

흉부 CT의 컴퓨터보조 진단

서울대학교 김종효

1. 서 론

컴퓨터 보조진단(Computer Aided Diagnosis, CAD)이라 함은 영상데이터를 정량적으로 분석하는 컴퓨터 시스템의 출력을 참고로 하여 의사가 진단을 내리는 것을 의미한다[1].

컴퓨터 보조진단은 최근 의학영상 연구분야 중에서 매우 관심이 높은 분야이다. 북미 방사선학회에서 최근 수년간 컴퓨터 보조진단분야로 발표된 논문수는 매년 50%씩 증가하고 있어 2000년에 55편이던 것이, 2001년 86편, 2002년 134편, 2003년에는 191편으로 늘어남으로서, 의학영상연구의 중요한 한 분야로서 자리잡았다. 컴퓨터 보조진단이 이와같이 각광을 받게 된 것은 지난 30여년간의 꾸준한 연구 개발을 통해 CAD 관련 기술이 임상에서 활용될 수 있는 수준으로 성숙된 기술적 기반이 뒷받침된데다가, CAD가 상업적으로 발전할수 있는 시장적 여건이 형성된 것이 주요한 이유일 것이다.

CAD가 처음 상용화된 것은 시카고대학과의 기술협약으로 탄생된 R2 Technology(미)사로서 1998년에 미국 FDA의 승인을 얻어 검진용 유방 X-선 영상에서 병변검출을 하는 CAD 제품을 출시하였다[2]. 이후 유방 CAD 시스템의 임상적 유용성이 입증되면서 현재 미국내에서만 1500 대가 넘는 유방 CAD 시스템이 임상적으로 사용되고 있으며 유방암의 조기검출에 도움을 주고 있다[2]. 이어서 2001년도에는 Deus Technologies(미)사에서 흉부 X-선 영상에서 폐결절을 검출하는 CAD 시스템에 대해 FDA의 승인을 받았고, 2004년에는 흉부 CT 영상에서 폐결절 검출을 하는 시스템이 R2 사에 의해 FDA 승인을 받았다. 이와 같이 성공적인 CAD 의 제품화와 시장진입이 이어지자 GE, Siemens, Philips등 주요 의료영상장비 제조사들에서도 기술개발과 제품화 대열에 합류하면서 바야흐로 CAD는 의료영상산업계에서 새로운 산업분야의 하나로 자리잡아가고 있다.

흉부는 질환진단의 대부분이 영상검사에 의해 이루어지며, 영상검사중 가장 비중이 높고, CAD 연구도 많이 이루어져왔다. 이 글에서는 흉부 CT 영상에서의 CAD 기술동향을 소개하고자 한다. 흉부 영상진단에 있어 CAD의 적용은 질병군에 따라 폐결절, 폐색전증, 미만성 폐질환등의 분야가 있고, 기술적으로는 병변검출, 병변감별, 병변용적 측정등으로 분류될 수 있다.

2. 폐결절 검출

폐결절은 폐암의 주요소견으로 흉부영상검사의 주요 목적중 하나이다. 과거에는 단순 흉부 X-선 검사를 통해 폐암을 조기진단하고자 하였으나 효과가 미미하여 소기의 성과를 달성하지 못 하였고, 최근에는 보다 결절 검출률이 높은 CT를 사용하여 폐암 선별검사를 시도하는 노력이 활발하다. 최근 CT 기술의 발달로 단순 흉부 X-선 검사와 비슷한 방사선 피폭선량을 가지고도 3차원의 영상을 얻을수 있는 저 선량 3차원 CT 검사가 가능해져, 향후 흉부검사에는 CT가 주요한 수단으로 자리잡을 가능성이 크다.

3차원 CT 검사는 단면 두께 1~3mm의 얇은 절편의 영상을 얻게되므로 200-400매의 많은 영상을 얻게 되는데, 이와 같이 많은 영상속에 숨어있는 작은 결절을 검출하는데 육안적 식별의 한계가 있게 되므로 형태학적 패턴인식을 위한 컴퓨터 알고리즘을 적용한 폐결절검출이 각광을 받게 되었다.

