

견관절의 회전중심점을 고려한 동작가능 영역의 생성

정의승¹ · 이상규²

¹고려대학교 산업공학과 / ²포항공과대학교 산업공학과

Generation of a Practical Reach Envelope with the Center of Rotation of the Shoulder Joint Considered

Eui S. Jung · Sangkyu Lee

Shoulder joint is the most movable joint in human body with, at least, three degrees of freedom, since there are at least three bones and five joints involved in shoulder movement. Due to the complexity of the shoulder joint and the lack of appropriate anatomical data, modeling of the shoulder joint has been known to be extremely difficult. In many biomechanical models being used, shoulder joint is considered as a fixed point and it is also assumed that the shoulder joint does not noticeably move during the shoulder movement. However, such an assumption is not valid in real applications and causes inaccuracy, especially, in the area of workspace evaluation. The reachable area generated by a human becomes somewhat different from that of current models for those models fail to appropriately reflect the movement of shoulder joint's center of rotation.

In this study, the location of the shoulder joint's center of rotation was obtained in relation to the location of humerus, on which a new model for reach envelope generation was developed for workspace evaluation. From the experiments conducted for three subjects, the initial location of the center of rotation was determined for each subject and subsequent changes in the instantaneous center of rotation were drawn as a function of flexion and abduction of the shoulder. Based on the regression analysis, the study suggested a new method for the generation of reach envelope. Comparisons were also made among real reach envelopes obtained from the experiment, the ones from the model, and the ones from the new method suggested in the study. As a result, the prediction errors incurred from the new method were significantly reduced when compared to the ones from the current approach.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 연구목적

인체를 구성하는 관절 중, 견관절(肩關節, Shoulder Joint)은 굴곡-신전(Flexion-extension), 외전-내전(Abductio-adduction), 축전(Rotation)의 3개 자유도를 가지고 있으며, 가장 움직임이 자유

로운 관절로 알려져 있다.

견관절의 이러한 자유로운 움직임은 다른 관절과는 달리 견관절 주변에 위치한 3개의 뼈(쇄골-Clavicle, 견갑골-Scapular, 상완골-Humerus)와 이들 사이에서 5개의 관절이 서로 관계를 가지고 움직이기 때문이다[13, 9, 10, 5].

그러므로 정확한 어깨의 움직임을 파악하기 위해서는 견관절 외에 쇄골 및 견갑골을 포함하는 견대(肩帶, Shoulder Girdle)

의 움직임을 동시에 고려해야 하지만 일반적으로는 단순히 견관절만을 고려하고 있으며[8], 견관절의 정확한 위치 파악 없이 추정을 통하여 모델링하고 있다.

NASA/Webb에 의하면 견관절의 중심은 팔을 45° 외전시켰을 때 견봉점(Acromion)의 바깥쪽에서 팔의 Long axis에 수직인 직선과 상완골의 골두(骨頭, Head) 및 조면(粗面, Tuberosity)이 만나는 점으로 정의되어 있다[14]. 그러나 실제로 많은 인체역학적 모델에 있어서는 견봉점을 견관절로 가정하고 있다[3].

견봉점을 견관절로 가정하여 인체를 모델링할 경우, 어깨의 움직임을 정확하게 표현할 수 없다는 문제점이 발생한다. 어깨의 굴곡-신전이나 외전-내전이 이루어질 경우 견갑골의 움직임에 의해 견관절의 회전중심점(Center of Rotation)의 위치가 계속 변하게 되기 때문이다. 이러한 사실은 특히 Workspace 평가를 위한 모델에서 문제점으로 크게 작용할 수 있다.

현재 Workspace 평가 및 디자인을 위해 제시되고 있는 가이드라인이나 컴퓨터모델에서는 어깨의 위치를 몸의 중앙에서 견봉점까지의 거리만큼 이동한 점과, 고관절(Hip Joint)에서 몸통 높이만큼 올라간 점 또는 어깨높이로 고정시키고 있다[16, 2].

그러나 실제 견관절의 회전중심점은 견봉점이 아니며, 견봉점 역시 그 위치가 공간상에서 변하게 된다[4, 17]. 그러므로 굴곡-신전, 외전-내전이 이루어짐에 따라 어깨의 회전중심점의 위치변화를 파악하여 Workplace 모델에 적용하는 것이 보다 정확한 Workplace의 설계 및 인간공학적인 평가에 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 견관절을 하나의 고정된 점으로 가정하여 인체역학적 분석을 수행하거나 Workplace를 설계, 평가할 때 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위한 방안을 제시하기 위하여 크게 다음과 같은 내용을 포함하게 된다.

- 1) 팔의 움직임이 일어나기 직전의 회전중심점의 위치를 실험을 통하여 결정한다.
- 2) 굴곡 또는 외전으로 표현되는 어깨의 움직임이 진행됨에 따라 팔의 위치를 표현하는 Spherical 좌표계 각도인 θ (굴곡), ϕ (외전)와 회전중심점 사이의 관계를 파악한다.
- 3) 팔의 위치와 회전중심점 위치 사이의 관계가 파악되면 이를 이용하여 3차원 공간상에서 주어진 각도만큼 굴곡과 외전을 수행하였을 때, 회전중심점의 위치이동을 고려한 새로운 동작가능영역(Reach Envelope)을 생성한다.

1.2 관련연구

인체를 구성하는 관절 중 견관절은 관련 데이터의 부족과 그 구조의 복잡성으로 인하여 연구성과가 많지 않은 분야로 알려져 있다[6, 8]. Inman[12]은 견관절의 작용에 관한 연구를 통하여 견관절의 굴곡과 외전은 견대의 움직임과 동시에 발생한다는 사실을 밝혀냈다[9, 13]. 이 연구에 의하면 굴곡이나 외전이 일어날 경우, 최초의 30° ~ 60°에서는 견갑골이 움직이지 않거나 안정된 위치를 찾기 위한 제한된 움직임이 있을 수 있으며, 30° 이후의 외전과 60° 이후의 전(前)방향 굴곡에 대해서는 상완골의 움직임이 견갑골과 일정한 관계를 가지고 있다는 것을 밝혀냈다. Dvir와 Berme[4]는 X-ray를 사용하여 견쇄관절(肩鎖關節, Acromio-clavicular Joint)의 외전에 따른 위치 변화를 Frontal 평면에 대하여 제시하였다.

Shoup[17]은 'Moire Fringe'라는 Optical Measurement 방식을 이용해 30° ~ 180°의 외전에 대해 순간회전중심점(Instantaneous Center of Rotation)의 위치를 한명의 피실험자를 대상으로 측정하였다. 관절의 순간회전중심점은 관절이 움직임에 따라 위치가 변하며 그 경로인 Centrod의 경로를 <그림 1>과 같이 제시하였다.

