



3차원 동작분석 시스템의 정밀도와 측정 일관성 Accuracy and Consistency of Three-Dimensional Motion Analysis System

박영훈* · 염창홍 · 서국웅(부산대학교)

Park, Young-Hoon* · Youm, Chang-Hong · Seo, Kook-Woong(Pusan National University)

ABSTRACT

Y. H. PARK, C. H. YOUM, K. W. SEO. Accuracy and consistency of three-dimensional motion analysis system. Korean Journal of Sport Biomechanics, Vol. 15, No. 2, pp. 83-92, 2005. Computer-assisted motional analysis is a popular method in biomechanical studies. Validation of the specific system and its measurement are fundamental to its application in the areas. Because the accuracy and consistency of a particular system provide the researchers with critical information to assist in making judgements regarding the degree to which inferences can be drawn from measurement data. The purpose of this study was to assess the accuracy and consistency of the Kwon3D motion analysis system. Validation parameters were five lengths from eight landmarks in combination with the DLT reconstruction error values, digitizing monitor resolutions, and numbers of control points.

With the best setting, Kwon3D's estimations of 260cm, 200cm, 140cm, 100cm, and 20cm were 260.33 ± 688 cm, 199.98 ± 625 cm, 139.89 ± 537 cm, 99.75 ± 466 cm, 20.08 ± 114 , respectively. There was no significant DLT error value difference between two monitor resolutions, but 0.27cm significant difference in 260cm estimation. There were significant differences in 260cm and 200cm estimations between with 33-control-point DLT error and with 17-control-point DLT error, but no in 140cm, 100cm, and 20cm estimations. Test-retest results showed that Kwon3D measurements were highly consistent with reliability coefficients alpha of .9263 and above.

KEYWORDS: ACCURACY, CONSISTENCY, THREE-DIMENSIONAL, MOTION ANALYSIS

I. 서론

국내에서 운동역학 연구는 역학이론보다 동작분석, 지면반력, 근전도 등 장비를 이용한 스포츠동작 분석연구가 더 활발하다. 국내 운동역학연구결과를 잘 나타내는 한국운동역학회지에 게재된 논문을 살펴보면, 연구수행 시 영상분석기법을 사용했거나 혹은 영상매체를 보조 장비로 활용한 비율이 2000년 83%(전체 40편 중 33편), 2001년 76%(전체 55편 중 42편), 2002년 74%(전체 43편 중 32편), 2003년 88%(전체 52편 중 46편), 2004년 83%(전체 48편 중 40편)로 다른 기

* yhpark10@pusan.ac.kr

법에 비하여 대단히 높은 비중을 차지하고 있으며 이 가운데 Kwon3D(비술, 경기도 광명시) 시스템이 47%(5년 전체 238편 중 112편)를 차지하고 있다. 따라서 국내 운동역학 연구에서 가장 빈도가 높게 사용되는 Kwon3D 영상분석 시스템의 정밀도는 한국운동역학 연구결과의 정밀도와 신뢰도에 영향을 미칠 것이다. 영상분석 시스템 자체의 정밀도를 높이는데 크게 기여한 이론은 Das(1949)의 DLT(direct linear transformation)에 대한 개념 이래, 컴퓨터의 발전에 따른 DLT의 적용 및 개선을 꼽을 수 있으며 Abdel-Aziz & Karara(1971), Marzan & Karara(1975), Hatze(1988), Gazzani(1993) 등의 연구를 들 수 있다. 동작분석 시스템의 정밀도에 영향을 미치는 요인들에 관한 연구는 컨트롤 포인트와 관련된 것이 많다. Chen, Amstrong, & Raftopoulos(1994)은 컨트롤 포인트 분포의 균질성이 정밀한 영상분석을 위하여 중요하다하고, Tsai(1987), Allard, Strokes, & Blanche(1995)은 컨트롤 포인트 측정 정밀성의 중요성을 강조하였다. Hinriches & McLean(1995), Borghese, Cerveri, & Ferrigno(1997)은 컨트롤 포인트 수가 증가하면 측정오차가 줄어든다고 하였으나, Wood & Marshall(1986)은 줄어들지 않는다고 하였다. Wood & Marshall(1986), Gazzani(1993)는 카메라 렌즈의 왜곡이 크지 않다면 DLT 파라미터 수를 증가시켜도 정밀도가 향상되지 않는다고 하고, Angulo & Dapena(1992)은 3차원 영상분석에서 사진촬영기법이 비디오 기법보다 더 정확하다고 하였다. 이현섭과 김기형(2003)은 DLT 오차를 줄이기 위해서 컨트롤 포인트 24~44개를 균일하게 배치하고 컨트롤 프레임이 화면에 딱 차지 않도록 촬영해야한다고 했다. 새로운 기법연구에서 Pourcelot, Audigie, Degueurce, Geiger, & Denoix(2000), Yeadon & King(1999)은 동기화 기능이 없는 일반 비디오카메라 사용 시 카메라 간 시차(time-offset)에 의한 오차 해결법을 제시하였으며 Ambrosio, Lopes, Costa, & Abrantes(2001), Eian & Poppele(2002)은 고

