한국운동역학회지, 2003, 제13권 1호, pp. 1-12
Korean Journal of Sport Biomechanics
2003, Vol. 13, No. 1, pp. 1-12

DLT를 이용한 3차원 공간검증시 RMSE에 대한 통계학적 분석

이현섭* · 김기형*(고려대학교)

ABSTRACT

Statistical analysis for RMSE of 3D space calibration using the DLT

Lee, Hyun-Seob* · Kim, Ky-Hyeung*(Korea University)

Lee, H-S, and Kim, K-H. Statistical analysis for RMSE of 3D space calibration using the DLT. Korean Journal of Sport Biomechanics, Vol. 13, No. 1, pp. 1-12. The purpose of this study was to design the method of 3D space calibration to reduce RMSE by statistical analysis when using the DLT algorithm and control frame. Control frame for 3D space calibration was consist of 1×3×2m and 162 contorl points adhere to it. For calculate of 3D coordination used two methods about 2D coordination on image frame, 2D coordinate on each image frame and mean coordination. The methods of statistical analysis used one-way ANOVA and T-test. Significant level was $\alpha = .05$.

The compose of methods for reduce RMSE were as follow.

1. Use the control frame composed of 24-44 control points arranged equally.
2. When photographing, locate control frame to center of image plane(image frame) or use the lens of a few distortion.
3. When calculate of 3D coordination, use mean of 2D coordinate obtainable from all image frames.

Keywords : DLT, RMSE, 3D

2003년 3월 20일(목) 접수
* Corresponding author, 136-701, 서울시 성북구 안암동 5가 1번지 고려대학교 체육교육과 대학원
연락처 : saintlhs@hanafos.com, Tel : 016-343-2109
* 교수, 136-701, 서울시 성북구 안암동 5가 1번지 고려대학교 체육교육과

Ⅰ. 서 론

인간의 운동 동작을 정확하게 분석하기 위해서는 3차원적 분석이 필수적이다. 그러나 인간의 운동 동작을 분석하기 위해서 얻게 되는 영상들은 2차원의 구조를 가지고 있기 때문에 3차원적으로 분석하기 위해서는 2차원의 영상을 3차원으로 변환하여야 한다. 2차원의 영상을 3차원으로 변환하는데 있어 체육학에서 자주 사용되는 것이 DLT(direct linear transformation)방법이다. DLT는 실공간(real space)의 한점과 영상의 한점이 선형적인 관계를 가지고 있다는 점에 기반을 두고 최소자승법을 이용하여 2차원의 영상을 3차원으로 변환하는 방식이다. 이러한 DLT 방식을 사용하기 위해서는 실공간에 대한 검증이 선행되어야 하며, 이를 위해서 직육면체 모양의 컨트롤 프레임(control frame)을 사용하는 경우가 많다. DLT를 사용하기 위해서는 실공간을 구성하는 컨트롤 포인트(control point)가 최소한 6개 이상이 필요하다. 따라서 컨트롤 프레임 상에는 6개 이상의 컨트롤 포인트가 존재하게 된다. 그러나 DLT는 그 계산 과정상에서 미지수보다 방정식이 많아지는 over determination이 발생하기 때문에 완벽한 3차원 좌표 값을 구해내지는 못한다. 또한 영상내의 특정 위치를 좌표화하는 과정(digitizing)에서 발생하는 human 에러(error), 카메라 렌즈의 왜곡(distortion) 또는 컨트롤 포인트의 구성 등에 의해 에러가 발생하게 된다. 이러한 에러들은 공간검증의 정확도를 감소시키게 되며 결국 동작분석의 정확도를 감소시키게 된다.