어깨의 기구학적 모델에 관해서는 여러 연구가 존재하고 있다. Engin 외[5, 7]는 일련의 연구를 통해 어깨의 기구학적 모델을 제시하였다. 이 연구에서는 사람의 어깨를 3개의 Link와 이들을 연결하는 3개의 Universal Joint로 모델링하였다. 그리고 이 모델이 Open Chain System이기 때문에 발생하는 Redundancy의 문제를 해결하기 위하여 'Minimum Joint Motion'

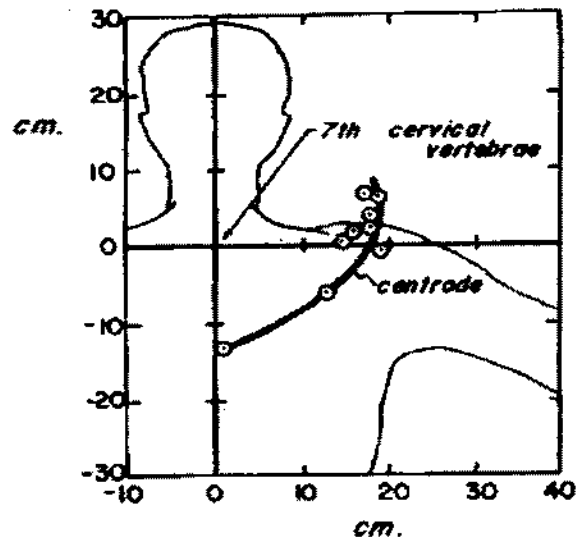


그림 1. Moire Fringe 방식을 이용한 Centrod(Shoup[17]).

이라는 Criterion에 대해 Optimization 방법을 사용하는 연구를 수행하였다. Hogfors 등[10, 11]은 상완골과 쇄골, 견갑골의 상대적 움직임을 Euler Angle을 적용하여 찾아내었다. 그러나 이 연구는 피실험자의 상완골두에 Tantalum Ball을 직접 주입하고 X-Ray를 이용하여 실험이 이루어졌기 때문에 충분한 데이터를 얻을 수 없어 상완골의 제한된 움직임에 대해서만 이루어졌다는 문제점이 있다.

Lenarcic[15]는 쇄골에서 출발하여 손목까지 이르는 Link를 3개의 Link, 즉 쇄골에서 견봉점까지, 견봉점에서 팔꿈치, 그리고 전완(前腕)으로 구성된 기구학적 모델을 제시하였다. 그러나 이 모델 역시 관절변화경향에 대한 연구 고려가 포함되어 있지 않으며, 단지 동작범위 한계자료를 이용하여 반복적 Sweeping을 통해 동작가능영역을 생성하는 모델을 제시하는데 그치고 있다.

2. 연구방법 및 실험

2.1 연구방법

2.1.1 좌표계 설정

본 연구를 위한 Global 좌표계는 <그림 2>와 같이 흉쇄관절을 원점으로 하여, x축은 사람의 Longitudinal Axis에서 바닥을 향하는(Inferior) 방향, y축은 Frontal Axis에서 왼쪽을 향하는(Medial) 방향으로 설정하였으며, 이에 따라 z축은 Right Hand Rule에 의하여 Sagittal Axis에서 앞으로 나오는(Anterior) 방향으로 결정된다. 흉쇄관절에 설정된 좌표계(O) 외에 견관절 회전 중심점의 상대적 위치변화를 파악하기 위하여 굴곡-신전, 외

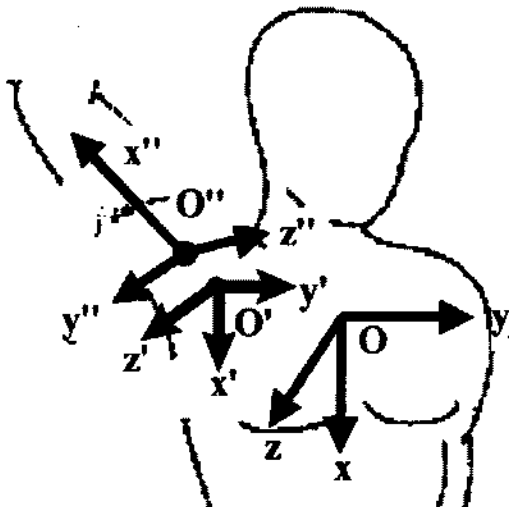


그림 2. 사용된 좌표계.

전-내전이 없는 초기자세(Anatomical Neutral Position)에서의 회전 중심점 위치에 Local 좌표계(O')를 설정하였다. 상완골의 공간상의 위치를 파악하기 위해서는 견봉점과 회전 중심점의 위치에 각각 Local 좌표계를 정의하고 회전 중심점이 변함에 따라 변화된 회전 중심점을 원점으로 하는 새로운 Local 좌표계(O'')를 연속적으로 설정하였다.

2.1.2 어깨의 초기 회전 중심점 결정

본 연구에서는 피실험자가 굴곡, 외전이 없는 초기 자세로 서 있는 상태에서 움직임이 시작되는 시점의 회전 중심점을 찾아 초기 회전 중심점으로 결정하였다. 관절의 초기 회전 중심점을 결정하기 위한 방법으로는 다음과 같은 방법을 적용하였다.

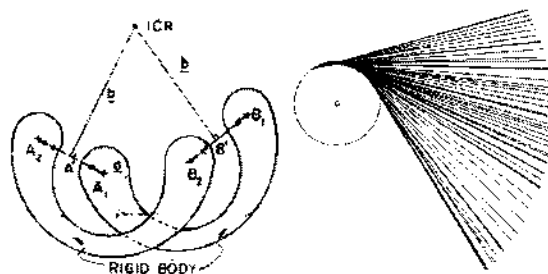
1) Reuleaux Method

이 방법은 <그림 3>(a)에서 보는 마와 같이 강체(Rigid Body)가 위치를 모르는 어느 한 점을 중심으로 회전할 경우에 강체에 고정된 2개 점의 이동을 이용하는 것으로서, 대응되는 점을 연결하는 각각의 직선에서 그은 수직 이동분선이 만나는 점을 회전 중심점(Instantaneous Center of Rotation)의 위치로 결정하는 방법이다.

그러나 이 방법은 회전 중심점의 위치가 고정된 두 점의 위치 데이터에서 발생하는 오차에 민감하게 반응한다는 문제점과 회전 중심점을 중심으로 하는 회전각이 작을수록 오차가 커지는 문제점이 있다[1].

2) 벡터의 End Point Fitting 방법

Reuleaux 방식 외에 평면운동에 대한 회전 중심점 결정에 사용되는 방법으로는 'Tangent Method'가 있다[18]. 이 방식은 Reuleaux 방식에서의 두 데이터 점들의 경로의 Tangent Line에



(a) Reuleaux Method (b) End Point Fitting

그림 3. 초기 회전 중심점 결정방법.

