

초음파 영상 깃각 자동 측정 프로그램 개발

김종순[‡]

부산가톨릭대학교 보건과학대학 물리치료학과

Development of an Automatic Measuring Program for the Pennation Angle Using Ultrasonography Image

Kim Jongsoon, PT, Ph.D[‡]

Dept. of Physical Therapy, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan

Abstract

Purpose : The parameters used in architectural analysis are muscle thickness, fascicle length, pennation angle, etc. Pennation angle is an important muscle characteristic that plays a significant role in determining a fascicle's force contribution to movement. Ultrasonography has been widely used to obtain the image for measurement of a pennation angle since it is non-invasive and real-time. However, manual assessment in ultrasonographic images is time-consuming and subjective, making it difficult for using in muscle function analysis. Thus, in this study, I proposed an automatic method to extract the pennation angle from the ultrasonographic images of gastrocnemius muscle.

Method : The ultrasonographic image obtained from 10 healthy participants's gastrocnemius muscle using for developed automatic measuring program. Automatic measuring program algorithm consists with preprocessing, line detection, line classification, and angle calculation. The resulting image was then used to detect the fascicles and aponeuroses for calculating the pennation angle with the consideration of their distribution in ultrasonographic image.

Result : The proposed automatic measurement program showed the stable repeatability of pennation angle calculation.

Conclusion : This study demonstrated that the proposed method was able to automatically measure the pennation angle of gastrocnemius, which made it possible to easily and reliably investigate pennation angle more.

Key Words : automatic measuring program, pennation angle, ultrasonography

[‡]교신저자 : 김종순 ptjskim@cup.ac.kr

논문접수일 : 2017년 02월 02일 | 수정일 : 2017년 02월 17일 | 게재승인일 : 2017년 02월 21일

※ 이 논문은 2015년도 부산가톨릭대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음

I. 서론

1. 연구의 배경 및 필요성

근육의 생리적, 역학적 기능은 근육의 두께, 다발 길이(fascicle length), 횡단면적(cross-sectional area), 깃각(pennation angle)과 같은 구조적 요소에 의해 특징 지워진다(Zajac, 1989; Zhou 등, 2015). 그러므로 이와 같은 근육의 구조적 요소들은 근육의 작용을 이해하는데 있어 매우 중요하다(Zhou 등, 2015). 이들 구조적 요소 중 깃각은 깊은 널힘줄(deep aponeurosis)과 다발이 이루는 각 즉, 다발의 방향과 다발이 부착하는 근육 작용선(line of action)인 힘줄 축(tendon axis) 사이의 각도로서(Zajac, 1989) 근 다발이 힘을 발생시키는 기여 정도를 결정하는 중요 요소이다(Kawakami 등, 1995; Lee 등, 2015).

근육 구조와 생물학적, 전기생리학적 특성이 밀접하게 관련되어 있기 때문에 근육의 영상은 근육 작용을 연구하는데 매우 중요하다(Zhou 등, 2015). 많은 영상의학적 접근방법 중에서 초음파 영상(ultrasonography imaging)과 자기공명영상(magnetic resonance imaging)은 깃각과 같은 근육의 구조적 요소를 분석하기 위해 많이 사용되는 기법으로서(Lieber와 Ward, 2011; Narici, 1999) 근육의 힘 발생 능력의 정도를 연구하는 생리적, 생역학적 모형 수립 연구에 흔히 사용된다. 그러나 자기공명영상의 경우 연구에 적용하기에는 비용 발생이 크며 시간이 많이 걸린다는 문제와(Narici, 1999) 일정한 정적 자세에서만 측정이 가능하고 다양한 자세와 활동에서 깃각을 분석할 수 없다는 제한점이 있다(Kwah 등, 2013). 반면 초음파 영상은 비교적 비용 발생이 적으며 빠른 검사와 조작이 비교적 쉽고(Lieber와 Ward, 2011) 다양한 자세와 활동을 하는 동안 깃각을 측정할 수 있다는 장점이 있다(Aggeloussis 등, 2010; Lichtwark 등, 2007).