CT에서의 폐결절 검출기법은 대체로 3차원 영상데이터로부터 폐영역만을 자동으로 분할하는 단계, 폐영역으로부터 결절후보를 검출하는 단계, 결절후보들로부터 특징들을 분석하고 결절과 비결절로 분류하는 단계 등의 3 단계로 이루어진다. 폐영역을 분할하는 방법은 감쇠계수 문턱치와 연결도 검사등의 비교적 단순한 값을 적용하는 기법으로부터 보다 복잡한 3차원 모형기반 체적변형(volume deformation) 기법까지 다양하다[3-5]. 질병의 중증도가 심하지 않은 선별검사의 경

우에는 전자가 사용되고, 미만성 폐질환 등 폐의 감쇠계수가 심하게 변형되는 경우는 후자가 바람직하다.

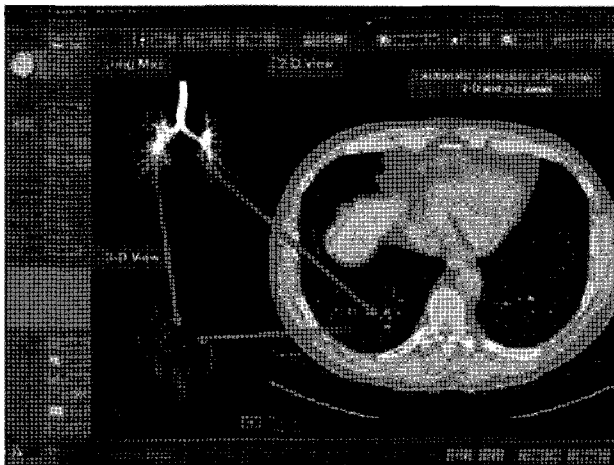


그림 1 R2사에 의해 상용화된 Lung CAD 프로그램의 화면 예. 컴퓨터에 의해 미리 검출된 폐결절이 CT 단면상에 표시되고, 동시에 전체 폐 구조상에서 결절의 상대적인 위치와 결절의 3차원적 확대영상이 함께 표시되어 판독자의 효율적인 판단을 돕는다.

분할된 폐영역에서 폐결절 후보를 검출하는 과정은 2차원 영상기반의 방법과 3차원 영상기반 방법으로 나누어지나, 대체로 정상적인 폐영역의 구조물이 기관지와 폐혈관 등 나뭇가지 양상의 길고 연결된 형태를 띠는 것에 반해 폐결절은 비교적 둥글고 고립된 형태를 띠는 것에 착안하여 원형 또는 구형의 형태를 검출하는 기법이 사용된다. 정합필터를 취한 영상과 원영상간의 차를 이용하는 방법[6], 문턱화한 binary 영상에 형상분석을 적용하는 방법[3], Markov Random Field 모델을 이용하는 방법[7], 동적 프로그래밍을 이용하는 방법[8] 등이 제안된 바 있다.

폐결절 후보로부터 결절과 비결절로 분류하는 과정에서는 후보의 체적, 감쇠계수, 장축 길이(elongation factor), 치밀도(compactness), 원형도(shape) 등의 특징이 사용되며 분류기로서는 선형분류기, 규칙기반 분류기, 인공신경망 등이 사용된다[2, 3].

폐결절 검출용 CT CAD의 성능은 1994년 Giger 등[9]이 처음 보고한 이래 지속적으로 발전해 왔으며, 결절의 성격에 따라 민감도(sensitivity)가 38%에서 95%에 이르고 있다[9-23]. CAD의 민감도는 본질적으로 위양성(false positives)과 trade-off의 관계에 있으므로, 연구에 사용된 장치의 환경을 함께 고려하여야 한다. Armato 등[10]은 CT 선별검사서 의사가 놓쳤던 폐결절을 대상으로 CAD의 성능을 평가한 결과 영상당 1개의 위양성과 84%의 민감도를 보고한 바

있다. Lee 등[23]은 폐결절 CAD와 판독자간의 수행능 비교에서 고립된 폐결절에 대해서는 93%의 검출률과 검사당 평균 8개의 위양성의 성능을 보임을 보고하였다[3]. 그러나 크기가 5mm보다 큰 결절이거나 다른 구조물과 접촉이 있는 폐결절의 검출에서는 이보다 낮은 79%와 71%의 검출률을 나타내었다. Lee 등[24]이 R2사의 상용제품(ImageChecker CT LN-1000)을 사용한 최근의 CAD 평가연구에서는 4-10mm 크기의 폐결절에 대해 CAD가 62%의 민감도와 검사당 1.56개의 위양성을 보임을 보고하였다. 이 연구에서도 크기가 10mm-15.4mm인 비교적 큰 결절의 검출률은 54%로 낮았다. Brown 등[25]은 22개의 결절이 포함된 8례의 CT에 대한 CAD와 판독자의 성능 평가연구에서 CAD 단독으로 검사당 2.64개의 위양성과 86.4%의 민감도를 보고하였다.