DLT의 특성상 정확한 3차원 좌표 값을 추출해내기 위해서는 정확한 공간검증이 선행되어야 한다. 이러한 이유로 인해 연구자(Chen, & Raftopoulos, 1994; Challis, 1995; Hatze, 1988; Hinrichs, & McLean, 1995)들은 공간검증시 에러를 감소시킬 수 있는 방법들에 대해서 연구 결과들을 보고하였다. Chen(1994) 등은 DLT를 이용한 3차원 공간검증시 발생되는 에러에 대해서 조사하였다. 그는 32개의 컨트롤 포인트로 구성된 2.10×1.35×1.00m 크기의 컨트롤 프레임을 사용하였으며, 컨트롤 포인트의 숫자(8, 12, 16, 20, 24)를 달리 하였을 경우 발생되는 에러의 크기를 조사하였다. Chen(1994) 등의 연구 결과를 살펴보면, 컨트롤 포인트가 균등하게 퍼져 있을 때 에러 값이 가장 작게 나타났다고 보고 하였으며, 마커의 개수가 증가될수록 정확도도 증가하였다고 하였다. 그러나 16, 20, 24를 사용하였을 때는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았음을 보고하였다. 또한 다른 축에 비해 z축의 에러 값이 크게 나타났다고 보고하였으며, 렌즈의 왜곡으로 인해 전체적인 프레임이 볼록하게 나타났다고 하였다. Chen(1994) 등은 16~20개의 컨트롤 포인트를 사용할 것을 권장하고 있으며, 이러한 결과는 1978년 Shapiro의 연구 결과와 비슷하다고 하였다.

1995년 Hinrichs와 McLean은 3차원 영상 분석시 정확도에 대한 연구를 수행하였는데, 이들은 표준 DLT(SDLT : standard direct linear transformation), 외삽법(extrapolated) DLT, NLT(non linear transformation)의 비교에서 컨트롤 포인트를 40~60개 사용하였을 경우 표준 DLT가 가장 정확한 결과를 보였다고 하였다. 이들의 연구에서는 총 108개의 컨트롤 포인트를 사용하였으며, 공간 검증에 사용

된 컨트롤 포인트의 개수는 16, 24, 40, 60 이었다. 이와 같이 연구자들은 공간검증시 사용된 컨트롤 포인트의 개수와 정확도와의 관계를 밝혀냄으로써 공간검증시 최적의 컨트롤 포인트 개수와 구성을 알아내고자 하였다. 이러한 주제는 ISB(International Society of Biomechanics)의 메일링 리스트(mailing-list)를 통해 학자들 간에 토론 된 바 있으며, 이 토론에서 ton van den Bogert는 컨트롤 포인트를 16개 이상으로 늘릴 경우 정확도에 유의한 증가가 나타났다고 하였으며, Hinrichs는 Peak Performance의 24개 컨트롤 포인트는 불충분하다고 하였다. 또한 Bing Yu는 Iowa university에서는 68개의 컨트롤 포인트를 사용하고 있다고 하였으며, 16개 이상의 컨트롤 포인트를 사용할 것을 제안하였는데 그 이유로는 많은 컨트롤 포인트를 사용하면 몇 개의 부정확하게 digitized 되거나 또는 부정확하게 정의된 점들을 제거할 수 있기 때문이라고 하였다. Brain Davis는 표준 DLT를 사용할 경우 가장 큰 잔차(residual)를 갖고 있는 컨트롤 포인트를 제거하면 전체적인 잔차가 감소한다고 하였다.

위에서 제시한 연구 결과들은 대부분 컨트롤 포인트의 개수에 초점을 맞추어 공간검증 실험을 하고 있으며, 컨트롤 포인트의 다양한 구성에 따른 분석을 수행하지 않아 컨트롤 포인트와 이에 따른 에러와의 관련성을 밝히기에는 부족함이 있다. 또한 DLT를 이용한 3차원 좌표 값 계산시, 얻어진 영상 프레임의 2차원 좌표 값의 사용 방법에 대해서는 다루지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 컨트롤 포인트의 개수 및 구성과 2차원 좌표 값의 사용 방법에 따른 에러 값의 변화 양상을 살펴보고, 이러한 변화들이 통계적으로 차이가 있는 것인지를 살펴봄으로써 3차원 동작 분석을 위한 공간검증시 발생되는 에러 값의 최소화를 위한 실험 디자인의 기초 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

