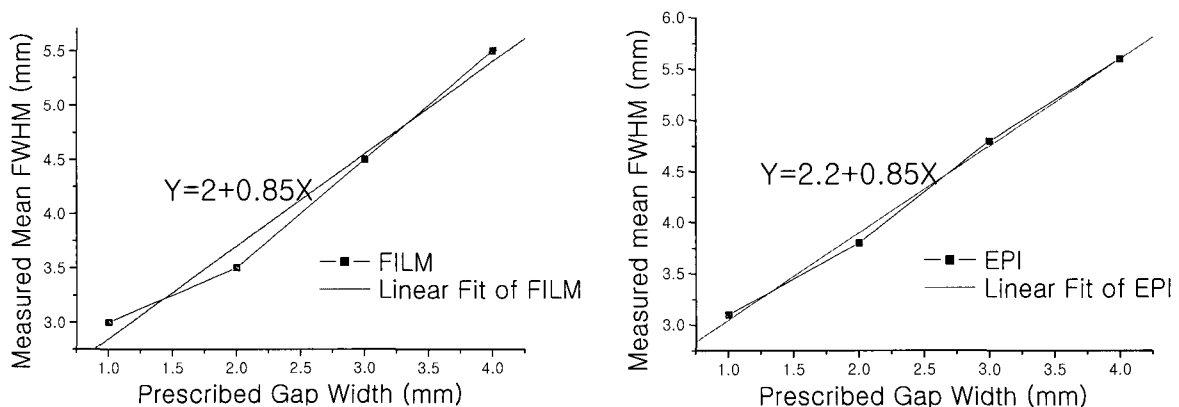


Fig. 8. Linear relationship between the prescribed beam width and the measured mean FWHM fitted by a least-square method.

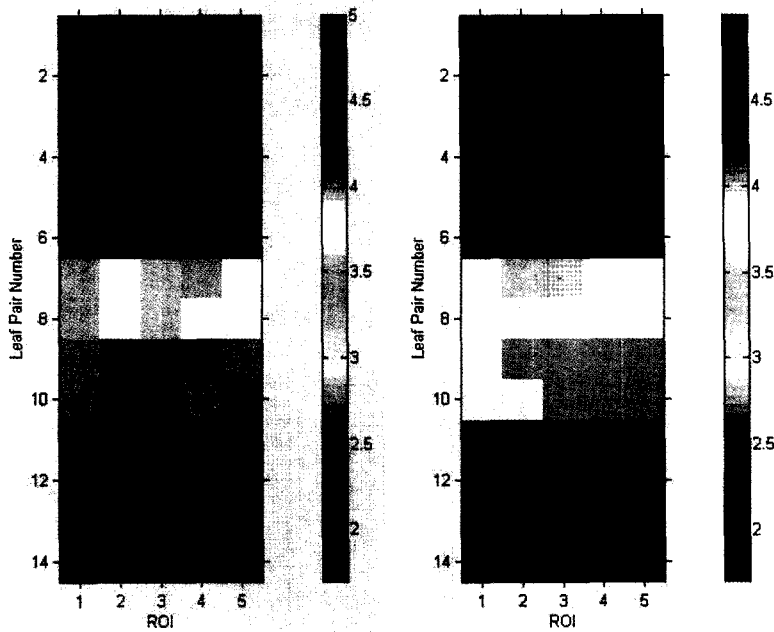


Fig. 9. Diagram of abnormal leaf positions. Beam width by (a) film and (b) the EPID of test pattern 2 subtracted by the prescribed gap width of test pattern 1. EPID shows better detection capacity for abnormal MLC leaf positions than film due to its inherent image clearness superior to film. (Colorbar unit: mm)

이 도표를 보여주는데, 차이가 선명하게 드러남으로써 잎의 위치의 이상유무 확인하는데 본 방법이 효과적으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

고찰 및 결론

포탈영상의 반응영에서의 최대 구배는 50% 등선량 곡선 즉 선량측정 조사면(dosimetric field)의 가장자리와 일치한다.^{19) Partidge⁶⁾} 등은 시간평균 포탈영상에서 50% 세기 정도는 다엽시준기의 잎위치의 지시자로서 정확하게 사용될 수 있다는 것을 보였다. 본 연구에서도 방사선에 의한 영상에서 잎의 참조점으로 등선량 곡선의 최대 구배를 갖는 점으로 삼았으며, 이는 영상의 윤곽검출 알고리즘에 의해 검출된다는 점을 확인할 수 있었다.