이와 같이 아직 CAD의 민감도는 충분하지 않거나 많은 위양성을 보이기 때문에 폐결절 검출에서 CAD의 결과는 아직 참고용으로만 인정되고 있는 수준이다. 그러나 CAD는 판독자가 잘 검출하지 못하는 종류의 폐결절에서 월등한 성능을 보이기 때문에 참고로 활용할 경우에도 상보적인 역할을 하여 판독자의 검출률을 높여줄 수 있을 것이라는 기대가 있다. Brown 등[25]이 수행한 연구에서 참여한 13명의 방사선과 의사의 폐결절 검출률은 CAD의 도움없이 64.0% 수준이었으나 CAD의 결과를 참고했을때 81.9%까지 상승하였다. 그러나 위양성 역시 0.144에서 0.173으로 높아져 의사의 CAD 의존도가 필요이상으로 높아질수 있음을 알수 있었다.

3. 국소 간유리음영(ground glass opacity) 검출

폐암은 CT 상에서 주로 고형결절로 나타나지만 20%에서는 간유리음영, 또는 고형부분과 간유리음영이 혼재된 양상으로 나타날 수 있다[26]. 많은 연구에서 국소 간유리 음영이 선암의 초기 또는 선행병변일 수 있음을 제기하고 있다. 또한 간유리 음영은 판독자의 육안적 검출률이 매우 떨어지는데, Li 등[27]의 연구에 의하면 검진 CT에서 방사선과 의사에 의해 간과된 39개의 폐암중 27개가 간유리 음영을 가진 병변이었다고 한다. 따라서 간유리 음영을 검출하는 것은 결절 검출 못지않게 중요하나, 현재까지는 간유리 음영을 검출하는 CAD에 대한 연구는 거의 이루어지고 있지 않다. 그 이유는 국소 간유리 음영이 고형결절에 비해 감쇠계수의 대조도가 낮고 경계도 불분명하며, 모양도 불규칙적이므로 기술적인 접근에 어렵기 때문이다. 최근에 Kim 등[28]은 질감분석과 국소 히스토그램의

Multi- Gaussian 모델링을 통해 국소 간유리음영으로 나타난 악성 병변을 자동으로 검출할수 있음을 제시한 바 있다.

4. 폐결절 특성화에 의한 악성도 감별

CT를 통해 검출되는 폐결절중 87~93% 가량은 양성결절로서 생명에 지장을 주지 않는 것이며[29-31], 적은수의 결절만이 악성으로서 치료를 요하는 것임이 알려져 있다. 특히 박편 3차원 CT영상법을 사용할 경우는 그 비율이 98~99%에 이른다는 보고가 있다 [32,33]. 따라서 폐결절 검출 CAD의 사용으로 더 많은 폐결절이 검출되면, 그 폐결절 각각에 대해 악성여부를 감별하는 것은 또 다른 부담으로 작용할 수 있다. 폐결절 특성화(characterization)은 이러한 점에 착안하여, 주어진 폐결절의 다양한 특징을 추출하고 분석하여 악성여부를 판별하는 시스템이다. 폐결절 검출용 CAD에 대한 연구가 매우 활발한데 비해, 폐결절 특성화 CAD에 대한 연구는 비교적 많지 않다.

McNitt-Gray 등[34]은 31례의 단일 폐결절에 대해 반 자동적으로 폐결절의 윤곽을 결정한 후 결절의 크기, 모양, 감쇠, 감쇠의 분포, 질감등을 이용해 분석하였는데 90.3%에서 양성과 악성결절을 분류할 수 있었다고 보고하였다. Kido 등[35]은 고해상 CT에서 프래탈분석을 통해 질감을 정량화한후 세기관폐포암과 비세기관지폐포암을 구별할 수 있음을 제시하였다. 최근 Kawata 등[36]은 기존에 구축한 악성여부가 알려진 폐결절의 3차원 데이터를 바탕으로 악성도 여부를 모르는 결절들의 모양과 감쇠도등을 계산하여 자동적으로 비교 분석하는 방법으로 민감도 91.4% 특이도 51.4%, 정확도 77.6%의 결과를 보고한바 있다.