Ⅱ. 연구 방법

본 연구에서 사용된 영상 장비로는 디지탈 비디오 카메라 2대가 사용되었으며, 공간검증을 위해서 사용된 컨트롤 프레임의 크기는 1m×3m×2m의 직육면체이고 컨트롤 프레임 상에 총 162개의 컨트롤 포인트가 부착되어졌다. 컨트롤 프레임의 모양과 컨트롤 포인트의 부착 위치는 <그림 1>과 같다. 컨트롤 프레임을 고정시킨 후 두 대의 카메라에서 약 5초간 30frames/s 속도로 촬영하였으며, 카메라간의 동조(synchronize)는 이벤트 동조(event sync.) 방법을 사용하였다. 촬영된 영상 중 각 카메라에서 동조화된 10개의 영상 프레임이 분석 대상이 되었다. 단일 프레임이 아닌 10개의 프레임을 분석 대상으로 한 것은 수치화 작업(digitizing)시 발생될 수 있는 human 에러를 감소시키기 위해서 수행되어졌으며, 2차원 좌표 값의 사용 방법에 따른 에러의 차이를 살펴보기 위해서다. 공간검증을 위해서 선택된 컨트롤 포인트 개수의 종류와 분포는 23가지이며, 그 내용은 <표 1>과 같다.

<표 1>에서 제시한 각 컨트롤 프레임의 포인트를 이용하여 11개의 DLT 계수를 구한 후 CF-08의 70개 포인트의 3차원 좌표 값을 구하여 RMSE(root mean square error)을 계산하였다.

<표 1>의 CF-14~CF-18은 컨트롤 프레임의 크기를 X축과 Y축은 1m로 고정시키고 Z축을 1m→1.2m →1.5m→1.8m→2m로 단계적으로 확장한 것이며, CF-19~CF-23은 컨트롤 프레임의 크기를 X축과 Z축을 1m로 고정시키고 Y축을 1m→1.4m→2m→2.6m→3m로 단계적으로 확장한 것이다.

각 컨트롤 프레임을 이용한 공간검증은 표준 DLT를 사용하였으며, 에러 측정은 RMSE를 이용하였다. RMSE는 두 가지 형태로 구하여졌는데, 첫 번째는 각각의 단일 영상 프레임의 2차원 좌표 값을 이용하여 3차원 좌표 값을 구한 후 각 영상 프레임 별로 RMSE를 구한 다음 축별로 RMSE의 평균값을 구하였다. 두 번째는 10개의 영상 프레임의 2차원 평균 좌표값을 이용하여 3차원 좌표값을 구한 후 축별로 RMSE를 구하였다.

통계분석은 SAS 8.2를 사용하였으며, 분석 기법으로는 일원분산분석(one-way ANOVA)과 T-test를 사용하였으며, 유의수준은 모두 $\alpha = .05$로 하였다. 분산분석의 사후 검정으로는 Tukey의 HSD를 사용하였다.