수직인 직선을 그어 회전중심점의 위치를 결정하는 방식이다.

본 연구에서는 실험조건에 맞도록 Tangent Method를 변형시켜 다음과 같은 방식을 이용하였다. 즉, 그림 3(b)와 같이 두 점을 연결하는 하나의 벡터가 회전중심점을 중심으로 회전하여 벡터의 궤적을 알게 될 경우 벡터의 한쪽 끝점들을 가장 잘 Fitting하는 원을 그리고, 그 원의 중심을 회전중심점으로 설정하였다. 본 연구에서는 위의 두 가지 방법을 같이 사용하여 초기 회전중심점의 위치를 결정하였다. 먼저 Reuleaux 방법을 사용하여 회전중심점의 위치를 결정하고, 얻어진 회전중심점과 견봉점을 기준으로 하여 피실험자별로 일정한 범위 내의 점들에 대하여 벡터 끝점까지 거리차의 합이 최소인 점을 회전중심점으로 하였다.

2.1.3 회전중심점의 위치변화 파악

초기 회전중심점이 결정되면 이에 근거하여 팔이 움직임에 따라 변하는 회전중심점의 위치를 계속하여 추정하였다. 이러한 결과는 Receiver를 통하여 얻어지는 벡터의 방향과 초기 회전중심점 위치 사이의 Geometry에 의한 벡터 계산을 통해 이루어진다. 본 연구에서는 초기 회전중심점의 위치를 결정한 후, 어깨의 움직임이 없는 초기자세에서의 벡터를 기준으로 하여, 이 벡터와 초기 회전중심점 사이의 Geometry가 팔이 움직인 후의 벡터에 대해서도 동일한 Geometry를 유지하도록 하여 회전중심점의 위치를 계산하였다.

2.2 실험

2.2.1 실험기기

실험에서 팔의 3차원 상에서의 공간좌표를 얻기 위하여 Polhemus FastrackTM Motion Tracking System을 사용하였다. 이 System은 기준좌표계를 가지고 있는 Transmitter와 공간상의 좌표를 추적하는 Receiver 및 Host Computer와 RS232 Port를 통해 연결되는 SEU의 세 부분으로 구성되어 있다. 하나의 Receiver가 움직인 위치에 대하여 x, y, z 좌표와 Azimuth(Pitch), Ele

vation(Yaw), Roll의 모두 6개의 자유도에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 데이터의 신뢰도를 높이기 위하여 Transmitter에서 70cm 범위 내에서 실험이 이루어졌다. 이에 따른 오차는 최대 0.5cm 이내로 추정되며, 데이터는 1° 움직임 당 2회 이상의 Sampling이 이루어지도록 하였다.

2.2.2 피실험자

<표 1>의 피실험자는 어깨에 관련질환을 앓은 적이 없는 대학생 4명을 대상으로 하였으며, 실제분석에는 3명(피실험자 1~3)의 데이터를 사용하였고, 피실험자 4의 결과는 검증에 이용하였다.

2.2.3 실험방법

공간상에서의 실제 피실험자의 동작가능영역을 생성하고, 팔의 위치에 대한 견관절의 회전중심점 위치변화를 파악하기 위한 실험을 다음과 같이 두 가지로 실시하였다.

1) 동작가능영역의 생성

피실험자의 동작가능 영역을 생성하기 위하여 실시되었으며, 움직임이 가능한 범위까지 팔을 움직여 동작가능영역을 구하였다. 실험에서는 피실험자가 최대가능범위까지 동작가능영역을 그리도록 한 후, 연속적으로 얻어지는 좌표를 이용하여 팔의 Spherical 각도를 구하여 분석하였다. 세부적인 실험 방법은 다음과 같다.

- ① 피실험자에게 초기자세를 취하게 하고 흉쇄관절, 쇄골의 바깥 끝점, 견봉점, 내측상과(内側上顆, Medial Epicondyle)의 4곳에 Receiver를 부착한 후, 좌표계 변환에 필요한 기본자세를 측정한다.
- ② 기본자세의 측정이 끝난 후, 피실험자의 상체를 고정시키고 다시 내측상과와 외측상과(外側上顆, Lateral Epicondyle), 그리고 상완골에 2개의 Receiver를 부착한다.
- ③ 피실험자에게 약 22.5°의 굴곡을 시킨 후, Medial 방향으로 내전을 수행하도록 한다. 최대가능범위까지 내전이 이루어진 후 다시 Lateral 방향으로 외전을 수행하여 최대범위까지 움직인 후, 출발점으로 다시 돌아오게 한다.
- ④ 출발시의 굴곡각도를 약 22.5° 씩 증가시키면서 3)의 과정을 6번 반복한다.
- ⑤ 6개의 Envelope에 대한 실험이 끝난 후 피실험자는 다시 초기자세를 취한 후 Frontal 평면에서 굴곡 없이 외전을 수행한 다음 다시 출발지점으로 돌아온다.

표 1. 피실험자의 Anthropometry (단위 : mm)

	Height	Arm Length	Upper Arm
피실험자 1	18274	769	331
피실험자 2	1762	753	327
피실험자 3	1770	764	326
피실험자 4	1707	752	312

2) 회전중심점의 추정

초기자세에서 어깨의 초기 회전중심점의 위치 및 팔을 굴곡 또는 외전시킬 때 회전중심점의 위치변화를 추적하기 위한 실험으로 Sagittal 평면상에서 Anterior 방향으로 굴곡, Frontal 평면상에서 외전, 그리고 90° 굴곡이 이루어진 상태에서 최대 가능범위까지 Envelope를 그리도록 하였다. 실험방법은 다음과 같다.

- ① 피실험자에게 견봉점과 외측상과, 그리고 상완골에 2개의 Receiver를 부착한 후, 초기자세를 취하게 한다. 각 Receiver에서 데이터를 취하여 이것을 기준자세로 설정한다.
- ② 초기자세에서 피실험자에게 가능한 최대 범위까지 굴곡을 수행하도록 한 후, 다시 초기자세로 돌아온다.
- ③ 팔을 90° 굴곡시킨 후 Medial 방향으로 내전을 최대 가능 범위까지 수행한 후 다시 Lateral 방향으로 최대 가능 범위까지 외전을 수행한다. 외전의 수행 후 다시 90° 굴곡이 이루어진 상태로 돌아오도록 한다.
- ④ 피실험자에게 Anatomical Posture를 취하게 한 후, Frontal 평면상에서 최대 가능 범위까지 외전을 수행하고, 다시 초기자세로 돌아온다.
- ⑤ 약간의 휴식 후 위의 과정을 반복한다.