정된 카메라 1대를 사용하여 3차원 영상을 재구성하는 기법을 소개하였다. Robbie, Attfield, & Taylor(1996)는 Elite 시스템(BTS spa, Italy)의 정밀도 평가실험에서 피사체의 높이에 따라 측정치 간에는 통계적으로 유의한 차이가 있을 뿐 아니라, 컨트롤볼륨 40cm 밖에는 큰 차이가 있다고 하였다. VICON 370 시스템의 정밀도에 관한 연구에서 Engler, Sisto, Redling, Andrews, Chang, & Findley(1996)은 지름 22cm 원판에 마커를 설치하고 회전하는 원판상의 마커 위치를 분석한 결과 마커들의 좌표값은 $-0.9\sim+0.3\%$ 범위에서 정확하지만, 속도에 대한 오차율은 회전속도가 증가할수록 증가하여 최대 -21.1% 를 나타내었고, 가속도는 저속에서 $+25.1\%$ 를 나타낸 후 회전속도가 증가할수록 감소하다가 다시 증가하는 결과를 얻어 소프트웨어 문제를 지적하였다. Ehara, Fujimoto, Miyazaki, & Tanaka(1995), Ehara, Fujimoto, Miyazaki, Mochimaru, Tanaka, & Yamamoto(1997)은 판매중인 11개 유명 3차원 동작분석 시스템 정밀도 비교분석에서 오차 절대값의 평균 최소값은 Elite Plus 시스템의 0.1mm, 최대값은 Dynas 3D/h 시스템(Shin Osaka Shokai, Japan)의 18.4mm라 하였다. Baker(1997)는 VICON VX 시스템의 평가실험에서 피사체가 6대의 카메라에 모두 잡힐 경우는 측정오차가 $\pm 1.5\text{mm}$ 이지만 4대 카메라에만 잡힐 경우 3mm, 2대 카메라에만 잡힐 경우 10mm로 증가한다고 하였다.

이상에서 알아본 바와 같이 3차원 영상분석 시스템에 관한 연구는 대부분 더 정확한 결과를 얻기 위하여 이론적, 방법론적으로 접근하고 있다. 그러나 운동역학 연구에서는 예산, 실외 사용 등으로 디지털타이징 과정을 필요로 하지 않는 고가의 3차원 영상분석 시스템을 구비하는 것이 용이하지 않다. 또, 아무리 정밀하고 좋은 시스템도 장비설치, 사용조건, 사용방법 등에 따라 그 정밀도가 가변적일 수 있으며 사용자에 의한 예러가 개입될 여지가 상당히 크다고 할 수 있다.

본 연구는 디지털타이징 시 사용하는 모니터 해상

도, DLT 오차크기, 컨트롤 포인트 수가 Kwon3D 영상분석 시스템의 길이 측정값에 미치는 영향을 분석하고 길이측정 정밀도와 측정 일관성 수준을 파악하여 향후 영상분석 장비 셋업 및 실험 디자인에 기초자료를 제공함을 그 목적으로 한다.

II. 연구 방법

1. 실험방법 및 절차

영상분석에서 연구대상 랜드마크의 위치를 알면 길이, 각도, 속도, 가속도 등 운동학적 요인들은 컴퓨터 시간 데이터를 사용하여 수학적으로 계산할 수 있고, 인체분절이나 물체의 관성모멘트 데이터를 적용하여 직접 혹은 역다이나믹(inverse dynamics)기법으로 운동역학적 요인들을 계산할 수 있다. 따라서 영상분석에서 가장 중요하고 기초가 되는 데이터는 실공간에서 랜드마크의 정확한 위치라 할 수 있다. 영상획득 실험과정이 정밀하고 정확하다고 가정할 때 랜드마크의 정확한 위치 산출에 영향을 미칠 수 있는 1차적인 변인은 2차원 비디오화면에서 랜드마크에 대한 디지털라이징의 정밀성일 것이다. 그러나 아무리 정밀한 디지털라이징 결과도 자(ruler)에 해당하는 DLT 재구성이 정밀하지 못하다면 의미가 없어진다.

영상분석에서 컨트롤 포인트가 많을수록, 컨트롤

포인트가 균일하게 분포할수록, 각 포인트가 정밀하게 디지털라이징될수록, 디지털라이징 필드 수가 많을수록, 사용하는 카메라가 많을수록 DLT 오차가 작아지고, DLT 오차가 작을수록 측정결과가 정밀할 것이라는 논리는 자연스럽다. 디지털라이징은 2차원 영상이 펼쳐진 모니터화면에서 랜드마크의 위치를 자동·수동으로 찾는 과정이므로 모니터 해상도가 디지털라이징 정밀도에 영향을 미칠 것이라는 논리 또한 자연스럽다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 먼저 디지털라이징 시 사용하는 모니터 해상도에 따른 DLT 오차크기와 이를 이용한 길이 측정 결과를 비교한 다음, 일반적으로 사용하는 조건에서 회전하는 물체에 표시된 5가지 길이를 측정하여 Kwon3D 시스템의 길이측정 정밀성과 측정 일관성을 알아보았다. 정밀성 실험을 위한 인위적인 조작요인을 배제하기 위하여 본 실험은 어떤 스포츠 동작분석 실험을 위하여 모든 카메라와 컨트롤 포인트가 설치된 상태에서 측정 대상물만 설치하여 실험을 진행하였다.