이로 인해 근육의 구조적 요소의 실시간 변화에 대한 분석을 위해 초음파 영상이 많이 사용되고 있는데(Peetrons, 2002; Zheng 등, 2006) 근육 수축에 따른 구조적 요소 변화의 평가(Hodges 등, 2003; Maganaris 등, 1998; Narici 등, 1996), 노화에 대한 평가(Binzoni 등, 2001; Narici 등, 2003; Narici와 Maganaris, 2006; Narici 등, 2008), 피로

에 대한 평가(Maganaris 등, 2002; Mademli와 Arampatzis, 2005), 신체 훈련의 영향에 대한 평가(Blazevich, 2006; Blazevich 등, 2007; Duclay 등, 2009; Kawakami 등, 1993), 동작을 수행할 때 근 섬유에 작용 분석(Fukunaga 등, 2001; Fukunaga 등, 2002; Lichtwark와 Wilson, 2006) 등의 연구가 보고되고 있다.

초음파 영상 분석을 통한 근육의 구조적 요소 변화에 대한 많은 연구들이 보고되고 있음에도 불구하고 초음파 영상 분석을 통한 구조적 요소 변화에 대한 타당도 연구는 전무한 실정이며 비교적 신뢰할 수 있는 검사라고는 하나 중등도의 신뢰도에서부터 높은 신뢰도 까지 다양한 연구가 보고되고 있으며 신뢰도에 대한 연구도 비교적 적은 수준이다(Kwah 등, 2013). 또한 초음파 영상을 통한 다발 길이와 깃각과 같은 구조적 요소의 분석은 검사자의 주관적 기준과 검사 숙련도에 의존하는 수기적 방법으로 이루어지고 있으며(Zhou 등, 2015) 초음파를 이용한 깃각 측정은 다발의 길이가 다양하고 근육 내 정렬이 상이하기 때문에(Gans와 de Vree, 1987; Lieber와 Friden, 2000; Van Donkelaar 등, 1999) 정확한 평가에 많은 어려움이 있다.

2. 연구의 목적

본 연구는 초음파를 통해 획득된 영상의 깃각 분석에서 일관된 기준과 방법을 적용하는 자동화 프로그램 개발을 통해 초음파를 이용한 근육의 구조 분석에서 신뢰할 수 있는 측정 방법을 제시하고자 한다.

II. 연구방법

1. 초음파 영상의 획득

깃각 자동 분석 프로그램 개발을 위한 초음파 영상은 건강한 피검자 10명의 장딴지근을 이용하여 획득하였다. 피검자는 엎드려 누운 자세를 취하도록 하였으며 장딴지근의 이완된 상태를 유지하지 위해 발목 관절 밑에 부드러운 재질의 베개를 받혀주었다. 초음파 영상 진단기(Sonoace X4, Medison, Korea)는 7.5 Mhz 선형탐촉자(linear

probe)를 사용하였으며 gain G55, dynamic range C04로 고정 한 후 왼쪽 장딴지근과 나란하게 탐촉자를 배치하였다. 초음파 영상 획득을 위해 검사 중 움직이지 않도록 한 후 근육의 압박을 최소화하기 위하여 충분한 양의 초음파 젤(gel)을 초음파 탐촉자와 피부사이에 도포하였으며 측정이 일정하게 되도록 탐촉자는 피부에 직각을 유지하였다(그림 1, 2).