3. 결과 및 분석

3.1 초기 회전중심점의 결정

Sagittal 평면과 Frontal 평면에서 실시한 굴곡 및 외전에 대하여 실시된 실험결과에 근거하여 초기 회전중심점을 결정하였다. 실험결과 얻어진 각 피실험자별 회전중심점 위치를 견봉점을 기준으로 하여 나타낸 것은 다음 <표 2>와 같다. Sagittal 평면과 Frontal 평면에 대하여 각각 실험이 실시되었으므로, 초기 회전중심점의 위치는 굴곡과 외전에 대해서 다르게 존재한

다. 본 연구에서는 회전중심점의 최종적인 위치로 굴곡에 대한 회전중심점의 위치와 외전에 대한 회전중심점의 위치의 중간점으로 선택하였다.

<표 2>에서 볼 수 있듯이 초기 회전중심점의 위치는 견봉점을 기준으로 하여 견봉점의 아래방향(Inferior), 앞방향(Anterior) 그리고 안쪽방향(Medial)에 위치함을 알 수 있다. 최종적으로 구해진 초기 회전중심점의 위치를 보면 Inferior 방향으로서는 피실험자별 차이가 거의 보이지 않고 있으며 Anterior, Medial 방향으로는 최대 1cm정도까지 차이를 보이고 있다.

최종적으로 구해진 회전중심점의 견봉점으로부터의 거리를 피실험자의 어깨너비와 윗팔길이에 대한 비율로 나타내 보면 <표 3>과 같다.

<표 3>에서 어깨너비는 실험시 측정된 기본자세의 결과를 이용하여 견봉점에서 흉쇄관절로 향하는 벡터를 Frontal Axis로 투영시켜 구한 거리이며, 윗팔길이는 견봉점으로부터 주관절(Elbow Joint)까지의 길이이다. 비율은 위치가 견봉점으로부터 어느 정도 거리에 위치하는가를 어깨너비 또는 윗팔길이에 대한 비율로 나타낸 것이다.

어깨너비에 대해서는 피실험자별로 비율의 차이가 크게 나타나고 있다. 피실험자 1의 경우 3명의 피실험자 중 가장 키가 크지만 어깨너비는 가장 작게 나타나고 있으며, 동시에 견봉점으로부터의 Inferior 방향으로의 이동정도는 가장 크게 나타나고 있어 어깨너비와 회전중심점의 위치와의 관계는 없어 보인다. 윗팔길이에 대한 비율은 길이가 짧을수록 견봉점에 가까운 위치에 회전중심점이 존재하는 경향이 보이고 있다. 각 피실험자별 키에 대한 비율로 회전중심점 위치를 파악하여 보면 피실험자 1의 경우 견봉점에서 Anterior 방향으로 2.71% 떨어진 곳에, 견봉점에서 Inferior 방향으로 1.43% 떨어진 곳에 회전중심점이 위치하고 있으며, 피실험자 2의 경우는 각각 2.55%와 1.36%, 그리고 피실험자 3의 경우는 각각 2.24%와 1.24%이다. 따라서, 피실험자 개인별 Anatomy 차이가 민감하게 영향을 미치고 있으며, 회전중심점의 추정방식들이 데이터의 오차에 민감하게 반응하고 있다.

표 2. 피실험자별 초기 회전중심점 위치 (단위 : mm)

	회전중심점 위치(견봉점 기준)		
	Inferior	Anterior	Medial
피실험자 1	26.0	9.8	49.5
피실험자 2	24.0	2.3	45.0
피실험자 3	22.0	13.2	

표 3. 피실험자의 Anthropometry와 초기 회전중심점의 위치 (단위 : mm)

	어깨너비	비율(%)	윗팔길이	비율(%)
피실험자 1	217.5	22.76	331.0	7.85
피실험자 2	228.1	19.73	326.6	7.35
피실험자 3	223.8	17.74	325.9	6.75

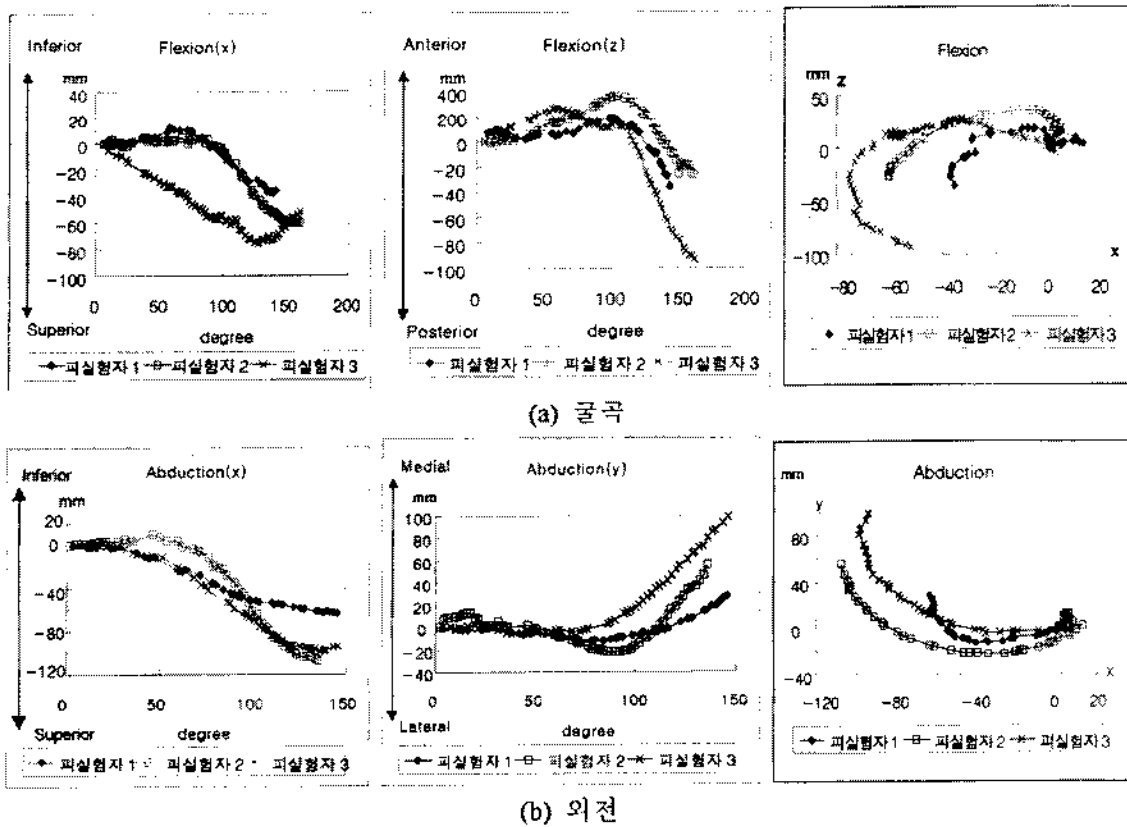


그림 4. 피실험자별 상대적 회전중심점 위치변화.