Aoyama 등[37]은 76례의 폐암과 413례의 양성결절을 대상으로 동적프로그래밍을 이용하여 폐결절을 분할한뒤, 폐결절 중심부와 주변부의 히스토그램 및 폐결절 변연의 특징, 모양등 41개의 영상특징들을 이용하고 선형판별분석법(linear discriminant analysis)으로 분류하여 수신자동작곡선(receiver operating curve)을 측정한 결과 0.846의 정확도(Az)를 얻었다. Li 등[38]은 순수한 간유리음영(ground glass opacity)과 혼합형 간유리음영, 그리고 고형 폐결절등을 포함하는 28례의 폐암과 28례의 양성결절들을 대상으로 50개의 영상특징들을 이용하고 선형판별분석법으로 분류한 결과 0.831의 정확도를 얻었으며, 방사선과 의사가 이 CAD를 사용하였을때는 하기전에 비해 정확도가 0.785에서 0.853으로 증가하였음을 보고하였다.

5. 폐결절 체적측정

폐결절의 악성여부를 가름하는 중요한 지표로서 널리 사용되는 방법중의 하나가 결절의 성장속도, 특히 배증기간(doubling time)이다. 결절의 크기변화를 알기 위해서는 결절의 크기를 1차원 또는 2차원적으로 측정하는 방법이 흔히 이용되고 있으나 절편과 결절의 상대적인 위치, 부분체적효과, 측정 소프트웨어의 기능제한 등에 따라 측정치가 일정치 않은 경우가 종종있어 신뢰도에 문제가 제기되어왔다. 단적인 예로서, 결절의 체적이 2배로 증가했을때 결절의 축방향 길이는 단지 26% 만이 늘어나는데, 이는 거꾸로 축방향 길이 측정시 편차가 26%였다면 결절체적이 2배 차이난 것으로 되어 악성도 판별에 큰 영향을 미칠수 있게 되는 것이다. 이는 특히 크기가 작은 결절의 경우 더욱 심각한데, 크기가 3mm의 결절의 경우 CT의 voxel 크기는 대략 0.6mm 수준이므로 측정시 1 voxel의 편차만 나더라도 20%가 되므로 체적상으로는 매우 큰 오류를 내는 결과를 초래하게 되는 것이다.

이러한 문제를 극복하기 위해 3차원적인 방법으로 결절의 체적을 측정하려는 연구가 이루어지고 있다 [39-43]. 결절체적을 3차원적으로 측정하는 문제에는 다음과 같은 어려움이 뒤따른다.

- 체적측정의 정확도는 일반적으로 CT의 공간해상도(절편내 해상도, 절편두께, 절편간 거리, 피치 등)와 부분체적효과, X-선 피폭량과 관계되는 신호대 잡음비, CT의 재구성 필터 선정, 감쇠계수 등의 물리적인 변수에 영향을 받는다.
- 많은 경우에 폐결절은 혈관이나 흉곽벽, 종격동, 횡경막등과 연결되어 있어 경계를 분명히 정하기가 어렵다. 따라서 폐결절 용적측정의 전단계에서 결절의 경계를 주변조직에서 분리하는 과정이 필요하며, 이를 위한 기준설정이 요구된다. 그런데 이 기준이 잘못되어 있으면 분할된 결절의 모양에 부적절한 변형이 일어나며 이는 결절성장속도 측정에 왜곡을 가져올 수도 있다.

결절의 3차원 체적측정에 일반적으로 사용되는 방법은 화소의 감쇠계수에 미리 지정된 문턱치를 적용시켜 결절을 폐조직에서 분리하는 것이나[39], 혈관등 감쇠가 높은 조직에 연결된 경우는 결절의 크기에 오류를 일으키므로 적절치 않다. 개선된 방법으로는 결절과 주변 폐조직간에 가장 높은 구배(gradient)를 만드는 감쇠계수를 찾아 설정하는 기법이 제안된 바 있다[44].

이와 다른 접근법으로서는, 사용자가 지정한 씨앗점에서부터 3차원적인 영역성장을 하며, 구형이거나 옆

상의 형태를 유지하는 한 성장을 계속하지만 이에서 벗어나면 자동적으로 성장을 멈추는 방법이 제안된 바 있다[42].

컴퓨터 기반의 자동화된 결절측정법이 임상적으로 받아들여지기 위해서는 정확도에 영향을 미치는 여러 가지 변수에 의해 어떤 영향을 받는지에 대한 광범위한 연구결과가 도출되어야 한다. 점검해야 할 몇 가지 문제들은 다음과 같다.