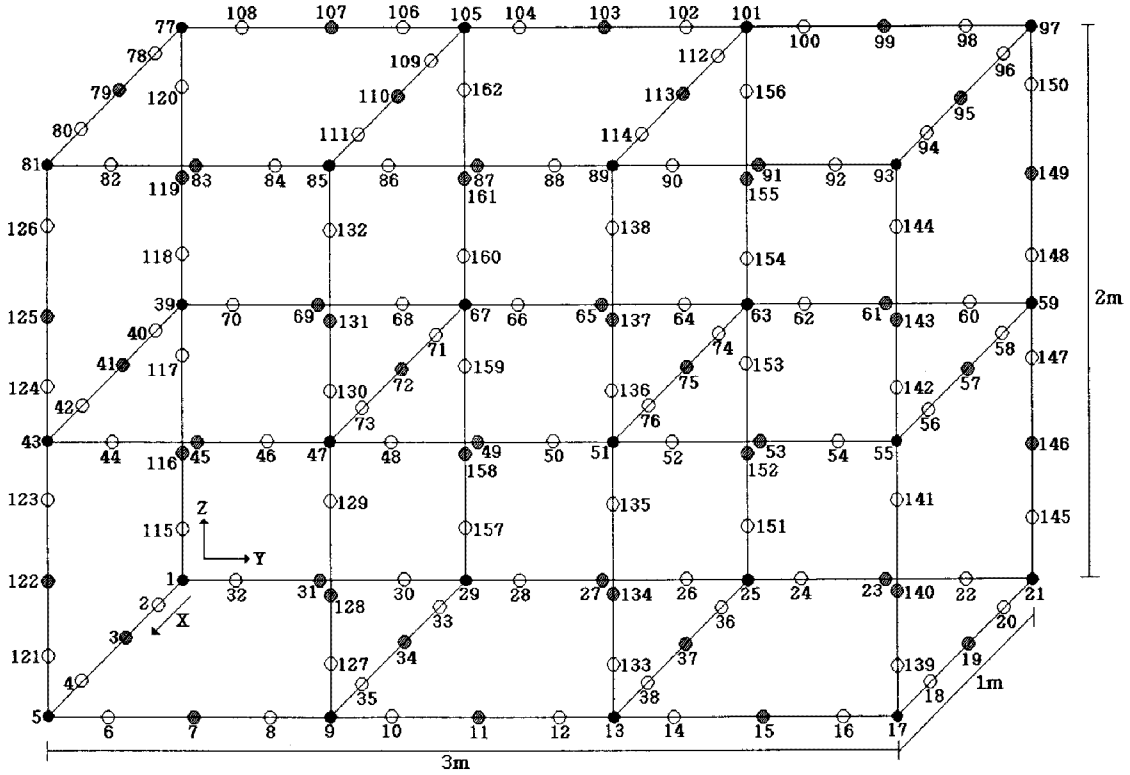

그림 1. 컨트롤 프레임과 컨트롤 포인트(Control frame & control point)

표 1. 컨트롤 프레임 구성 및 포인트 개수

프레임	포인트개수	포인트 번호
CF-01	8	1, 5, 17, 21, 77, 81, 93, 97
CF-02	20	CF-01, 3, 11, 19, 27, 39, 43, 55, 59, 79, 87, 95, 103
CF-03	20	CF-01, 9, 13, 25, 29, 39, 43, 55, 59, 85, 89, 101, 105
CF-04	24	CF-03, 47, 51, 63, 67
CF-05	32	CF-01, 3, 7, 9, 11, 13, 15, 19, 23, 25, 27, 29, 31, 79, 83, 85, 87, 89, 91, 95, 99, 101, 103, 105, 107
CF-06	44	CF-05, 39, 43, 55, 59, 116, 119, 122, 125, 140, 143, 146, 149
CF-07	56	CF-06, 41, 45, 47, 49, 51, 53, 57, 61, 63, 65, 67, 69
CF-08	70	CF-07, 34, 37, 72, 75, 110, 113, 128, 131, 134, 137, 152, 155, 158, 161
CF-09	92	1 ~32, 39, 43, 55, 59, 77 ~108, 115 ~126, 139 ~150
CF-10	106	CF-09, 41, 45, 47, 49, 51, 53, 57, 61, 63, 65, 67, 69, 72, 75
CF-11	126	1 ~32, 39 ~108, 115 ~126, 139 ~150
CF-12	138	CF-11, 34, 37, 110, 113, 128, 131, 134, 137, 152, 155, 158, 161
CF-13	162	모든 컨트롤 포인트
CF-14	8	9, 13, 25, 29, 47, 51, 63, 67
CF-15	8	9, 13, 25, 29, 130, 136, 154, 160
CF-16	8	9, 13, 25, 29, 131, 137, 155, 161
CF-17	8	9, 13, 25, 29, 132, 138, 156, 162
CF-18	8	9, 13, 25, 29, 85, 89, 101, 105
CF-19	8	9, 13, 25, 29, 47, 51, 63, 67
CF-20	8	8, 14, 24, 30, 46, 52, 62, 68
CF-21	8	7, 15, 23, 31, 45, 53, 61, 69
CF-22	8	6, 16, 22, 32, 44, 54, 60, 70
CF-23	8	1, 5, 17, 21, 39, 43, 55, 59