Eilertsen¹²⁾은 그의 논문에서 ① SSD=100 cm의 최대선량 깊이에서 물리적 조사면 윤곽이나 ② 포탈영상 조사면 윤곽에 의해 결정되는 전형적인 다엽시준기가 형성하는 조사면의 폭은 실제 처방된 조사면보다 각각 ① 2.0 mm나 ② 1.0 mm정도 다른 값을 나타냄을 보였다. 본 연구는 상기 연구 중 ①과 유사하게 물리적 조사면(physical field edge: 최대 선량의 50% 등선량 곡선에 해당하는 부분)의 윤곽을 구한

것이다. Fig. 6에 나타난 것처럼 본 연구에서도 FWHM에 의해 결정되는 조사면의 윤곽은 Eilertsen의 연구결과와 비교될 수 있을 정도의 편차를 나타냄을 확인할 수 있었다. 이러한 편차들 즉 물리적 조사면과 실제 기하학적 조사면의 차이는 둥글게 다듬어진 다엽시준기의 끝을 통과하는 방사선의 투과량이 조사면 모서리에서 일정하지 못하기 때문에 발생하는 반응영 때문인 것으로 여겨진다. 한편, 본 실험에서는 FWHM과 실제 처방과의 관계식을 최소자승법을 활용한 일차방정식으로 근사하였다. 그러나 본 실험이 이간격 4 mm이내에서 이루어졌기 때문에 이 범위를 넘어서는 이간격에서까 자 본 일차 선형 근사식이 맞다고는 할 수 없다. 따라서 이러한 근사식은 실험의 범위에 따라 더 많은 자료에 의해 보충되고 수학적으로 근사되어야 할 것이다.

성공적인 검증을 위한 또 다른 하나의 조건은 정확한 영상 정합이다. Fig. 7(d)의 선의 기울기는 영상 정합간의 회전 오차(rotational error)로부터 야기되었다. 정확하지 못한 영상정합오차는 영상의 주변부에서 대략 3화소(1 mm정도)의 오차를 일으켰다. 두 영상 사이의 이동오차(translation error)는 두 영상간의 이간격 중심위치의 평균편차만큼의 평행 이동을 수행하여 보정하려 했으나 오차가 완전히 수정되지는 않았다. 상호정보(mutual information, MI)법과 같은 보다

정확한 영상정합법을 활용한다면 이러한 오차를 줄일 수 있을 것으로 여겨지나 점맞춤법보다 보다 많은 시간을 요하고 본 연구에서의 오차의 크기가 크지 않기 때문에 큰 개선효과를 기대할 수 없을 것으로 생각된다.

본 연구에 활용된 이온전리함을 가지는 전자포탈영상장치의 제약 때문에 전자포탈영상은 획득 후에 영상처리가 보다 용이하도록 대조도가 조정되었다. 이러한 대조도의 조절은 특정한 방법을 가지는 것이 아니라 각 전자포탈영상장치의 고유한 특성에 따라 경험적으로 이루어져야 한다. 방사선 조사윤곽검출을 위해서 Bijhold¹⁵⁾ 등에 의해 제안된 영역기반과 경계기반 윤곽검출법이 활용될 수 있다. 본 연구에서는 이 논문에서 제안된 것처럼 이온전리함을 이용하는 전자포탈영상장치가 빔세기 검출에 큰 동적 범위(dynamic range)를 가지므로 Canny 필터를 활용한 경계기반법을 활용하여 윤곽을 검출하였다. 이와 더불어 본 연구에 사용된 Canny 윤곽검출연산자는 영상의 잡음에 민감하여 필요없는 정보까지 결과영상에 나타낸다. 필름영상의 많은 잡음은 필름을 인화하거나 영상을 디지털영상으로 스캔할 때 부주의한 취급에 의해 생성된다. 이러한 잡음은 FWHM을 구할 때 경우에 따라서 심각한 오차를 일으키는 원인이 되기도 한다. 따라서 잡음이 필름영상에 들어가지 않도록 많은 주의가 요구된다.

방사선치료시 MLC를 장착한 선형가속기의 방사선조사 방법이 복잡해짐에 따라 MLC 움직임에 대한 검증이 정기적으로 이루어져야 한다. 현재 이러한 검증은 대부분 필름에 의해 이루어지고 있으며 따라서 육안으로 검증하는 정성적 방법으로 오히려 세밀한 검증은 이루어지고 있지 못하고 있다. 이러한 필름의 대체 방법으로 EPI를 이용한 연구가 활발하게 이루어져 왔다. 그런데 기존의 EPI를 이용한 MLC 움직임의 검증 방법은 MLC의 동적 움직임에 초점을 맞추고 있기 때문에 실제 치료계획과 같은 복잡한 움직임을 처방하여 모든 움직임을 검증하거나, 시준기의 각에 따른 MLC 움직임을 검증하는 등 많은 시간과 노력이 들기 때문에 매일 수행하는 정도관리에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 MLC의 동적 움직임에 초점을 맞추기보다는 처방된 위치에 정확히 놓이는지에 초점을 맞추어 검증 절차를 간소화시키고, 기존의 방법보다 윤곽을 효과적으로 검출하는 방법인 Canny 연산자를 활용하여 MLC 위치를 검출함으로써 매일 치료 전에 MLC 움직임의 신뢰성을 검증할 간단한 방법 제시하고자 하였다. 결론적으로 본 연구가 제시한 전자포탈영상을 활용한 일간 정도관리법은 기존의 필름만을 이용하여 시각적으로만 이루어지는 다엽시준기의 검증을 대체하여 다각적인 분석을 통해 보다 정확한 다엽시준기의 일간 정도관