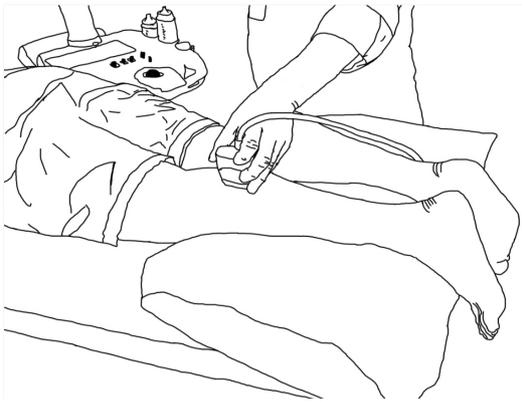


그림 1. 초음파 영상 획득 자세

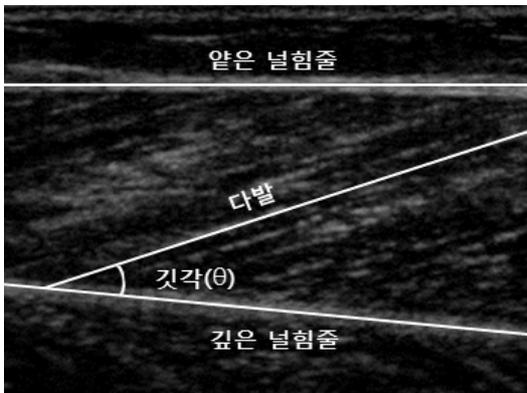


그림 2. 초음파 획득 영상

2. 초음파 영상 처리 알고리즘

측정된 장딴지근의 초음파 영상은 DICOM 파일로 저장하였다. 저장된 이차원 영상에서 얇은 널힘줄, 깊은 널힘줄, 다발을 자동으로 구분하고, 깃각을 계산하기 위해 다음과 같은 알고리즘 흐름도를 사용하였다(그림 3). 알고리즘은 크게 전처리(preprocessing), 선 검출(line detection), 선 분류(line classification), 각도 계산의 단계로 구성하였다.

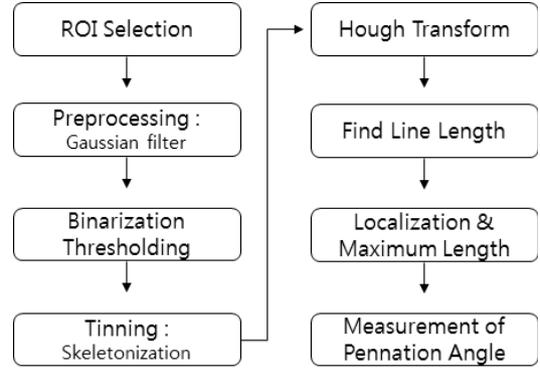


그림 3. 초음파 영상처리 알고리즘 흐름도

3. 전처리

DICOM 영상에서 얇은 널힘줄, 깊은 널힘줄, 다발 정보가 포함된 영상을 관심영역(region of interest; ROI)으로 설정하고, 이차원 가우시안 필터(2D Gaussian filter)의 평활화(smoothing) 작용을 이용하여 스펙클 잡음(speckle noise)을 제거하였다. 이후 관심영역의 히스토그램(histogram)을 보정하여 널힘줄과 다발 영역을 강화한 후 영상을 이진화(binartization)하였다. 널힘줄과 다발 라인이 강화된 이진화 영상에서 정확한 라인 정보를 얻기 위해 영상을 골격화(skeletonization) 기법을 이용하여 세선화(tinning) 하였다.

1) 이차원 가우시안 필터(2D Gaussian filter)

본 연구에서는 널힘줄, 다발을 특정하기 위해 허프 변환(Hough transform)을 이용하였다.

2) 히스토그램 보정(Histogram adjustment)

초음파 영상은 히스토그램 분포를 조절하여, 이후 수행되는 이진화 및 세선화 오차의 확률을 감소시켰다.

3) 이진화와 세선화(Binarization and tinning)

허프 변환을 위해 이진화하였다. 세선화는 이진화 영상에 포함된 라인정보가 면적을 가지면서 발생하는 오차들을 줄이고, 실제 널힘줄과 다발의 각도를 정확하게 반영하기 위해 사용되었다. 세선화는 골격화 알고리즘을 이용하여 수행하였다.

4. 선 검출

1) 허프 변환(Hough transform)

초음파 영상은 조직 간의 경계가 명확하지 않고 잡음이 많이 발생한다. 특히 다발은 영상에서 연속되는 실선으로 나타나지 않으며, 반복되는 사선 유형만 육안으로 확인할 수 있다. 널힘줄은 영상에서 비교적 여러 개의 선으로 보이지만, 특정 부분의 반사 강도가 높아서 화소가 밝게 보이는 몇 개의 점들로 표현되는 경우가 있다. 본 연구에서는 널힘줄과 다발의 모양을 분할(segmentation)하는 것이 아니라 직선을 찾는 것이 목적이므로 허프 변환을 이용하여 선 정보를 획득하였다. 허프 변환은 평면 위의 한 점을 지나는 다양한 각도의 직선을 그리고 그 직선 위의 점의 개수를 파악하여 이 정보를 θ (theta)와 ρ (rho) 평면상에 나타내어 직선으로 표현하였다(그림 4).