1) 컨트롤 포인트

지름 1.4cm, 길이 100cm 검정 스테인레스 스틸 파이프를 이용하여 연구 대상 스포츠 동작이 행해질 수 있게 x, y, z 각 축 방향으로 100cm×200cm×200cm 크기의 컨트롤 포인트 프레임을 설치하였다. 모든 프레임의 중앙에 폭1cm 반사 테

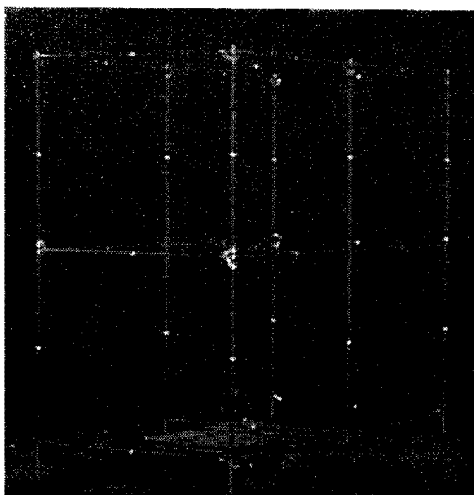


그림 1. 컨트롤 포인트

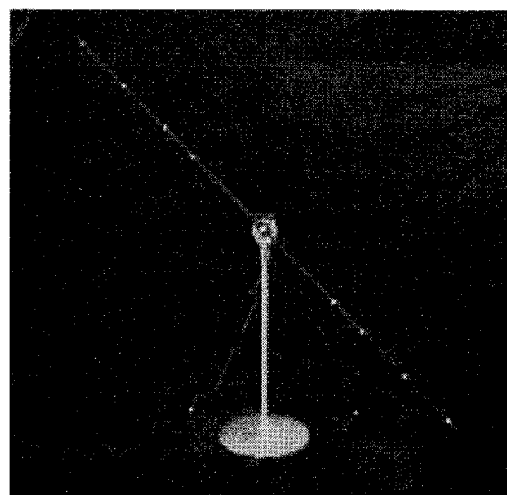


그림 2. 측정 대상물

이프를 부착하여 총 33개의 컨트롤 포인트를 3차원 공간에 균일하게 배치하고 원점에 가까운 포인트에 1번, 원점에서 가장 먼 포인트에 33번을 부여하였다(그림 1). 각 파이프는 전용 연결 플러그를 사용하여 연결된 파이프들이 최대한 직선 혹은 직각을 이루도록 하였다.

2) 카메라 설치

디지털비디오 카메라(Sony VX-2100) 6대를 스포츠 동작과 모든 컨트롤 포인트가 카메라 시야에 들어올 수 있는 지점에 설치하였다. 카메라 3대는 2층에 설치하여 렌즈높이가 약 410cm, 나머지 3대는 바닥에 설치하여 렌즈높이가 약 180cm이었으며 대상물로부터 카메라까지 거리는 최대 1,450cm, 최소 790cm 이었다. 컨트롤 포인트 식별을 용이하게 하기 위하여 카메라 시야에 들어오는 실험공간은 검은 천을 이용하여 배경을 검게 하고 국부조명을 사용하였다. 비디오카메라는 수동초점, 1/1,500 s, 셔트속도우선모드로 세팅한 다음 모든 카메라가 동시에 컨트롤 포인트를 약 10초간 촬영한 다음 컨트롤 포인트를 제거하였다.

3) 길이측정

측정 정밀성과 측정의 일관성 확인을 위하여 측정 대상물을 제작하여 설치하였다. 측정 대상물은 지름 1.4cm, 길이 270cm 검정 스테인레스 스틸 파이프에 폭 1cm 반사 테이프 8개로 260cm, 200cm, 140cm, 100cm, 20cm를 표시한 다음 이를 전기모터에 부착한, 전체적으로 회전하는 풍차형태이다(그림 2). 이 대상물을 수평면과 약 60°가 되게 설치하고 134°/sec로 회전하는 동안 발광 다이오드를 이용하여 동조 신호를 발생시키고 이 과정을 녹화하였다.

2. 분석방법 및 절차

1) 디지털타이징 모니터 해상도에 따른 DLT 오차
Matrox G550 비디오카드(Matrox, Dorval, Canada)와 삼성 싱크마스터 175N LCD 모니터

(삼성전자, 서울)를 연결할 경우 해상도는 6단계로 조절 가능하나 본 연구에서는 최고 해상도에 해당하는 1280x1024 픽셀과 4번째 해상도에 해당하는 1024x768 픽셀상태에서 컨트롤 포인트를 디지털타이징하였다. 전체 33개 컨트롤 포인트 중 각 카메라에서 명확히 보이는 컨트롤 포인트만 수동으로 디지털타이징하였다. 먼저 0번 카메라의 4필드를 연속으로 디지털타이징한 다음, 1번 카메라 첫 번째 필드를 디지털타이징하여 실공간을 재구성 시키고 재구성 오차를 기록하였다. 그 다음 1번 카메라의 두 번째 필드를 디지털타이징, DLT 재구성, 오차기록의 순서로 5번 카메라까지 디지털타이징하며 매 필드마다 DLT 오차를 기록하고 6번째 카메라의 4번째 필드까지 디지털타이징하여 얻은 결과를 DLT 오차로 하였다.