- 1) 이미 체적을 알고있는 팬텀 영상에 적용하였을때 얼마나 실제값에 근접한가?
- 2) 그 정확도는 피폭량에 의존적인가?
- 3) 전문가가 주의깊게 수동적으로 3차원 영상을 분할한 결과와 유사한 값을 내는가?
- 4) 측정된 체적치가 CT 스캔 파라미터, 특히 절편두께에 얼마나 영향을 받는가?
- 5) 측정치는 여러번의 CT 스캔시에 일정한 값을 유지하는가?

폐결절의 체적을 측정하는데 있어 CT에서 다양한 재구성 요소와 문턱값이 미치는 영향을 분석한 Goo 등[45]의 연구에서, 단면의 두께와 문턱값이 오차의 크기를 결정하는 의미있는 요소인 반면, 재구성 간격, 영상시야(field of view)는 의미있는 요소가 아니었다. 또한 폐결절 크기 자체도 오차의 크기에 영향을 미

치는 인자였다.

팬텀을 사용하여 영상을 3차원적으로 추출하고 등방형 화소 재추출방법을 이용한 Yankelevitz 등[46]의 연구에서 컴퓨터를 이용하여 측정한 용적과 실제 용적 사이에는 약 3%의 오차가 있었고, 3차원적 분석방법이 2차원적 분석방법보다 정확도가 높았다.

같은날 두 번 촬영한 저선량 CT를 이용하여 결절 체적프로그램의 재현성을 평가했던 Wormanns 등[47]의 연구에서 각 측정사이의 체적측정오차는 측정체의 95%범위내에서 -22.5%에서 24.1%로 분포하였다.

6. 향후 발전방향

CAD는 지난 30여년간 꾸준한 발전을 거쳐 일부 분야에서는 임상적 실용화와 산업화 단계에 진입하고 있으며, 이러한 추세는 향후 영상진단의 전 분야로 확산될 것으로 보인다.

미국에서는 흉부 CT를 이용한 CAD 연구의 발전을 촉진시키기 위해 National Cancer Institute의 후원으로 Lung Image Database Consortium(LIDC)를 발족시켰다. 이를 통해 구축된 데이터베이스는 CAD의 개발, 훈련, 평가에 국제적인 연구자원으로서 역할을 하게 될 것이다. 궁극적으로는 CAD는 CT에서 병변을 발견할 뿐 아니라, 추적 CT에서 상응하는 병변