3.2 회전중심점의 위치변화

앞에서 설정된 초기 회전중심점에 대하여 굴곡(θ) 또는 외전(ϕ)으로 표현되는 어깨의 움직임이 이루어짐에 따라 연속적으로 변화하는 회전중심점의 위치를 각 평면(Sagittal, Frontal 평면)에서 추정하였다. Sagittal 평면에 대해서는 회전중심점의 위치가 Inferior(x), Anterior(z) 방향에 대하여 나타나게 되며, Frontal 평면에 대하여는 Inferior(x), Lateral(y) 방향에 대하여 나타나게 된다. 각 피실험자별로 굴곡 또는 외전에 따른 회전중심점위치변화를 초기 회전중심점 위치에 대한 상대적 좌표로도 도시하면 <그림 4>와 같다. 그림에서 보면 굴곡, 외전이 일어남에 따라 회전중심점의 위치변화 경향은 피실험자별로 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

1) 굴곡

굴곡이 일어날 때 상하방향의 경우, 회전중심점 위치변화 경향을 보면 대략 50° 정도까지 굴곡이 일어남에 따라 회전중심점은 크게 변하지 않고 있음을 볼 수 있으며, 그 이후의 증가에 대해서는 회전중심점이 위로 올라가는 경향이 보인다. 전후방향에 대해서는 약 40° 정도까지 변함이 없으며 그 이후에

앞으로 이동을 한 후 100° 이후에 대해서는 위치가 다시 뒤로 이동하고 있다. $40^\circ \sim 50^\circ$ 사이에서 회전중심점의 큰 변화가 나타나지 않는 것은 굴곡시 60° 까지는 견갑골이 움직이지 않거나 안정된 위치를 찾기 위하여 제한적으로 움직인다는 Inman[12]의 연구결과와 일치한다고 볼 수 있다[9, 13].

피실험자 3의 경우 굴곡시 다른 피실험자와는 약간 다른 경향을 보이고 있다. 이는 실험시 피실험자가 어깨움직임에 대

표 4. 회귀분석의 결과

	종속변수	회귀계수		R^2
		β_0	β_1	
굴곡	x	β_0	0.8632	0.56
		β_1	-0.0424	
	z	β_0	-1.3184	0.61
		β_1	0.1053	
외전	x	β_0	1.5451	0.81
		β_1	0.0718	
	y	β_0	1.9098	0.79
		β_1	0.1258	
		β_2	0.0011	
		β_3	0.0011	

해 인위적인 조절이 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다.

2) 외 전

외전이 발생할 경우 역시 낮은 각도의 범위에서는 회전중심점이 크게 변하지 않고 있다. 상하방향으로는 약 30° 이후부터 위치변화가 보이기 시작하며 그 이후에 대하여 아래 방향으로 회전중심점이 계속 이동하고 있다. 좌우방향으로는 40° ~ 50° 이후부터 변화가 보이기 시작하여 왼쪽으로 이동하고 있다. 전체적으로 외전 각도가 증가함에 따라 아래 왼쪽으로 증가하고 있기 때문에 Reach가 가능한 범위가 좁아지게 될 것으로 예상할 수 있다.

전체적으로 보았을 때 회전중심점이 움직이는 경향은 피실험자 별로 동일하다고 볼 수 있겠으나 값의 범위는 차이가 있다. 이의 원인은 실험시 피실험자마다 Reach를 위해 어깨를 움직이는 방식에 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다. 어깨의 경우 자유도가 많기 때문에 흉쇄관절이 고정되어 있고

목, 외전이 이루어지지 않은 상태에서도 견관절만의 움직임이 가능하므로 Reach 가능 범위가 달라질 수 있기 때문이다.

3.3 회귀분석

3.2절의 결과에 근거하여, Sagittal 평면에서의 굴곡시 팔이 취하는 각도 θ 및 Frontal 평면에서의 외전시 각도 ϕ 와 회전중심점 위치변화 사이의 연관성을 알아보았다. 굴곡의 경우에는 회전중심점의 위치 x, z 를 종속변수로 하고 y 를 독립변수로 하여 회귀분석을 실시하였으며, 외전의 경우에는 종속변수 x, y 와 독립변수 ϕ 에 관하여 실시하였다. 회귀분석은 1차와 2차에 대해 실시되었으며, 최종 선정된 모델에 대한 회귀분석 모형은 굴곡과 외전의 x 는 1차, 그리고 굴곡의 z , 외전의 y 에 대해서는 2차를 선정하였다.

각 경우 Parameter에 대한 p -value는 0.0001로 모두 유의하게 나타났다. 굴곡의 경우 외전보다 R^2 값이 낮게 나타나고 있다.

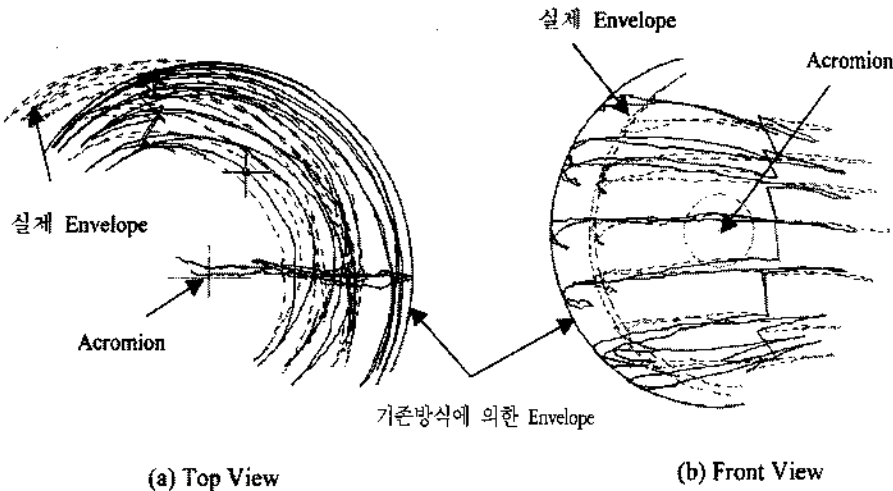


그림 5. 피실험자 1의 실제 Envelope와 기준방식과의 비교.