2) 컨트롤 포인트 수에 따른 DLT 오차

컨트롤 포인트 수와 포인트 분포의 균질성의 영향을 파악하기 위하여 모니터 해상도 1280x1024에서 컨트롤 포인트 33개 중 홀수번호 컨트롤 포인트 17개를 위와 같은 방법으로 디지털타이징하여 DLT 오차를 얻고 이 값을 이용하여 컨트롤 포인트 수가 길이측정 정밀도와 일관성에 미치는 영향을 비교하였다.

3) 거리측정

위에서 선정된 모니터 해상도, 컨트롤 포인트 수, DLT 오차를 적용하여 측정 대상물이 360° 회전하는 동안 길이 260cm, 200cm, 140cm, 100cm, 20cm를 측정하여 측정 정밀도와 측정 일관성을 분석하였다. 자동 디지털타이징 후 Kwon3D의 궤적(trajjectory) 기능을 사용하여 육안으로 식별가능하게 궤적을 이탈한 디지털타이징 포인트들은 수동으로 보정했다.

4) 데이터 처리

Kwon3D 프로그램(ver. 3.106)을 사용하여 각 포인트의 3차원 좌표값을 산출하였다. 모든 영상은 디지털타이징 시 필드분리(de-interlacing)하였으

며, Pre·Post Interpolation 기능은 사용하고, 움직임 속도가 일정하고 느리므로 소프트웨어 젠락 (software genlock) 기능은 사용하지 않았으며, 저역필터(Butterworth low-pass, 2nd order, 6Hz)를 적용하여 필터링하였다. 원 포인트 위치 (raw point position)로부터 산출한 포인트 위치 (point position) 좌표값을 MS Excel 2003으로 길이로 환산하고, SPSS 프로그램(ver. 10.0)을 이용하여 유의수준 $\alpha=.05$ 에서 비교하였다.

III. 결과 및 논의

1. 모니터 해상도

1) 모니터 해상도에 따른 컨트롤 포인트 DLT 오차

컨트롤 포인트 33개를 모니터 고해상도(1280×1024)에서 9회, 저해상도(1024×768)에서 7회 디지털라이징하여 얻은 DLT 오차 평균은 <표 1>과 같다.

<표 1>에서 보는 바와 같이 디지털라이징 시 사용하는 모니터 해상도에 따른 DLT 오차 평균은 고해상도에서 0.297 ± 0.023 cm, 저해상도에서 0.293 ± 0.024 cm로 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 NTSC방식에서 디지털비디오 해상도가 720x480 픽셀로 고정되어 있고, 디지털라이징 시 (u, v) 좌표는 캡처된 화면 내에서 좌표값

이 고정된 픽셀을 선택하는 것이며, 삼성 싱크마스터 175N LCD 모니터의 픽셀간 거리는 해상도와 무관하게 0.264mm로 고정되어있고, 랜드마커 크기는 한 픽셀 크기보다 크고, Kwon3D 프로그램 내에서 여러 카메라로부터 얻은 2차원 좌표값이 DLT 방법에 따라 연산되므로 모니터 해상도는 DLT 오차에 영향을 미치지 못하는 것으로 보인다. <표 1>은 각 조건에서 9회, 7회 산출한 평균을 나타낸 것으로 디지털라이징 필드수와 카메라 수가 증가 할수록 DLT 재구성 오차가 일관성 있게 작아지는 것처럼 보이지만 3대 이상 카메라 데이터를 적용하고 나면 4번째 이후 카메라에서는 디지털라이징 필드수가 증가해도 DLT 오차가 크게 줄어들지 않으며 오히려 증가하는 경우도 일부 관찰되었다. 따라서 DLT 오차를 최소로 하기 위해서는 처음 몇 카메라는 3~4 필드를 연속으로 디지털라이징 후 그 다음 카메라부터는 각 필드 디지털라이징 후 실공간을 재구성시켜 오차가 작은 필드를 선택하는 방법을 사용할 수도 있을 것이다. Yeadon & King (1999)은 체조동작을 이용한 카메라 동기 연구에서 DLT 오차 1.1cm를 사용하였다.

일부 논문에서는 영상분석 시스템의 정밀도 평가에서 각도를 측정하기도하나 각도는 랜드마커 3개 혹은 4개의 좌표값만 알면 삼각함수로 간단히 계산되므로 각도를 3차원 영상분석 시스템의 정밀도 평가 요소로 적용하는 것의 타당성 여부는 검토가 필요한 것으로 보인다. 참고로 본 연구의 컨트롤 포인트

표 1. 모니터 해상도에 따른 DLT 오차 평균 (단위 : cm)

	필드 수	C0~C1	C0~C2	C0~C3	C0~4	C0~C5	비교
고해상도	1	0.740118	0.498909	0.440965	0.373050	0.302723	n=9
	2	0.706727	0.491264	0.434861	0.372793	0.304405	
	3	0.703735	0.488416	0.432245	0.374241	0.298534	
	4	0.692304	0.484907	0.432575	0.373080	0.297237 ± 0.023452	
저해상도	1	0.663149	0.501083	0.454695	0.367306	0.296604	n=7
	2	0.642824	0.490613	0.453410	0.366447	0.294694	
	3	0.635368	0.486201	0.454210	0.365793	0.293477	
	4	0.622324	0.485781	0.452850	0.365895	0.293382 ± 0.024453	
Mann-Whitney U						.791	

공간 100cmx200cmx200cm에서 y축 상에서 가장 먼 200cm 거리의 두 컨트롤 포인트 (50, 0, 100), (50, 200, 100)를 연결하는 직선과 z축 상에서 가장 먼 200cm 거리의 두 컨트롤 포인트 (50, 100, 0), (50, 100, 200)를 연결하는 직선이 이루는 십자가 모양의 90°를 측정된 결과 $90.00 \pm .045^\circ$ (n=40)를 얻었다. Klein & De-Haven(1995)은 APAS(Aerial Dynamics, Trabuco Canyon, CA)를 이용하여 각 도기를 대상으로 측정된 결과 0~170° 범위에서 평균 오차가 $0.26 \pm 0.21^\circ$ (n=17)라 하였고, 적외선 Qualysis 시스템을 이용한 몸통의 각도측정에서 오차는 1.5° 이하였다(Giorcelli, Hughes, Current, & Myers, 2004).