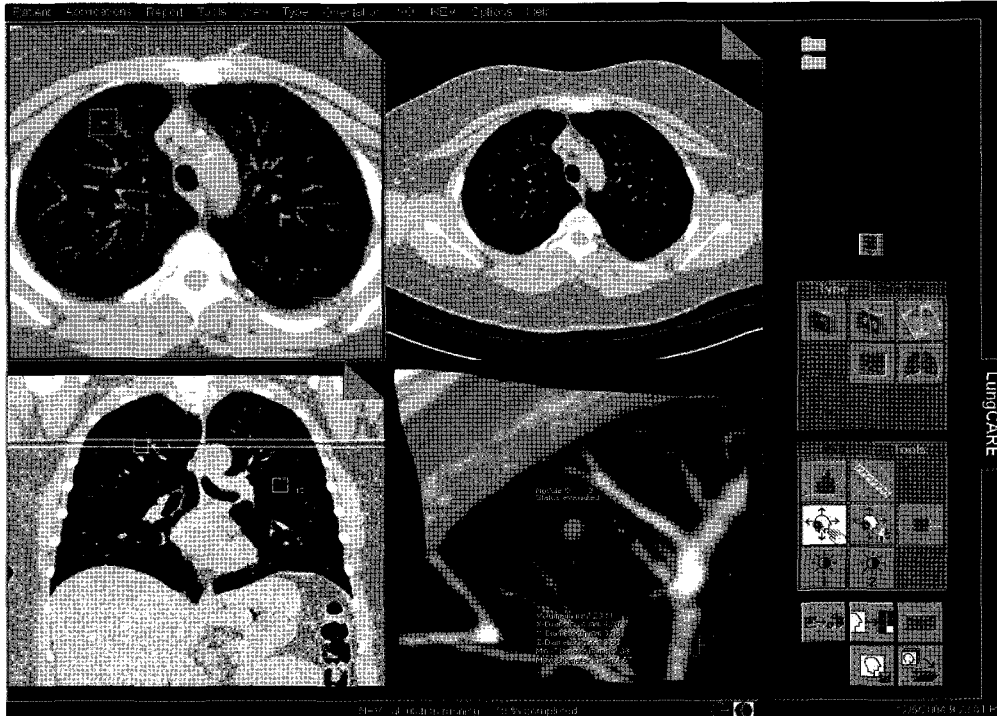


그림 2 Siemens에 의해 상용화된 폐결절 체적측정 프로그램의 화면 예. 사용자가 폐결절에 사각형으로 표시하면 자동적으로 결절이 분할되고 확대된 3차원 영상과 함께, 결절의 체적과 각 축방향의 길이와 최소, 최대 직경등의 특징들이 표시된다.

을 서로 비교하며, 환자에게서 측정된 정량적인 특성과 방대한 국가적 데이터베이스를 연결하여 악성도 여부를 보다 정확하게 판별하는 기능을 갖도록 발전할 것으로 본다. 또한 현재 널리 보급되어있는 PACS와 상호연계되어 일상관독업무에 정착될 것. 이와같이, 디지털 정보기술의 물결은 윈트겐에 의해 시작된 방사선진단분야에 PACS라는 1차 디지털혁명의 충격을 준 이후, CAD의 도입을 통해 또 한번의 혁신적인 변화를 가져올 것으로 여겨진다.

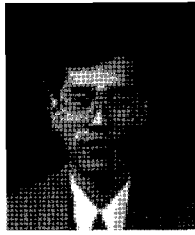
참고문헌

- [1] Doi K, MacMahon H, et al. Computer-aided diagnosis in radiology : potential and pitfalls. *Eur J radiol* 1999;31:97-109.
- [2] Doi K. Current status and future potential of computer-aided diagnosis in medical imaging. *Br J Radiol* 2005;78:S3-S19.
- [3] Goo JM, Lee JW, et al. Automatic lung nodule detection at low-dose CT: preliminary experience. *Koran J radiol* 2003;4: 211-216.
- [4] Hu S, Hoffman EA, Reinhardt JM. Automatic lung segmentation for accurate quantitation of volumetric X-ray CT images. *IEEE Trans Med Imaging*. 2001 Jun;20 (6):490-8.
- [5] Boscolo R, Brown MS, McNitt-Gray MF. Medical Image Segmentation with Knowledgeguided Robust Active Contours. *Radiographics*. 2002;22:437-448.
- [6] Arimura H, Katsuragawa S, Suzuki K, Li F, Shiraishi J, Doi K. Computerized scheme for automated detection of lung nodules in low-dose CT images for lung cancer screening. *Acad Radiol* 2004;11: 617-29.
- [7] Takizawa H, Yamamoto S, Matsumoto T, et al. Recognition of lung nodules from X-ray CT images using 3D Markov random field models. *Int Conf Pattern Rec* 2002: 99-102.
- [8] Xu N, Ahuja N, Bansal R. Automated lung nodule segmentation using dynamic programming and EM-based classification. *Proc SPIE* 2002;4684:666-676.
- [9] Giger ML, Bae KT, MacMahon H. Computerized detection of pulmonary nodules in CT images. *Invest Radiol* 1994;29:459-65.
- [10] Armato SG III, Li F, Giger ML, MacMahon H, Sone S, Doi K. Performance of automated CT nodule detection on missed cancers from a lung cancer screening program. *Radiology* 2002;225:685-92.
- [11] Jiang H, Yamamoto S, Iisaku S, et al. Computer-aided diagnosis system for lung cancer screening by CT. In: Doi K, et al, editors. *Computer-aided diagnosis in medical imaging*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1999:125-30.
- [12] Ukai Y, Niki N, Satoh H, et al. Computer aided diagnosis system for lung cancer based on retrospective helical CT image. *Proc. SPIE* 2000;3979:1028-39.
- [13] Armato III SG, Giger ML, Moran CJ, et al. Computerized detection of pulmonary nodules on CT scans. *Radiographics* 1999;19: 1303-11. Lawler LP, Wood SA, Paunu HS, Fishman EK. Computer-assisted detection of pulmonary nodules: preliminary observations using a prototype system with multidetector-row CT data sets. *J Digit Imaging* 2003;16:251-61.
- [14] Wormanns D, Fiebich M, Saidi M, et al. Automatic detection of pulmonary nodules at spiral CT: clinical application of a computer-aided diagnosis system. *Eur Radiol* 2002;12:1052-7.
- [15] Gurcan MN, Sahiner B, Petrick N, et al. Lung nodule detection on thoracic computed tomography images: Preliminary evaluation of a computer-aided diagnosis system. *Med Phys* 2002;29:2552-8.
- [16] Brown MS, Goldin JG, Suh RD, et al. Lung micronodules: automated method for detection at thin-section CT-initial experience. *Radiology* 2003;226:256-62.
- [17] Suzuki K, Armato III SG, Li F, et al. Massive training artificial neural network (MTANN) for reduction of false positives in computerized detection of lung nodules