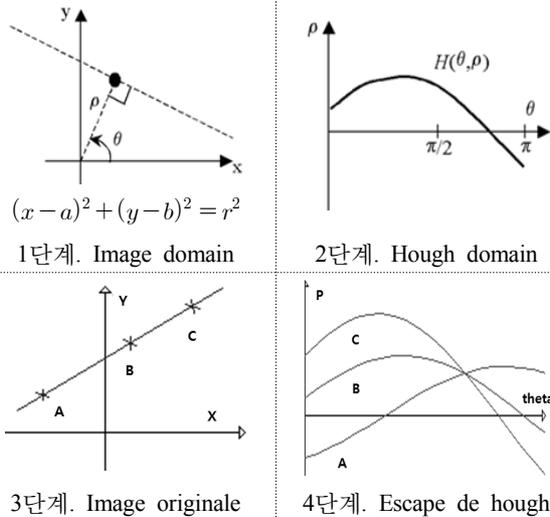


그림 4. 허프 변환 과정

5. 선 분류

허프 변환을 이용하여 영상에서 생성되는 직선들을 모두 검출한 후, 각 선의 각도, 영상 내에서의 위치, 길이 정보를 얇은 널힘줄, 깊은 널힘줄, 다발의 3가지 유형으로 분류 한 후, 분류된 유형에서의 최대길이(maximum length) 또는 가장 많은 각도 정보를 가지는 선을 선택하여, 얇은 널힘줄, 깊은 널힘줄, 다발로 결정하였다.

6. 각도계산

연고자 하는 각도는 얇은 널힘줄-다발과 깊은 널힘줄-다발의 세 직선이 이루는 두개의 각도로 구하였다. 분류된 세 개의 직선을 정렬하고 교차점 알고리즘(intersection algorithm)을 이용하여 인버스 코사인(\cos^{-1})을 계산하는 방식으로 두 조직이 이루고 있는 각각의 각도를 추출하였다(그림 5). 계산식은 다음과 같다.

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{v1 \cdot v2}{\|v1\| \|v2\|}\right)$$

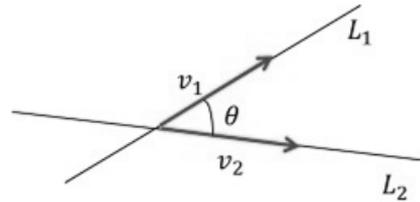


그림 5. 각도 측정

7. 프로그램의 구현

초음파 영상을 이용한 각도의 자동화 프로그램은 MATLAB(ver. 2015a, MathWorks Inc, USA)을 이용하여 구현하였다.

III. 결 과

1. 기본 그래픽 사용자 인터페이스(graphical user interface; GUI)의 구성

기본 그래픽 사용자 인터페이스는 DICOM 파일이 들어 있는 폴더를 선택하는 디렉터리(directory)(그림 6의 1), 선택된 폴더의 파일 내용을 보여주는 디렉터리 파일(directory file)(그림 6의 2), DICOM 파일을 선택하게 되면, 파일 이름을 표시하는 DICOM 헤더(header)창(그림 6의 3), 영상정보를 확인하고 DICOM 파일에서 얇은 널힘줄, 깊은 널힘줄, 다발 정보가 포함된 영상을 마우스 드래그(drag)를 이용하여 분석 영역을 선택하는 관심영역 설정창(그림

6의 4), 차례대로 이차원 가우시안 필터, 이진화, 세션화, 허프 도메인, 선 검출 결과를 보여주는 전처리 과정창(그림 6의 6), 선 검출 결과(그림 6의 8)와 측정된 각도(그림

6의 9)를 한 번에 자동적으로 처리하는 처리명령 버튼(그림 6의 7)으로 구성하였다.



그림 6. 기본 그래픽 사용자 인터페이스(graphical user interface; GUI)의 구성

2. 프로그램 구현 결과

프로그램 구현 결과는 아래 그림과 같다(그림 7).