Ⅲ. 연구 결과

1. 각 컨트롤 프레임별 RMSE 분석 결과

각 컨트롤 프레임별로 공간검증시 나타난 RMSE는 <표 2>와 같다. 집단 1은 컨트롤 프레임의 크기를 1m×3m×2m로 고정시키고 각 컨트롤 프레임당 마커 개수를 달리 한 집단이고, 집단 2는 z축으로

크기를 확장한 집단이며, 집단 3은 y축으로 크기를 확장한 집단이다.

<표 2>에 제시되어 있는 개별 영상 프레임의 RMSE 평균값은 연구 대상이 된 10개의 영상 프레임 각각의 2차원 좌표 값을 이용하여 계산된 3차원 좌표 값에 대한 RMSE 평균값으로 <표 2>에서는 x, y, z 각각의 평균값과 전체 평균값을 함께 나타내었다. 2차원 평균 좌표값을 이용한 RMSE 값은 10개의 영상 프레임에서 얻어진 2차원 좌표 값의 평균값을 이용하여 계산된 3차원 좌표 값의 RMSE 값이다.

표 2. 각 컨트롤 프레임별 RMSE

소수점 5자리에서 반올림

	컨트롤 프레임	개별 영상 프레임의 RMSE 평균				2차원 평균 좌표값을 이용한 RMSE			
		X	Y	Z	전체	X	Y	Z	전체
집단 1	CF-01	1.0277	.5020	.5442	.6913	.9916	.4889	.5282	.6695
	CF-02	.8662	.4233	.4283	.5726	.8532	.4190	.4114	.5612
	CF-03	.8524	.38803	.3921	.5441	.8366	.3834	.3788	.5329
	CF-04	.8430	.3736	.3987	.5384	.8326	.3702	.3879	.5302
	CF-05	.8166	.4003	.3908	.5359	.8139	.3958	.3826	.5308
	CF-06	.8258	.3700	.3759	.5239	.8233	.3674	.3708	.5205
	CF-07	**.8111**	.3493	.3757	.5121	.8083	.3478	.3716	.5092
	CF-08	.8336	**.3300**	**.3615**	.5084	.8327	**.3281**	**.3583**	**.5063**
	CF-09	.8345	.3730	.3800	.5291	.8313	.3716	.3780	.5270
	CF-10	.8208	.3559	.3757	.5175	.8185	.3549	.3738	.5157
	CF-11	.8125	.3449	.3754	.5110	**.8114**	.3435	.3737	.5095
	CF-12	.8167	.3373	.3685	**.5075**	.8164	.3362	.3668	.5064
	CF-13	.8292	.3328	.3634	.5084	.8288	.3318	.3616	.5074
	합 계	10.9901	4.88043	5.1302	7.002	10.8986	4.8386	5.0435	6.9266
집단 2	CF-14	**.1837**	**.1006**	.1388	.1410	.1038	**.0671**	.0870	.0860
	CF-15	.1896	.1166	.1170	.1411	.1160	.1077	.0929	.1055
	CF-16	.1931	.1095	**.0894**	**.1307**	.1038	.0882	**.0357**	**.0759**
	CF-17	.2061	.1426	.1219	.1569	.1708	.1223	.0919	.1283
	CF-18	.1874	.1248	.1375	.1499	**.0767**	.0814	.0952	**.0844**
	합 계	0.95599	0.5941	0.6046	0.7196	0.5711	0.4667	0.4027	0.4801
집단 3	CF-19	.1837	.1006	.1388	.1410	.1038	.0671	**.0870**	.0860
	CF-20	**.1071**	**.0570**	.1889	**.1177**	**.0791**	.0456	.1840	.1029
	CF-21	.1660	.1013	**.1285**	.1319	.1149	.0433	.0914	**.0832**
	CF-22	.2073	.0935	.1624	.1544	.1789	.0794	.1421	.1335
	CF-23	.2087	.0785	.1987	.1620	.1639	**.0370**	.1556	.1188
	합 계	0.8728	0.4309	0.8173	0.707	0.6406	0.2724	0.6601	0.5244