리에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Wang X, Spirou S, LoSasso T, Stein J, Chui CS, Mohan R: Dosimetric verification of intensity-modulated fields. *Med Phys* 23:317-327 (1996)
2. Ma L, Gels P.B, Boyer AL: Quality assurance for dynamic multileaf collimator modulated fields using a fast beam imaging system. *Med Phys* 24:1213-1220 (1997)
3. Foulkes KM, Ostwald PM, Kron T: A clinical comparison of different film systems for radiotherapy portal imaging. *Medical Dosimetry* 26:281-284 (2001)
4. Partridge M, Evans PM, van Herk M, Ploeger LS, Bjdgeell GJ, James HV: Leaf Position Verification during dynamic Beam Delivery: A Comparison of three applications using electronic portal imaging. *Med Phys* 27:1601-1609 (2000)
5. Zhou SM, Verhey LJ: A robust method of multileaf collimator (MLC) leaf-configuration verification. *Phys Med Biol* 39:1929-1947 (1994)
6. Partridge M, Evans PM, Mosleh-shirazi A, Convery D: Independent verification using portal imaging of intensity-modulated beam delivery by the dynamic MLC technique. *Med Phys* 25:1873-1879 (1998)
7. Heijmen BJM, Pasma KL, Kroonwijk, et al.: Portal dose measurement in radiotherapy using an electronic portal imaging device (EPID). *Phys Med Biol* 40:1943-1955 (1995)
8. Pasma KL, Kroonwijk M, de Boer JCJ, Visser AG, Heijmen BJM: Accurate portal dose measurement with a fluoroscopic electronic portal imaging device (EPID) for open and wedged beams and dynamic multileaf collimation. *Phys Med Biol* 43:2047-2060 (1998)
9. Kirby MC, Williams PC: The use of an electronic portal imaging device for exit dosimetry and quality control measurements. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 31:593-603 (1995)
10. Chui CS, Spirou S, LoSasso T: Testing of dynamic multileaf collimation. *Med Phys* 23: 635-641 (1996)
11. Yin FF, Rubin P, Schell MC, et al.: An observer study of for direct comparison of clinical efficacy of electronic to film portal images. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 35:985-991 (1996)
12. Eilertsen K: Automatic detection of single MLC leaf positions with corrections for penumbral effects and portal imager dose rate characteristics. *Phys Med Biol* 42:313-334 (1997)

13. James HV, Atherton S, Budgell GJ, Kriby MC, Williams PC: Verification of dynamic multileaf collimation using an electronic portal imaging devices. *Phys Med Biol* 45:495-509 (2000)
14. Dong L: Portal image correlation and analysis. Hazle JD, Boyer AL: *Imaging in radiation therapy*. Medical Imaging Publishing, Madison, WI (1998), pp. 415-444
15. Bijhold J, Gilhuijs KGA, van Herk M, Meertens H: Radiation field edge detection in portal images. *Phys Med Biol* 36:1705-1710 (1991)
16. Zhang L, Bao P: Edge detection by scale multiplication in wavelet domain. *Pattern Recogn Lett* 23: 1771-1784 (2002)
17. Ding L, Goshtasby A: On the Canny edge detector. *Pattern Recogn* 34:721-725 (2001)
18. Heath M, Sarkar S, Sanocki T, Bowyer K: Comparison of edge detectors. *Comput Vis Image Und* 69:38-54 (1998)
19. ICRU Report 24: *Determination of absorbed dose in a patient irradiated by beams of x- or gamma-rays in radiotherapy procedures*. International Commission in Radation Untis and Measurements, Bethesda, MD (1976)

Quality Assurance of Multileaf Collimator Using Electronic Portal Imaging

Hosang Jin*, Jason W. Sohn[†], Tae-suk Suh*, Bo-young Choe*, and Hyoung-koo Lee*

*Department of Biomedical Engineering, The Catholic University of Korea
Department of Radiation Oncology, Ireland Cancer Center, Case Western Reserve University*

The application of more complex radiotherapy techniques using multileaf collimation (MLC), such as 3D conformal radiation therapy and intensity-modulated radiation therapy (IMRT), has increased the significance of verifying leaf position and motion. Due to thier reliability and empirical robustness, quality assurance (QA) of MLC. However easy use and the ability to provide digital data of electronic portal imaging devices (EPIDs) have attracted attention to portal films as an alternatives to films for routine quality assurance, despite concerns about their clinical feasibility, efficacy, and the cost to benefit ratio. In this study, we developed method for daily QA of MLC using electronic portal images (EPIs). EPID availability for routine QA was verified by comparing of the portal films, which were simultaneously obtained when radiation was delivered and known prescription input to MLC controller. Specially designed two-test patterns of dynamic MLC were applied for image acquisition. Quantitative off-line analysis using an edge detection algorithm enhanced the verification procedure as well as on-line qualitative visual assessment. In conclusion, the availability of EPI was enough for daily QA of MLC leaf position with the accuracy of portal films.

Key Words : Electronic portal imaging, Film, Multileaf collimation, Quality assurance