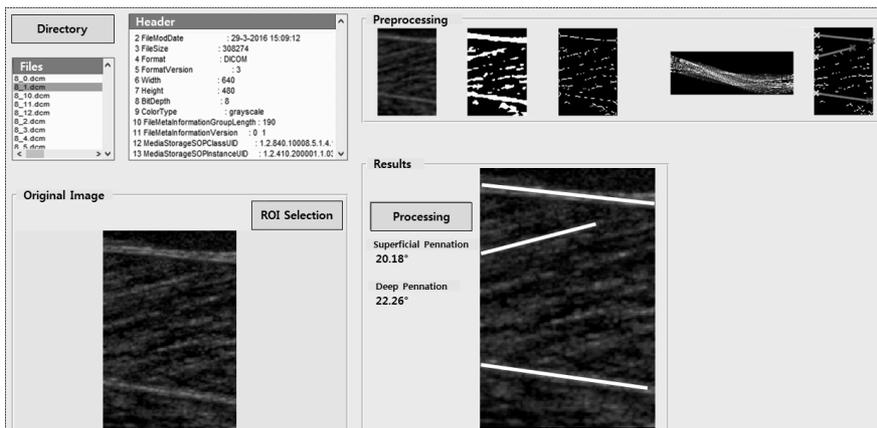


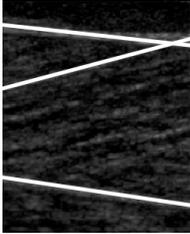
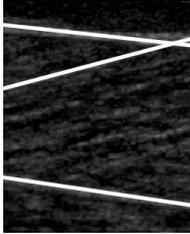
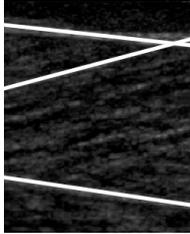
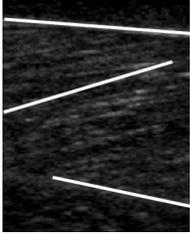
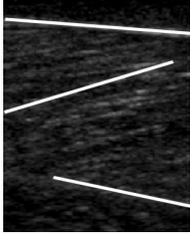
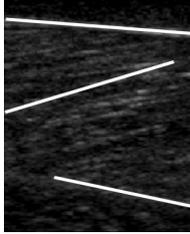
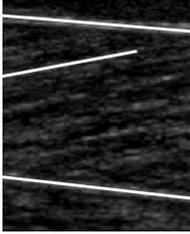
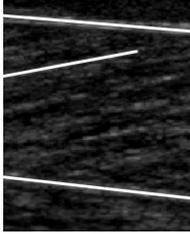
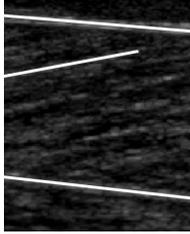
그림 7. 깃각 자동측정 프로그램 구현 결과

3. 프로그램 시뮬레이션(simulation) 결과

선택한 초음파 영상을 3회 반복하여 시뮬레이션한 결과 일관된 처리과정과 결과를 보였다(표 1).

프로그램 시뮬레이션 결과는 아래 표와 같다. 무작위로

표 1. 프로그램 시뮬레이션 결과

Case	Variables	Simulation times		
		1st	2nd	3rd
Case 1	Result image			
	Pennation angle	23.05°	23.05°	23.05°
Case 2	Result image			
	Pennation angle	34.89°	34.89°	34.89°
Case 3	Result image			
	Pennation angle	22.26°	22.26°	22.26°

IV. 고찰

초음파 영상은 인간의 깃각 측정에 흔히 사용되는 기법이다. Bolsterlee 등(2016)은 영상 면이 널힘줄과 수직으로 교차할 때 이론적으로 깃각의 가장 정확한 측정이 이루어진다고 보고하여 정확한 깃각 측정을 위해서는 신뢰성 있는 초음파 영상의 획득을 강조하였다. Bénard 등(2009)에 의하면 실제 다발 면(fascicle plane)에서 탐촉자가 15° 어긋나게 되면 깃각은 23 % 오차가 발생한다고 보고하여 초음파를 통한 깃각 측정의 어려움을 보고하였다. 또한 Aggeloussis 등(2010)은 보행 시 신뢰성 있는 깃각 측정을 위해서는 10회 이상을 반복 측정하여야 한다고 보고하였으며 Giannakou 등(2011)도 달리기를 수행 할 때 신뢰성

있는 깃각 측정을 위해서는 14회 이상의 반복 측정이 필요하다고 보고하여 신뢰성 있는 깃각 측정의 어려움을 보고하였다. 이에 본 연구는 신뢰성 있으며 간편하게 깃각을 측정할 수 있는 자동화 프로그램을 개발하고자 하였다.