집단 1의 개별 영상 프레임의 RMSE 평균값을 살펴보면, x축의 경우 CF-07, y축과 z축의 경우 CF-08이 가장 작은 값을 나타냈고, 전체에 대해서는 CF-12가 가장 작은 값을 나타냈다. 컨트롤 프레임의 크기를 확장한 집단 2의 경우에는 CF-16, 집단 3의 경우에는 CF-20이 전체평균에서 가장 작게 나타났다. 집단 1의 전체 RMSE 값을 살펴보면, CF-08까지는 RMSE가 작아지는 경향을 보이고 있고, 그 이후 CF에서는 다시 증가하였으나 특별한 경향을 보이고 있지는 않다. 특히, 컨트롤 포인트 20개를 사용한 CF-02가 컨트롤 포인트 8개를 사용한 CF-01에 비해 상대적으로 RMSE의 감소가 크게 나타났는데 이러한 결과는 Chen(1994)의 연구 결과와 동일한 것이다. 본 연구의 개별 영상 프레임의 RMSE 평균값에서는 x축의 RMSE가 가장 크게 나타났고, y축의 RMSE가 가장 낮게 나타났다. 2차원 평균 좌표값을 이용한 RMSE도 유사한 결과를 나타냈다.

집단 1에 대한 개별 영상 프레임의 RMSE 평균값과 2차원 평균 좌표값을 이용한 RMSE 값을 비교한 내용은 <그림 2>와 같다. <그림 2>를 살펴보면, 2차원 평균 좌표값을 이용한 RMSE가 개별 영상 프레임의 RMSE 평균값 보다 x, y, z, 전체 모두 상대적으로 작게 나타났다. 이러한 현상은 집단 2와 집단 3에서도 동일하게 나타났으며, 그 내용은 <그림 3>과 같다.

집단 1과 집단 2, 3을 비교해보면 컨트롤 프레임의 크기를 확장시킨 집단 2와 3이 집단 1보다 상대적으로 작은 RMSE 값을 나타냈다<그림 2, 그림 3 참조>. 이러한 차이는 컨트롤 프레임의 화면상의 위치로 인한 것으로 생각된다. 집단 1의 경우 컨트롤 프레임이 크기 때문에 화면 가장자리까지 크게 촬영된 반면, 집단 2와 집단 3은 상대적으로 크기가 작기 때문에 화면의 중앙부에 촬영되었다. 따라서 렌즈의 왜곡에 의해 RMSE의 크기가 다르게 나타난 것으로 생각된다. 이와 같은 현상은 2차원 평균 좌표값을 이용한 RMSE의 경우에도 동일하게 나타났다.