〈표 1〉에서 모니터 해상도에 따른 DLT 오차는 통계적으로 유의한 차이가 없으므로 각 해상도에서 가장 작은 고해상도 0.263cm, 저해상도 0.267cm를 적용하여 모니터 해상도에 따른 길이 측정값을 비교한다.

2) 모니터 해상도에 따른 길이측정 결과

모니터 해상도에 따라 측정 대상물이 360°도 회전하는 동안 파이프에 표시된 260cm 길이를 측정된 결과는 〈표 2〉와 같다. 〈표 2〉에서 보는 것처럼 길이 260cm 측정 시 모니터 해상도에 따라 0.27cm 유의한 차이가 나타났다(p<.001). 이는 〈표 1〉의 모니터 해상도에 따른 DLT 오차 비교 결과와 다른 것으로, 만약 측정 대상물 길이 260.00cm가 참값이면 저해상도 모니터가 더 정확

하다고 결론지을 수 있을 것이다. 그러나 각 포인트를 표시하는 반사 테이프의 폭이 1cm 이고 테이프를 파이프에 부착하는 과정에서 오류의 가능성 등을 고려하면 저해상도 모니터가 0.27cm 더 정확하다고 결론짓기보다 저해상도 표준편차가 고해상도 표준편차보다 항상 작다는 것에 주목할 필요가 있다. 〈표 1〉에서 DLT 오차 평균은 고해상도 0.297cm, 저해상도 0.293cm로 통계적으로 차이가 없지만 절대값은 저해상도가 고해상도보다 미미하게나마 작은 것으로 나타났다. 〈표 1〉, 〈표 2〉 결과와 실험 중 저해상도에서 디지털타이징이 더 용이했고, 실험 목적상 DLT 오차를 1.0cm 이상으로 만들기 위해서는 의도적으로 컨트롤 포인트 밖을 디지털타이징해야 했던 경험 등을 종합해 볼 때 모니터 해상도는 Kwon3D 길이측정에 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 재검법(test-retest)에 의한 알파계수는 고해상도에서 .9847, 저해상도에서 .9975로 측정 신뢰도는 대단히 높게 나타났다.

현실적으로 LCD 모니터는 최고 해상도에서 사용되고 운동역학 분야에서 DLT 오차 0.263cm도 수용되므로(Klein & DeHaven, 1995; Yeadon & King, 1999), 본 연구에서는 모니터 해상도 1280x1024에서 얻은 오차 9개 중 크기가 가장 작은 0.263cm를 적용하여 분석을 진행한다.

2. 컨트롤 포인트 수

컨트롤 포인트 수의 영향을 파악하기 위하여 모

표 2. 모니터 해상도에 따른 260cm 측정 결과 (cm)

모니터 해상도	오차 (cm)	M±sd	alpha
고해상도 1280x1024	0.263	1회 (n=160)	260.39±.623
		2회 (n=160)	260.28±.740
		합계(n=320)	260.33±.686
저해상도 1024x768	0.267	1회 (n=160)	260.01±.561
		2회 (n=160)	260.11±.564
		합계(n=320)	260.06±.564
t-value		5.534***	

***: p<.001

표 3. 컨트롤 포인트 수에 따른 길이측정 결과 (cm)

모니터 해상도	CP 수 (개)	CC 에러 (cm)	길이 (cm)					
			260	200	140	100	20	
1280x1024	33	0.263	M±sd (n=320)	260.33 ±.686	199.98 ±.625	139.89 ±.537	99.75 ±.466	20.08 ±.114
			최대	261.48	201.09	140.96	101.17	20.6
			최소	259.20	198.93	139.09	99.08	19.69
			차이	2.28	2.16	1.87	2.09	.67
			M±sd (n=320)	260.77 ±1.637	200.22 ±1.103	139.94 ±.844	99.78 ±.739	20.07 ±.159
	17	0.307	최대	263.28	202.18	141.47	101.38	20.43
			최소	257.66	198.09	138.38	98.54	19.69
			차이	5.62	4.09	3.09	2.84	.74
			t-value	-4.411***	-3.595***	-.973	-.750	.979