- in low-dose CT. *Med Phys* 2003;30:1602-17.
- [18] Okumura T, Miwa, T, Kako J, Yamamoto S, Matsumoto M, Tateno Y, et al. Variable N-Quoit filter applied for automatic detection of lung cancer by X-ray CT. In: Lemke HU, Vannier MW, Inamura K, Farman A, editors. *Computer-assisted radiology*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science, 1998:242-7.
- [19] Lee Y, Hara T, Fujita H, Itoh S, Ishigaki T. Automated detection of pulmonary nodules in helical CT images based on an improved template-matching technique. *IEEE Trans Med Imaging* 2001;20:595-604.
- [20] Kanazawa K, Kawata Y, Niki N, Satoh H, Ohmatsu H, Kakinuma R, et al. Computer aided diagnostic system for pulmonary nodules based on helical CT images. In: Doi K, MacMahon H, Giger ML, Hoffmann KR, editors. *Computer-aided diagnosis in medical imaging*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science, 1999:131-6.
- [21] Brown MS, McNitt-Gray MF, Goldin JG, Suh RD, Sayre JW, Aberle DR. Patient-specific models for lung nodule detection and surveillance in CT images. *IEEE Trans Med Imaging* 2001;20:1242-50.
- [22] Armato SG III, Giger ML, MacMahon H. Automated detection of lung nodules in CT scans: preliminary results. *Med Phys* 2001;28:1552-61.
- [23] Lee JW, Goo JM, Lee HJ, Kim JH, Kim S, Kim YT. The potential contribution of a computer-aided detection system for lung nodule detection in multi-detector row computed tomography. *Invest Radiol* 2004;39:649-55.
- [24] Lee IJ, Gamsu G, Czum J, Wu N, Johnson R, Chakrapani S. Lung Nodule Detection on Chest CT: Evaluation of a Computer-Aided Detection (CAD) System. *Korean J Radiol*. 2005 Apr-Jun;6(2):89-93.
- [25] Brown MS, Goldin JG, Rogers S, Kim HJ, et al. Computer-aided lung nodule detection in CT: results of large-scale observer test. *Acad Radiol*. 2005 Jun;12(6):681-6.
- [26] Henschke CI, Yankelevitz DF, Mirtcheva R, et al. CT screening for lung cancer: frequency and significance of part-solid and nonsolid nodules. *AJR Am J Roentgenol*. 2002 May;178(5):1053-7.
- [27] Li F, Sone S, Abe H, MacMahon H, Armato SG 3rd, Doi K. Lung cancers missed at low-dose helical CT screening in a general population: comparison of clinical, histopathologic, and imaging findings. *Radiology*. 2002;225(3):673-83.
- [28] Kim KG, Goo JM, Kim JH, Lee HJ, et al. Computer-aided detection of localized ground-glass opacity in the lung on CT images. *Radiology* in press.
- [29] Kaneko M, Eguchi K, Ohmatsu H, et al. Peripheral lung cancer: screening and detection with low-dose spiral CT versus radiography. *Radiology* 1996;201:798-802.
- [30] Sone S, Takashima S, Li F, et al. Mass screening for lung cancer with mobile spiral computed tomography scanner. *Lancet* 1998;351:1242-5.
- [31] Henschke CI, McCauley DI, Yankelevitz DF, et al. Early lung cancer action project: overall design and findings from baseline screening. *Lancet* 1999;354:99-105.
- [32] Diederich S, Wormanns D, Semik M, Thomas M, Lenzen H, Roos N, et al. Screening for early lung cancer with low-dose spiral CT: prevalence in 817 asymptomatic smokers. *Radiology* 2002;222:773-81.
- [33] Swensen SJ, Jett JR, Sloan JA, Midthun DE, Hartman TE, Sykes AM, et al. Screening for lung cancer with low-dose spiral computed tomography. *Am J Respir Crit Care Med* 2002;165:508-13.
- [34] McNitt-Gray MF, Hart EM, Wyckoff N, Sayre JW, Goldin JG, Aberle DR. A pat-