본 연구에서는 초음파 영상이 가지는 특징인 스펙클 잡음의 심한 간섭, 낮은 해상도로 인한 특정 영상정보 분할의 어려움을 해결하기 위하여 전처리 과정을 수행하였다. 일반적으로 초음파 영상 분할을 위해 사용되는 전처리 필터로는 이방성 확산(anisotropic diffusion), 웨이브릿(wavelet), 가우시안 피라미드(Gaussian pyramid) 등이 있다. 이러한 방법들은 영상이 가지는 스펙클 잡음을 제거하고 불분명한 경계(edge)를 명확하게 하는 효과를 가지고 있다. 본 연구에서는 널힘줄과 다발을 특정하기 위해 허프 변환을 이용하였다. 따라서 영상에서의 선 정보 보다는 특

징 점들의 수를 늘려 각 점이 가지는 각도 값의 경향을 찾기에 유리하다. 이차원 가우시안 필터의 평활화 기능은 이를 수행하기에 적합하고, Zhou 등(2015)의 연구에서 사용한 방법들이 가지는 처리 과정의 반복 등, 처리시간 문제를 갖지 않는 장점이 있다. 또한 본 연구에서 사용된 골격화는 형태를 가진 이진화 영상에서 골격을 찾아가는 알고리즘으로 연결성, 길이, 방향 등 기하학적 모양 및 위상의 속성을 강조할 수 있다. 널힘줄과 다발은 이진화된 초음파 영상에서 연속성과 길이 방향 등의 속성을 지니고 있기 때문에 세선화를 수행하여 허프 변환에서 불필요하거나 오차를 가진 선들의 속성을 제거할 수 있다. 본 연구에서는 선 검출을 위해 허프 변환을 이용하였는데 초음파 영상에서 직선을 찾기 위해서는 주로 곡선 보정(curve fitting), RANSAC(random sample consensus), 그리고 허프 변환을 이용한다. 이중 허프 변환은 검출속도가 빠르고 수식으로 표현할 수 있는 도형들을 검출할 수 있는 장점을 가진다.

깃각의 자동 측정 프로그램 개발과 관련된 연구를 살펴보면(Zhou 등, 2015) 사용된 프로그램은 실시간 각도 변화를 측정하는 알고리즘을 기반으로 하고 있으며 영상 프레임 마다 경향을 가보 웨이브릿(Gabor wavelet), 라돈 변환(Radon transform), 허프 변환을 이용하여 추적하는 방식을 사용하고 있는데 이러한 방식은 이차원 영상 정보를 분석하기에는 알고리즘의 효율성이 떨어지는데 그 이유는 첫째, 선행 연구(Zhou 등, 2015)에서 개발한 프로그램은 동영상의 처음 프레임에서 수기적 방법으로 얇은 널힘줄, 깊은 널힘줄, 그리고 다발, 세 부분의 범위를 정하는 방법을 사용하여 이차원 영상에서 매번 세 번의 관심영역 선택이 필요하게 된다. 이러한 방법은 이차원 영상에서 깃각을 자동으로 추출하는데 제약으로 작용한다. 둘째, DICOM 파일은 영상 외의 다른 정보들도 포함하기 때문에, 영상의 해상도가 가보 웨이브릿을 적용하기에는 적절하지 않다. 셋째, 가보 웨이브릿의 요소와 라돈 변환을 이용하여 프레임별 변화분을 추적하고 있기 때문에, Zhou 등(2015)이 프로그램 개발에 사용한 알고리즘은 동영상에서만 사용할 수 있다. 따라서 이차원 영상에서 얇은 널힘줄, 깊은 널힘줄, 다발을 자동으로 구분하고 그 결과에 따라 깃각을 계산하기 위해서는 본 연구에서 사용된 알고리즘이 보다 효율적이라고 할 수 있다.

또한 본 연구에서는 선행 연구들(Aggeloussis 등, 2010; Bénard 등, 2009; Giannakou 등, 2011)과는 달리 무작위로 선택한 초음파 영상을 자동으로 3회 반복 측정한 결과 일관된 처리과정을 보여 신뢰성 있는 깃각 측정을 위한 반복측정의 번거로움을 해결하였다.