***: p<.001

니터 해상도 1280×1024에서 컨트롤 포인트 수를 17개로 줄여 DLT 오차 0.307cm를 얻었다. 컨트롤 포인트 수를 17개로 줄일 때 객관성을 위하여 일괄적으로 짝순번호를 삭제하였다. 오차 0.307cm는 컨트롤 포인트 33개로부터 얻은 오차 0.263cm보다 크지만 동작분석에 적용하기에는 무리가 없으므로, 이 두 오차를 적용하여 측정 대상물이 360° 회전하는 동안 260cm, 200cm, 140cm, 100cm, 20cm, 5가지 길이를 측정된 결과는 <표 3>과 같다. <표 3>과 같이 컨트롤 포인트 수에 따라 260cm, 200cm 측정에서는 통계적으로 유의한 차이가 있지만(p<.001), 140cm, 100cm, 20cm 측정에서는 차이가 없는 것으로 나타났다. 3차원 영상분석에서 각 랜드마크 좌표값의 정확성이 중요하지만 정확성을 평가하는 방법이 쉽지 않아 간편히 두 포인트 간 거리를 측정하여 정확성을 평가한다. 포인트 P₁ (x₁, y₁, z₁)과 포인트 P₂ (x₂, y₂, z₂) 사이 거리는 $\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}$ 로 계산되므로 포인트의 실공간 좌표값만 정확하다면 측정 오차는 거리의 크기와 무관해야 한다. <표 3>에서 각 길이의 평균값만 비교하면 컨트롤 포인트 수에 따른 차이가 최대 0.5cm, 최소 0.06cm로 미미하다. 그러나 표준편차, 최대·최소값 차이를 보면 컨트롤 포인트가 33개인 경우 표준편차 ±.686,

±.625, ±.537, ±.466, ±.114, 최대·최소값 차이 2.28cm, 2.16cm, 1.87cm, 2.09cm, 0.67cm로, 컨트롤 포인트가 17개인 경우 표준편차 ±1.637, ±1.103, ±.844, ±.739, ±.159, 최대·최소값 차이 5.62cm, 4.09cm, 3.09cm, 2.84cm, 0.74cm보다 크기도 작고 비교적 일정하다. 따라서 컨트롤 포인트 수가 많은 경우가 컨트롤 포인트 수가 적은 경우보다 측정 정밀성과 일관성이 증가하는 것처럼 보인다.

그러나 최대·최소값이 발생한 위치, 컨트롤 공간 내·외 관계, 컨트롤 포인트 수, 최대·최소값 차이의 크기 등을 종합해서 분석해 볼 필요가 있다. 길이 측정 시 측정 대상물을 약 60°로 경사지게 설치했지만 컨트롤 포인트 공간이 100cm×200cm×200cm이므로 260cm를 이루는 두 포인트는 360° 회전하는 대부분을 컨트롤 공간 밖에 위치했었고, 200cm를 이루는 두 포인트는 컨트롤 공간 경계에 접근하는 경우가 많았으며, 140cm, 100cm, 20cm를 구성하는 포인트들은 항상 컨트롤 공간 내부에 있었다. 그러나 최대·최소값이 발생한 좌표값을 살펴보면 모든 경우에서 측정 대상물이 수직으로 선 근처에서 최대값이 발생하고 수평을 이룬 근처에서 최소값이 발생하였다. 컨트롤 포인트가 17개인 경우 최대·최소값 차이가

5.62~2.84cm로 크고 길이에 비례하므로 컨트롤 포인트 분포의 균질성이나 포인트의 컨트롤 공간 내·외 위치가 측정 정밀도에 영향을 미친다고 할 수 있을 것이다. 그러나 컨트롤 포인트가 33개인 경우에도 최대·최소값 발생위치가 컨트롤 포인트가 17개인 경우와 동일하고, 최대·최소값 차이가 2.28~1.87cm로 비교적 일정하므로 최대·최소값 차이가 컨트롤 포인트 수, 컨트롤 포인트 분포의 균질성이나 컨트롤 공간 내·외 위치 때문 만이라고 설명하기는 곤란하고, 비디오카메라 렌즈의 왜곡도 영향을 미친 것으로 추측된다(이현섭 & 김기형, 2003; Chen et al., 1994; Gazzani, 1993; Wood & Marshall, 1986). 본 연구 수행 시 카메라 렌즈의 왜곡은 고려하지 않았으나 측정 대상물을 화면 가득히 잡아 렌즈 왜곡 문제가능성을 가지게 되었다. NTSC 방식에서 비디오 화면비율은 4:3이므로 화면에 측정 대상물을 가득 채울 경우 수직방향으로는 화면에 가득차지만 수평방향으로는 화면 좌우에 여유 공간이 있다. 따라서 측정 대상물이 수직으로 선 경우 렌즈 왜곡의 영향을 크게 받는 반면 수평상태에서는 상대적으로 안정적이다. 그러나 길이 최대·최소값 발생위치가 모든 길이에서 동일하고, 140cm, 100cm, 20cm를 구성하는 랜드마크들은 항상 화면 가운데 부분에 있지만 최대·최소값 차이가 비슷한 것 등은 렌즈 왜곡만으로 설명하기도 곤란하다. <표 3>의 데이터는 Interpolation 한 값으로 컨트롤 포인트 33개인 경우 최대·최소값 차이와 표준편차가 길이와 무관하게 비교적 일정하다. 그러나 Interpolation을 시

키지 않으면 최대·최소값 차이와 표준편차가 길이에 비례하는 것으로 나타났다. 실험경험에 의하면 컨트롤 공간을 벗어나면 길이가 감소하는 경향이 있고, 렌즈 왜곡은 길이를 증가시키는 것으로 보인다. 따라서 <표 3>은 컨트롤 포인트 수에 따른 차이라기보다 카메라 렌즈 왜곡, 컨트롤 공간 내·외, Interpolation 효과 등이 복합된 결과로 추정된다. Chen et al.(1994)은 컨트롤 포인트 분포의 균질성이 정밀한 영상분석을 위하여 중요하다 하였으며, Tsai(1987), Allard et al.(1995)은 컨트롤 포인트 측정 정밀성의 중요성을 강조하였다. Hinriches & McLean(1995), Borghese et al.(1997)은 컨트롤 포인트 수가 증가하면 측정오차가 줄어든다고 하였으나, Wood & Marshall (1986)은 줄어들지 않는다고 하였다.