표 5. Reach Envelope별 오차변화 (단위 : mm)

Envelope	피실험자 1	피실험자 2	피실험자 3
Envelope 1	28.3	27.4	15.9
Envelope 2	39.2	36.8	30.8
Envelope 3	65.3	49.9	39.7
Envelope 4	81.7	59.8	44.8
Envelope 5	75.4	53.9	45.1
Envelope 6	58.9	49.6	34.4
Envelope 7	91.1	57.9	60.7

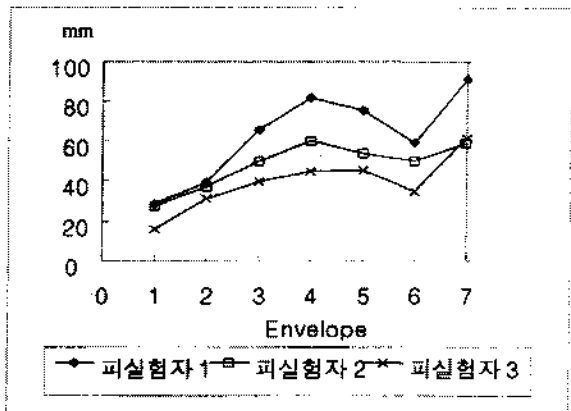


그림 6. 동작기능 영역별 오차변화 경향.

이는 피실험자 3의 굴곡에서의 회전중심점 움직임 경향이 다른 피실험자들과 차이가 나기 때문으로 판단된다.

굴곡이나 외전의 경우, x 를 종속변수로 하는 2차 모형에서는 Parameter의 유의성이 나타나지 않아 1차 모형을 선택하였으나 변화 경향이 단순 선형이 아님을 고려하여 데이터의 Log, Exponential 등의 Transformation을 통한 회귀분석을 시행하였다. 그러나 이러한 Transformation을 통한 회귀분석 모형이 기존의 1차 회귀모형보다 우월함이 보이지 않아 모형선정에서 제외하였다.

3.4 Reach Envelope의 생성 및 검증

본 장에서는 피실험자별로 실험을 통해 구한 동작가능영역의 측정값과 기존에 사용하던 방식으로 동작가능영역을 생성하였을 경우를 비교하였다. 또한, 3.3절에서 설명된 회귀분석 결과로 얻어진 회전중심점의 위치와 굴곡 및 외전과의 관계를 적용시킨 새로운 방식을 피실험자 4의 동작가능영역에 적용시켜 측정값과 기존방식 그리고 새로운 방식 사이의 비교를 통해 앞의 결과를 검증하였다.

3.4.1 기존모델과의 비교

실제 피실험자의 동작가능영역의 끝점에 대하여 견봉점에 설정한 Local 좌표계에서 Spherical 각도를 계산하여 기존방식에 따른 동작가능 영역을 생성하였다. 피실험자 1에 대한 결과를 <그림 5>에 제시하였다.

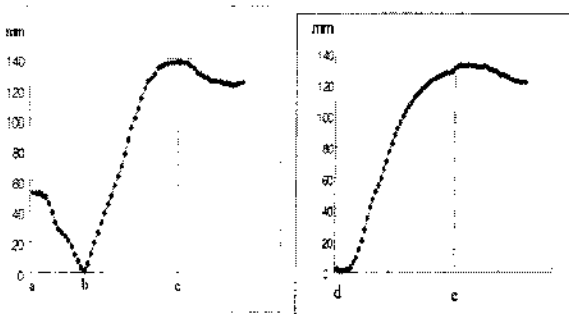
<그림 5>의 (a)는 피실험자의 위에서 본 모습이며 (b)는 전면에서 본 모습이다. 그림을 보면 컴퓨터모형을 통해 나온 동작가능영역은 견봉점을 중심으로 하고, 팔 길이를 반지름으로

하는 구의 모습을 하고 있으며 실제에 비해 오른쪽, 즉 Lateral 방향으로 Overfitting을 하고 있으며, Medial 방향으로는 Underfitting을 하고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 견관절의 회전중심점이 계속 변하게 됨을 의미한다. 각 피실험자별로 7개의 동작가능영역과 컴퓨터모형을 통해 생성된 영역간 오차(두 점 사이의 거리)의 평균값을 구하면 <표 5>와 같으며, <그림 6>은 오차의 변화경향을 보여주고 있다.

오차의 변화경향을 보면 대체로 팔을 90° 정도 굴곡시킨 상태에서 시행한 Envelope (Envelope 4)과 굴곡 없이 Frontal 평면에서 외전을 수행할 경우 가장 오차가 크게 나고 있으며 이 Envelope를 기준으로 팔을 위로 더 올리거나 내린 상태에서 Sweeping을 할 경우 오차는 감소하는 경향을 보이고 있다. 오차가 가장 크게 나타나는 Envelope 4와 Envelope 7에서 Sweeping 도중에 변화하는 오차의 경향을 살펴보면 <그림 7>과 같다.

<그림 7>의 (a)에서 a 는 Medial 방향으로 최대내전된 지점이며, b 는 약 90°의 굴곡만 이루어진 지점, 그리고 c 는 약 90°의 외전만이 이루어진 지점이다. a 에서 b 구간은 기존방식에 의한 동작가능영역이 실제보다 Underfitting함으로써 나타나는 오차이며 b 에서 c 구간은 실제보다 Overfitting함으로써 발생하는 오차이다. $b \sim c$ 구간에서는 최대 14cm 까지 Overfitting하고 있음을 볼 수 있다. $b \sim c$ 구간에서 Overfitting이 발생한다는 것은 회전중심점이 Medial 방향으로 이동함으로써 이에 따라 동작가능범위가 줄어든다는 것을 의미한다.

한편, <그림 7>의 (b)에서 a 는 팔의 움직임 없이 Anatomical Posture를 취할 때이며 a 는 약 90° 정도의 외전만 이루어진 지점이다. Envelope 7에서 발생하는 오차는 모두 Overfitting에 의한 오차이며 오차가 90° 까지 증가한 후, 90° 이후부터 감소하는 경향을 보이는 것은 회전중심점의 위치가 Medial 방향, 그리고 Superior 방향으로 이동하기 때문으로 볼 수 있다.



(a) Envelope 4 (b) Envelope 7

그림 7. Sweeping 도중의 오차변화 경향.