결과의 재현성면에서도 본 연구의 시뮬레이션 결과 반복 측정한 결과가 항상 일치된 결과를 보였는데, Zhou 등(2015)도 다중 해상도 분석(multi-resolution analysis) 및 선 특징 추출(line feature extraction)을 기반으로 장딴지근 각도와 넙다리 내갈래근의 길이를 정량적으로 식별하는 자동 방법을 개발하여 널힘줄 각도의 평균 오차가 0.1° 미만이었다고 보고하여 본 연구와 일치된 결과를 보였다. Pan 등(2015)도 장딴지근의 깃각을 자동 측정한 결과 실험 측정값과 이론값의 차이는 1° 미만이었다고 보고하여 본 연구 결과와 유사한 결과를 보고하였으나 본 연구와는 달리 초음파의 라디오 주파수 신호(radio frequency signal)를 이용하여 자동 측정 프로그램 설계 방법에는 차이가 있었다. Zhou와 Zheng(2015)은 루카스-카나데 옵티칼 플로우(Lucas-Kanade optical flow) 알고리즘을 적용하여 다발 길이를 자동 분석한 결과 자동측정 방법과 수동 측정 방법의 일치성이 높음을 보고하여 본 연구의 결과와 유사한 결과를 보고하였다.

V. 결론

본 연구의 결과 깃각 자동 측정 프로그램은 기존 수동적 방법에 의한 깃각 측정 방법에 비해 반복 측정의 필요성이 없고 깃각 측정 결과 또한 일관된 결과를 보여 임상에서 간편하게 사용할 수 있는 프로그램으로 사료된다. 차후 연구에서는 개발된 깃각 자동 측정 프로그램과 수동 측정 깃각 결과 값 간의 분석을 통한 신뢰성 분석에 대한 연구가 계속 연구로 이어져야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

Aggeloussis N, Giannakou E, Albracht K, et al(2010).

- Reproducibility of fascicle length and pennation angle of gastrocnemius medialis in human gait in vivo. *Gait Posture*, 31(1), 73-77.
- Bénard MR, Becher JG, Harlaar J, et al(2009). Anatomical information is needed in ultrasound imaging of muscle to avoid potentially substantial errors in measurement of muscle geometry. *Muscle Nerve*, 39(5), 652-665.
- Binzoni T, Bianchi S, Hanquinet S, et al(2001). Human gastrocnemius medialis pennation angle as a function of age: from newborn to the elderly. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci*, 20(5), 293-298.
- Blazevich AJ(2006). Effects of physical training and detraining, immobilisation, growth and aging on human fascicle geometry. *Sports Med*, 36(12), 1003-1017.
- Blazevich AJ, Cannavan D, Coleman DR, et al(2007). Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles. *J Appl Physiol*, 103(5), 1565-1575.
- Bolsterlee B, Gandevia SC, Herbert RD(2016). Effect of transducer orientation on errors in ultrasound image-based measurements of human medial gastrocnemius muscle fascicle length and pennation. *PLoS One*, 11(6), e0157273.
- Duclay J, Martin A, Duclay A, et al(2009). Behavior of fascicles and the myotendinous junction of human medial gastrocnemius following eccentric strength training. *Muscle Nerve*, 39(6), 819-827.
- Fukunaga T, Kubo K, Kawakami Y, et al(2001). In vivo behaviour of human muscle tendon during walking. *Proc Biol Sci*, 268(1464), 229-233.
- Fukunaga T, Kawakami Y, Kubo K, et al(2002). Muscle and tendon interaction during human movements. *Exerc Sport Sci Rev*, 30(3), 106-110.
- Gans C, de Vree F(1987). Functional bases of fiber length and angulation in muscle. *J Morphol*, 192(1), 63-85.
- Giannakou E, Aggeloussis N, Arampatzis A(2011). Reproducibility of gastrocnemius medialis muscle architecture during treadmill running. *J Electromyogr Kinesiol*, 21(6), 1081-1086.
- Hodges PW, Pengel LH, Herbert RD, et al(2003). Measurement of muscle contraction with ultrasound imaging. *Muscle Nerve*, 27(6), 682-692.
- Kawakami Y, Abe T, Fukunaga T(1993). Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. *J Appl Physiol*, 74(6), 2740-2744.
- Kawakami Y, Abe T, Kuno SY, et al(1995). Training induced changes in muscle architecture and specific tension. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 72(1-2), 37-43.
- Kwah LK, Pinto RZ, Diong J, et al(2013). Reliability and validity of ultrasound measurements of muscle fascicle length and pennation in humans: a systematic review. *J Appl Physiol*, 114(6), 761-769.
- Lee D, Li Z, Sohail QZ, et al(2015). A three-dimensional approach to pennation angle estimation for human skeletal muscle. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 18(13), 1474-1484.
- Lichtwark GA, Wilson AM(2006). Interactions between the human gastrocnemius muscle and the Achilles tendon during incline, level and decline locomotion. *J Exp Biol*, 209(Pt 21), 4379-4388.
- Lichtwark GA, Bougoulias K, Wilson AM(2007). Muscle fascicle and series elastic element length changes along the length of the human gastrocnemius during walking and running. *J Biomech*, 40(1), 157-164.
- Lieber RL, Fridén J(2000). Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture. *Muscle Nerve*, 23(11), 1647-1666.
- Lieber RL, Ward SR(2011). Skeletal muscle design to meet functional demands. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 366(1570), 1466-1476.
- Mademli L, Arampatzis A(2005). Behaviour of the human gastrocnemius muscle architecture during submaximal isometric fatigue. *Eur J Appl Physiol*, 94(5-6), 611-617.
- Maganaris CN, Baltzopoulos V, Sargeant AJ(1998). In vivo measurements of the triceps surae complex architecture in man: implications for muscle function. *J Physiol*, 512(Pt 2), 603-614.