3. 길이측정 정밀도와 측정 일관성

100cm×200cm×200cm 공간에서 컨트롤 포인트는 대부분 33개 이상을 사용하므로, 지금까지 결과에 따라 모니터 해상도 1280×1024, 컨트롤 포인트 33개, DLT 오차 0.263cm를 적용하여 지면과 약60°를 이루며 134°/sec로 회전하는 물체가 360° 회전하는 동안 표시된 두 점 간의 길이 260cm, 200cm, 140cm, 100cm, 20cm를 반복 측정한 결과는 <표 4>와 같다.

<표 4>는 <표 3>을 세분화 한 것으로 각 회는 360° 회전하는 동안 160번 측정한 값을 나타낸다. 260, 200, 140, 100, 20cm 길이 측정값은 각각

표 4. 길이측정 정밀도와 측정 일관성 (cm)

모니터 해상도	CP 수 (개)	CC 에러 (cm)	M±sd					
			260 cm	200 cm	140 cm	100cm	20m	
1280 x 1024	33	0.263	1회	260.39	199.99	139.90	99.71	20.07
			(n=160)	±.623	±.616	±.551	±.468	±.128
			2회	260.28	199.94	139.87	99.78	20.09
			(n=160)	±.740	±.636	±.524	±.463	±.097
			평균	260.33	199.98	139.89	99.75	20.08
			(n=320)	±.686	±.625	±.537	±.466	±.114
			<i>alpha</i>	.9847	.9827	.9840	.9719	.9264
			<i>t-value</i>	1.490	.717	.620	-1.413	-1.686

260.33±.686, 199.98±.625, 139.89±.537, 99.75±.466, 20.08±.114cm로 나타났다. 모든 길이에서 1회와 2회 측정결과 간에는 통계적으로 유의한 차이가 없으며, 재검법에 의한 alpha 계수는 .9264 이상으로 측정 신뢰도는 대단히 높은 것으로 나타났다.

〈표 4〉 결과로 볼 때 컨트롤 포인트 수, DLT 오차 크기, 정밀한 디지털링 등 기본적인 사항만 충족시킨다면 Kwon3D 시스템은 운동학적 요인 측정 시 일관성이 있다고 판단되며 측정값의 수용여부는 연구목적에 따라 달라질 수 있을 것이다.

IV. 결론 및 제언

Kwon3D 영상분석 시스템의 길이 측정 정밀도와 측정 일관성에 관하여 알아본 결과, DLT 오차 크기는 디지털링 시 사용하는 모니터 해상도의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 컨트롤 포인트 수에 따른 길이측정값 비교 결과 260cm, 200cm 측정에서는 컨트롤 포인트 수에 따라 유의한 차이가 있었으나($p < .001$), 140cm, 100cm, 20cm 측정에서는 유의한 차이가 없었다. 이는 컨트롤 포인트 수 보다 카메라 렌즈 왜곡, 컨트롤 공간 내·외, Interpolation 효과 등의 영향 때문인 것으로 추정된다. 모니터 해상도 1280x1024픽셀, 컨트롤 포인트 33개, DLT 0.263cm 조건에서 260, 200, 140, 100, 20cm를 측정한 결과는 각각 260.33±.686, 199.98±.625, 139.89±.537, 99.75±.466, 20.08±.114cm로 나타났다. 컨트롤 포인트가 33개인 경우, 모든 길이에서 1회 ($n=160$) 측정값과 2회($n=160$) 측정값 간에는 통계적으로 유의한 차이가 없으며 재검법에 의한 신뢰도 계수는 .9264 이상으로 Kwon3D 시스템은 길이측정 시 충분히 일관성이 있는 것으로 판단된다.

DLT 오차에 영향을 미치는 요인으로 컨트롤 포인트 수, 컨트롤 포인트 분포의 균일성, 정밀한 디지털링 등에 관심을 갖지만 DLT 오차의 근원은 컨트롤 프레임 자체의 물리적인 정밀성과 설치의

정밀성이므로 컨트롤 포인트 설치 시 주의가 요구된다. 자동 디지털링은 시간을 절약할 수 있고 편리하지만 고정된 축을 중심으로 회전하는 동일한 포인트를 자동으로 디지털링 시켰을 때 궤적이 일정하지 않는 경우가 빈번히 관찰되었다. 포인트가 회전중심에 가까워 이동 거리가 짧은 경우에는 식별이 용이하지만 중심으로부터 멀리 떨어진 경우는 간격이 넓어 육안으로 식별이 용이하지 않다. 이 문제는 프로그램의 연산과정에서 대부분 수학적 으로 해결되지만 동작이 크고 움직임이 빠른 포인트를 자동으로 디지털링할 때는 주의가 요망된다. 랜드마크가 크면 식별이 용이하여 디지털링이 편리하지만 자동으로 디지털링한 결과를 보면 완전히 고정된 마커도 마커가 크면 궤적이 움직이는 반면, 마커가 작으면 궤적이 훨씬 안정되었음이 관찰된다. 따라서 동작의 크기 때문에 피사체가 아주 작은 경우가 아니면 정밀한 동작분석을 위해서는 식별이 가능한 범위 내에서 작은 마커를 사용하는 것이 바람직할 것이다. 컨트롤 포인트 내·외의 영향, 렌즈 왜곡, Interpolation의 효과 등에 대한 종합적인 연구가 요망된다.