표 6. 검증에 사용된 Envelope 및 각도 범위

	굴곡	외전
1	0.70 < < 35.40	-25.50 < < -0.50
2	0.10 < < 65.00	-40.90 < < -2.00
3	0.40 < < 68.80	-61.40 < < -0.50
4	0.40 < < 84.70	-85.50 < < -3.10
5	0.70 < < 79.80	-175.70 < < -103.4
6	0.410 < < 51.90	-179.80 < < -133.70
7	1.860 < < 14.40	-130.40 < < -1.60

표 7. 기존 방식과 제안된 방식의 평균오차 (단위 : mm)

Envelope	기존방식	제안된 방식
Envelope 1	28.1	14.8
Envelope 2	38.6	17.4
Envelope 3	53.8	22.1
Envelope 4	54.9	14.0
Envelope 5	64.7	18.9
Envelope 6	43.0	14.3
Envelope 7	64.9	11.3

표 8. 기존방식과 제안된 방식에 대한 T-test

Envelope	Mean	Std Error	P-value
Envelope 1	1.3214	0.1850	0.0001**
Envelope 2	2.1171	0.1761	0.0001**
Envelope 3	3.1700	0.2543	0.0001**
Envelope 4	4.0922	0.2310	0.0001**
Envelope 5	4.5821	0.2302	0.0001**
Envelope 6	2.8645	0.1304	0.0001**
Envelope 7	5.3680	0.1387	0.0001**

** $\alpha = 0.01$ 에서 유의

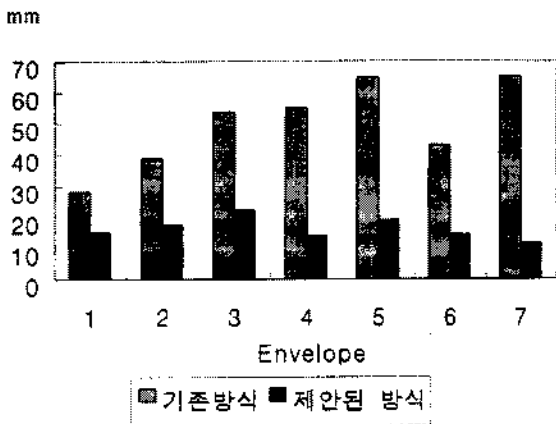


그림 8. Envelope별 평균오차.

3.4.2 검증

검증을 위해 실시한 피실험자 1명의 동작가능 영역 측정결과에 대해 앞서 도출된 회귀분석식을 이용한 모델의 검증을 실시하였다.

1) 동작가능 영역

제시된 방법에 대한 검증은 실험에서 얻어진 7개의 Envelope

들 중에서 <표 6>에서 나타난 바와 같이 각도 범위를 만족시키는 부분에 대하여 실시되었다.

견봉점을 기준으로 한 좌표계에 대해서 기존의 컴퓨터모델 그리고 본 연구에서 제시된 방법에 대해서 실제값과의 거리차를 오차로 정의하여 Envelope별로 평균한 값을 구하였으며 <표 7>과 <그림 8>에 요약되어 있다.

<표 7>과 <그림 8>에서 보면 제안된 방식을 이용하여 동작가능영역을 생성할 경우 오차가 상당히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 기존방식에서는 Envelope에 따른 오차변화의 경향이 뚜렷하게 보임에 반하여 제안된 방식을 이용할 경우 Envelope들 사이에서는 오차의 증가나 감소가 특별히 보이지 않고 있다. x, y, z 값 차이에 대한 비교에 있어서도 제안된 방식이 실제 동작가능영역에 더 근접한 값을 가지고 있다. 제시된 방식에서는 특히 y와 z에 대한 오차가 줄어들고 있는데, 이는 외전이나 굴곡시 Overfitting 또는 Underfitting의 가능성이 줄어들게 되는 효과를 가져오게 된다. 이상의 결과로 미루어볼 때 새로 제시된 방식이 전관절의 회전중심점 위치변화에 따른 영향을 충분히 반영하고 있다고 판단된다.

2) 통계분석

기존방식과 제안된 방식 사이의 차이에 대한 통계적 검증을 위하여 각 방식에서 발생한 오차에 대해 Paired Comparison T-test를 수행하였으며 그 결과는 다음 <표 8>과 같다.

두 방식간 오차 차이에 대한 T-test 결과 두 방식 사이에서는 $\alpha = 0.01$ 에서 모두 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 실제와 기존방식에 의해 생성된 x, y, z 값과 제안된 방식에 의해 생성된 x, y, z 값에 대해 역시 Paired Comparison T-test를 수행하였고 그 결과를 <표 9>에 정리하였다.

실제와 기존방식에 대한 비교결과 Envelope 7의 x 방향을 제외하고 모두 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 제안된 방식에서는 Envelope 5, 6에서 유의한 차이를 보이고 있으며 그 외에는 대체적으로 유의한 차이가 발견되지 않고 있다. 그러나 Envelope 5, 6의 경우에도 기존방식과 제안된 방식 사이에서는 유의한 차이가 보이고 있으며 실제값과의 차이는 제안된 방식에서 작게 나타나고 있다.

이상의 Paired Comparison T-test 결과를 종합하면 새로 제안된 방식에 의해 생성된 동작가능영역이 기존의 방식보다 더 오차를 줄이고 있음을 알 수 있다. 또한, 기존의 방식이 어깨 높이 부근의 Envelope에서 오차가 가장 크게 나타남에 반하여 제시된 방식은 Envelope의 위치와는 별 상관없이 오차가 줄어들고 있다.

표 9. 실제와 기존 및 제안된 방식에 대한 T-test (p-value)

Envelope	기존방식			제안된 방식		
	x	y	z	x	y	z
Envelope 1	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.7757	0.3780	0.0015*
Envelope 2	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0200*	0.0005**	0.0205*
Envelope 3	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.1597	0.0132*	0.0336*
Envelope 4	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0730	0.1047	0.0001**
Envelope 5	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**
Envelope 6	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**
Envelope 7	0.4004	0.0001**	0.0001**	0.4287	0.0001**	0.0001**

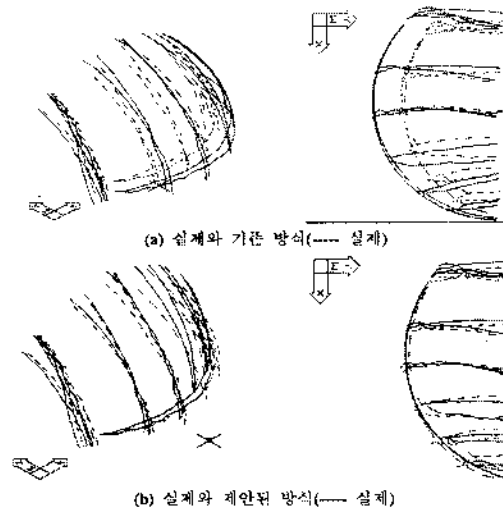


그림 9. 동작가능 영역의 비교.

실제와 기존방식, 그리고 본 연구에서 제시된 방식에 의한 방식에 의한 동작가능 영역을 검증이 이루어진 부분에 대하여 CAD상에서 도시하면 <그림 9>와 같다.