- tern classification approach to characterizing solitary pulmonary nodules imaged on high resolution CT: preliminary results. *Med Phys*. 1999 Jun;26(6):880-8.
- [35] Kido S, Kuriyama K, Higashiyama M, Kasugai T, Kuroda C. Fractal analysis of internal and peripheral textures of small peripheral bronchogenic carcinomas in thin-section computed tomography: comparison of bronchioloalveolar cell carcinomas with nonbronchioloalveolar cell carcinomas. *J Comput Assist Tomogr*. 2003 Jan-Feb;27(1):56-61.
- [36] Kawata Y, Niki N, Ohmatsu H, Moriyama N. Example-based assisting approach for pulmonary nodule classification in three-dimensional thoracic computed tomography images. *Acad Radiol*. 2003;10(12):1402-15.
- [37] Aoyama M, Li Q, Katsuragawa S, Li F, Sone S, Doi K. Computerized scheme for determination of the likelihood measure of malignancy for pulmonary nodules on low-dose CT images. *Med Phys* 2003;30: 387-94.
- [38] Li F, Aoyama M, Shiraishi J, Abe H, Li Q, Suzuki K, et al. Improvement in radiologists' performance for differentiating small benign from malignant lung nodules on high-resolution CT by using computer-estimated likelihood of malignancy. *AJR* 2004;183:1209-15.
- [39] Zhao B, Yankelevitz D, Reeves A, Henschke C. Two-dimensional multi-criterion segmentation of pulmonary nodules on helical CT-images. *Med Phys* 1999;26: 889-95.
- [40] Wormanns D, Kohl G, Klotz E, Heindel W, Diederich S. Clinical evaluation of the reproducibility of volume measurements of pulmonary nodules. In: *Proceedings of SPIE Medical Imaging 2002*. SPIE 2002; 4684:316-22.
- [41] Fan L, Qian J, Odry B, Shen H, Naidich D, Kohl G, et al. Automatic segmentation of pulmonary nodules by using dynamic 3D cross-correlation for interactive CAD systems. In: *Proceedings of SPIE Medical Imaging 2002*. SPIE 2002;4684: 1362-9.
- [42] Wiemker R, Rogalla P, Hein E, Blaffert T, Rösch P. Computer aided segmentation of pulmonary nodules: automated vasculature cutoff in thick- and thinslice CT. In: *Proceedings of Computer Assisted Radiology and Surgery, CARS 2003*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2003: 965-790.
- [43] Kostis W, Reeves A, Yankelevitz D, Henschke C. Three-dimensional segmentation of solitary pulmonary nodules from helical CT scans. In: *Proceedings of Computer Assisted Radiology and Surgery CARS 1999*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1999:203-7.
- [44] Wiemker R, Zwartkruis A. Optimal thresholding for 3D segmentation of pulmonary nodules in high resolution CT. In: *Proceedings of International Conference on Computer Assisted Radiology and Surgery CARS 2001*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Publishers, 2001:653-8.
- [45] Goo JM, Tongdee T, Tongdee R, Yeo K, Hildebolt CF, Bae KT. Volumetric measurement of synthetic lung nodules with multi-detector row CT: effect of various image reconstruction parameters and segmentation thresholds on measurement accuracy. *Radiology*. 2005 Jun;235(3):850-6.
- [46] Yankelevitz DF, Reeves AP, Kostis WJ, Zhao B, Henschke CI. Small pulmonary nodules: volumetrically determined growth rates based on CT evaluation. *Radiology*. 2000 Oct;217(1):251-6.
- [47] Wormanns D, Kohl G, Klotz E, Marheine A, Beyer F, Heindel W, Diederich S. Volumetric measurements of pulmonary nodules at multi-row detector CT: in vivo reproducibility. *Eur Radiol*. 2004 Jan;14(1):86-92. Epub 2003 Nov 13.

김 종 호



- 1982. 2 서울대학교 공과대학 전자공학과
(공학학사)
 - 1986. 2 서울대학교 대학원 통신방식
전공(공학석사)
 - 1994. 8 서울대학교 대학원 영상처리
전공(공학박사)
 - 1995. 3~현재 서울대학교 의과대학
조교수
 - 1995. 3~현재 서울대학교 의료정보
담당교수
-