참고 문헌

- 이현섭, 김기형(2003). DLT를 이용한 3차원 공간검정시 RMSE에 대한 통계학적 분석. 한국운동역학회지, **13(1)**, 1-12.
- Das, G. B.(1949). A mathematical approach to problems in photogrammetry. *Empire Survey Review*, Vol. X(73).
- Abdel-Aziz, Y. I. & Karara, H. M.(1971). *Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates in close-range photogrammetry*. Proceedings of the ASP/UI Symposium on Close-Range Photogrammetry (pp.1-18). American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA.
- Allard, P., Strokes, I.a.F., & Bianchi, J. P.(1995). *Three-Dimensional Analysis of Human Movement*. Champaign, IL: Human kinetics.
- Ambrosio, J., Lopes, G., Costa, J., & Abrantes, J.(2001). Spatial reconstruction of the human motion based on

- images of a single camera. *Journal of Biomechanics*, 34, 1217-1221.
- Angulo, R. M. & Dapena, J.(1992). Comparison of film and video techniques for the estimating three-dimensional coordinates within a large field. *International Journal of Sport Biomechanics*, 8, 145-151.
- Baker, R.(1997). Assessment of the inherent accuracy of a kinematic analysis system. *Gait and Posture*, 5, 85.
- Borghese, N. A., Cerveri, P., & Ferrigno, G. C.(1997). Statistical comparison of DLT versus ILSSC in the calibration of a photogrammetric stereo-system. *Journal of Biomechanics*, 30, 409-413.
- Chen, L., Armstrong, C. W., & Raftopoulos, D. D.(1994). An investigation on the accuracy of three-dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique. *Journal of Biomechanics*, 27, 493-500.
- Ehara, Y., Fujimoto, H., Miyazaki, S., & Tanaka, S.(1995). Comparison of the performance of 3D camera systems. *Gait and Posture*, 3, 166-169.
- Ehara, Y., Fujimoto, H., Miyazaki, S., Mochimaru, M., Tanaka, S., & Yamamoto, S.(1997). Comparison of the performance of 3D camera systems II. *Gait and Posture*, 5, 251-255.
- Eian J., & Poppele, R. E.(2002). A single-camera method for three-dimensional video imaging. *Journal of Neuroscience Method*, 120, 65-83
- Engler, P. E., Sisto, S. A., Redling, J., Andrews, J. F., Chang, T., & Findley, T. W.(1996). Measuring the accuracy of the 120Hz VICON 370 movement analysis system. *Gait and Posture*, 4, 192-193.
- Gazzani, D.(1993). Comparative assessment of two algorithms for calibrating stereophotogrammetric system. *Journal of Biomechanics*, 26, 1449-1454.
- Giorcelli, R. J., Hughes, R. E., Current, R. S., & Myers, J. R.(2004). Accuracy of a system for measuring three-dimensional torso kinematics during manual materials handling. *Journal of Applied Biomechanics*, 20, 185-194.
- Hatze, F.(1988). High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach. *Journal of Biomechanics*, 21, 533-538.
- Hinriches, H., & McLean, R. N.(1995). NLT and extrapolated DT: 3-D cinematography alternatives for enlarging the volume of calibration. *Journal of Biomechanics*, 28, 1219-1223.
- Klein, P. J., & DeHaven, J. J.(1995). Accuracy of three-dimensional linear and angular estimates obtained with the Aerial Performance Analysis System. *Achieves of Physical Medicine and Rehabilitation*, 76(2), 183-189.
- Marzan, G. T. & Karara, H. M.(1975). A computer program for direct linear transformation solution of collinearity condition, and some application of it. Proceedings of the ASP/UI Symposium on Close-Range Photogrammetry Systems, Champaign. American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA, pp.420-476.
- Pourcelot, P., Audigie, F., Degueurce, C., Geiger, D., & Denoix, J. M.(2000). A method to synchronise cameras using the direct linear transformation technique. *Journal of Biomechanics*, 33, 1751-1754.
- Robbie, S., Attfield, S., & Taylor, D.(1996). Assessing the accuracy of 3-D kinematic data: Implications for laboratory set up. *Gait and Posture*, 4, 202.
- Tsai, R. T.(1987). A versatile camera calibration technique for high accuracy 3-D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lens. *IEEE Journal of Robotics and Automation RA-3*, 323-344.
- Wood, T. M., & Marshall, G. A.(1986). The accuracy of DLT extrapolation in three-dimensional film analysis. *Journal of Biomechanics*, 19, 781-785.
- Yeadon, M. R. & King, M. A.(1999). A method for synchronising digitised video data. *Journal of Biomechanics*, 32, 983-986.

투 고 일 : 04월 30일
 심 사 일 : 05월 10일
 심사완료일 : 05월 15일