4. 결론 및 추후연구

본 연구에서는 지금까지의 컴퓨터인체모델이나 Workspace 디자인 가이드라인 등에서 견관절의 움직임을 고려하지 않으므로써 발생하는 동작가능영역의 오차를 줄이기 위한 새로운 방안을 제시하였다. 기존에 동작가능영역을 생성하기 위하여 사용되던 방식은 견봉점을 견관절로 가정하고, 그 점을 중심으로 팔을 회전시키는 것이었다. 이러한 방식으로 동작가능영역을 생성할 경우 Lateral 방향으로서는 실제보다 크게 나타나고 Medial 방향으로서는 실제보다 작게 생성됨을 알 수 있었다. 또한, 굴곡과 외전각도를 주고 인체모델에서 자세를 취하게 하였을 때 실제와 다른 자세를 취하게 되는 문제점도 발생하

게 된다.

이러한 문제점을 보완한 동작가능영역의 생성방식을 제시하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같이 접근하였다.

- 1) 견관절의 회전중심점의 위치를 찾아내고 굴곡과 외전이 이루어질 때 회전중심점의 위치가 초기위치에 대하여 상대적으로 얼마나 이동하는가를 Sagittal Plane에서의 굴곡과 Frontal Plane의 외전에 대하여 각각 파악하였다.
- 2) Sagittal Plane과 Frontal Plane에 대해서 회전중심점의 상대적인 위치이동정도를 굴곡과 외전의 각도로 표현하기 위하여 회귀분석을 실시하였다.
- 3) 공간상에 굴곡과 외전의 합으로 이루어진 위치에서 회전중심점의 위치이동은 굴곡만 이루어졌을 경우의 회전중심점의 위치이동과 외전만 이루어졌을 경우의 회전중심점 위치이동의 합으로 설명될 수 있을 것이라는 가정에 회귀분석결과 얻어진 함수를 이용하여 공간상에서 임의의 각도로 굴곡과 외전이 동시에 이루어졌을 경우

회전중심점의 위치를 추정하였다.

- 4) 변화된 회전중심점의 위치를 기준으로 하여 굴곡이 외전 각도를 주었을 때 실제와의 오차를 기존방식보다 줄일 수 있도록 Reach하도록 하는 Procedure를 제시하였다.

위와 같은 방식으로 도출된 새로운 모델에 대하여 실제 사람의 동작가능영역과 비교하여 본 결과, 기존모델보다 오차가 상당히 줄어들게 됨을 확인할 수 있었으며, 기존모델과 차이가 있는지 여부를 Paired Comparison T-test를 이용하여 통계적으로 검증한 결과 유의한 차이가 있음을 알 수 있었다.

그러나 본 연구를 통하여 도출된 새로운 방식은 굴곡과 외전이 이루어지는 순서에 따라 회전중심점의 위치가 달라지는 것에 대한 정확한 검증 없이 순서에 영향이 없다는 가정하에 연구가 이루어졌으므로 이를 보완한 추가 연구가 필요하다. 그러나 굴곡-외전 순서에 따른 영향을 평가하기 위해서는 회전중심점의 위치를 두 개의 평면에서 구해진 회전중심점의 합성으로 추정하는 것이 아닌 3차원 상에서 바로 얻어져야 하므로 이에 대한 방법의 개발이 가장 시급하다고 볼 수 있다. 또한, 실험시 굴곡-신전, 외전-내전의 각을 정확히 Control 할 수 있는 방안 역시 보다 깊은 고찰이 이루어져야 할 것이다.

본 연구가 어깨의 축전을 포함하며 주관절의 굴곡-신전까지 고려가 될 경우 3차원에서 견관절의 기구학적 모델로 확장이 가능하게 되므로 단순히 동작가능 영역의 생성에 국한되지 않고 Reach Prediction을 포함한 많은 인체 역학적, 기구학적 분석 또는 시뮬레이션에 크게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- Bryant J. T., Wevers H. W. and Lowe P. J., "One parameter model for error in instantaneous centre of rotation measurements," *Journal of Biomechanics*, Vol. 17, No. 5, pp. 317-323, 1984.
- Corlett E. N. and Clark T. S., *The Ergonomics of Workspace and Machines*, Taylor & Francis, London, 1995.
- Dvir Z. and Berme N., "The shoulder complex in elevation of the arm: A mechanism approach," *Journal of Biomechanics*, Vol. 11, pp. 219-225, 1978.
- Donnelly J. E., *Living Anatomy*, Human Kinetics Publishers Inc, Champaign, Illinois, 1982.
- Engin A. E. and Turner S. T., "Three-dimensional kinematic modeling of the human shoulder complex-part I: Physical model and determination of joint sinus cones," *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 111, pp. 107-112, 1989.
- Engin A. E. and Peindl R. D., "On the biomechanics of the human shoulder complex - I. Kinematics for determination of the shoulder complex sinus," *Journal of Biomechanics*, Vol. 20, No. 2, pp. 103-117, 1987.
- Engin A. E. and Chen S. M., "Statistical data base for the biomechanical properties of the human shoulder complex - I: Kinematics of the shoulder complex," *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 108, pp. 215-221, 1986.
- Engin A. E., "On the biomechanics of the shoulder complex," *Journal of Biomechanics*, Vol. 13, pp. 575-590, 1980.
- Hay J. G. and Reid J. G., *Anatomy, Mechanics and Human Motion*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1988.
- Hogfors C., Peterson B., Sigholm G., and Herberts P., "Biomechanical model of the shoulder joint - II. The Shoulder Rhythm," *Journal of Biomechanics*, Vol. 24, No. 8, pp. 699-709, 1991.
- Hogfors C., Sigholm G. and Herberts P., "Biomechanical model of the human shoulder - I. Elements," *Journal of Biomechanics*, Vol. 20, No. 2, pp. 157-166, 1987.
- Inman, V.T., Saunders, M. and Abbott, L.C., "Observations on the function of the shoulder joint," *Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol. 26, pp. 1-30, 1944.
- Jobbins B., Bio-mechanics of the Upper Limb, In Dowson D., Wright V. (Eds.), *An Introduction to the Bio-mechanics of Joint and Joint Replacement*, Mechanical Engineering Publications Ltd., London, 1981.
- Kroemer K. H. E., Kroemer H. J. and Kroemer-Elbert K. E., *Engineering Physiology*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- Lenarcic J. and Umek A., "Simple model of human arm reachable workspace," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 24, No. 8, 1994.
- Pheasant S., *Bodyspace-Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work*, Talyor & Francis, London, 1996.
- Shoup T. E., "Optical measurement of the center of rotation for human joints," *Journal of Biomechanics*, Vol. 9, pp. 241-242, 1976.
- Soudan K. and Audekercke R. V., "Methods, difficulties and inaccuracies in the study of human joint kinematics and pathokinematics by the instant axis concept. Example: The knee joint," *Journal of Biomechanics*, Vol. 12, pp. 27-33, 1979.