- Maganaris CN, Baltzopoulos V, Sargeant AJ(2002). Repeated contractions alter the geometry of human skeletal muscle. *J Appl Physiol*, 93(6), 2089-2094.
- Narici MV, Binzoni T, Hiltbrand E, et al(1996). In vivo human gastrocnemius architecture with changing joint angle at rest and during graded isometric contraction. *J Physiol*, 496(Pt 1), 287-297.
- Narici M(1999). Human skeletal muscle architecture studied in vivo by non-invasive imaging techniques: functional significance and applications. *J Electromyogr Kinesiol*, 9(2), 97-103.
- Narici MV, Maganaris CN, Reeves ND, et al(2003). Effect of aging on human muscle architecture. *J Appl Physiol*, 95(6), 2229-2234.
- Narici MV, Maganaris CN(2006). Adaptability of elderly human muscles and tendons to increased loading. *J Anat*, 208(4), 433-443.
- Narici MV, Maffulli N, Maganaris CN(2008). Ageing of human muscles and tendons. *Disabil Rehabil*, 30(20-22), 1548-1554.
- Pan Q, Chen Z, Wang Q, et al(2015). Automatic extraction of the pennation angle of the gastrocnemius muscles from ultrasound radiofrequency signals. *Nan Fang Yi Ke Da Xue Xue Bao*, 35(8), 1116-1121.
- Peetrons P(2002). Ultrasound of muscles. *Eur Radiol*, 12(1), 35-43.
- Van Donkelaar CC, Kretzers LJ, Bovendeerd PH, et al(1999). Diffusion tensor imaging in biomechanical studies of skeletal muscle function. *J Anat*, 194(Pt 1), 79-88.
- Zajac FE(1989). Muscle and tendon: properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor control. *Crit Rev Biomed Eng*, 17(4), 359-411.
- Zheng YP, Chan MM, Shi J, et al(2006). Sonomyography: monitoring morphological changes of forearm muscles in actions with the feasibility for the control of powered prosthesis. *Med Eng Phys*, 28(5), 405-415.
- Zhou GQ, Chan P, Zheng YP(2015). Automatic measurement of pennation angle and fascicle length of gastrocnemius muscles using real-time ultrasound imaging. *Ultrasonics*, 57, 72-83.
- Zhou GQ, Zheng YP(2015). Automatic fascicle length estimation on muscle ultrasound images with an orientation-sensitive segmentation. *IEEE Trans Biomed Eng*, 62(12), 2828-2836.