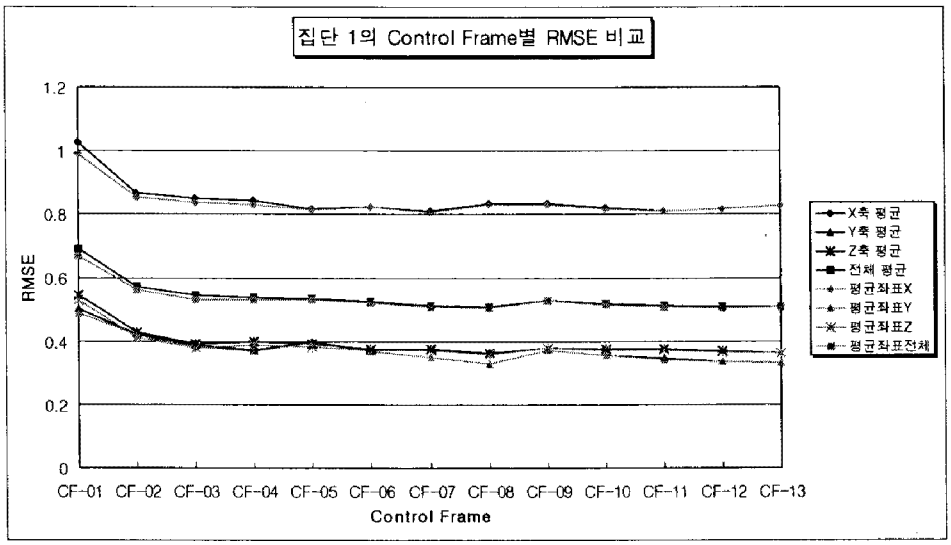

그림 2. 집단 1에 대한 RMSE 비교

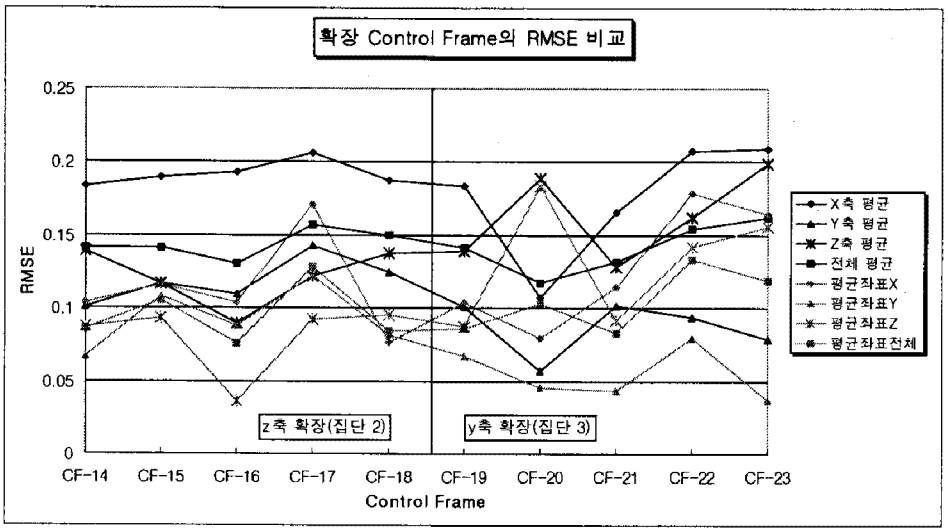

그림 3. 집단 2와 집단 3에 대한 RMSE의 비교

Chen(1994)은 3차원 변환시 렌즈의 왜곡에 의해 컨트롤 프레임이 볼록화 되는 현상을 보고하였으나 본 연구에서는 컨트롤 프레임의 볼록화 현상은 나타나지 않았다. 그러나 부분적으로 볼록화 현상과 비슷한 현상이 나타났으나 전체적인 현상이 아니기 때문에 볼록화 현상이라기보다는 에러에 의한 모양의 변화라고 판단된다.

2. 통계 분석 결과

집단 1에 대한 통계분석 대상은 컨틀롤 프레임별로 10개의 각 영상프레임의 x, y, z에 대한 RMSE로 총 130개의 영상프레임이 된다. 집단 1에 대한 분산분석 결과는 표 3과 같다.

표 3. 집단 1에 대한 분산분석 결과

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	0.29525541	0.02460462	178.61	<.0001
Error	117	0.01611734	0.00013776		
Corrected Total	129	0.31137275			
		R-Square : 0.948238			
Tukey의 HSD		1 2 3 4 5 9 6 10 7 11 13 8 12			

분석 결과를 살펴보면, 각 컨트롤 프레임간에는 RMSE에 차이가 있는 것으로 나타났다. RMSE가 가장 큰 것은 CF-1이었으며, 가장 작은 RMSE를 나타낸 것은 CF-12였다. 그러나 CF-6, CF-10, CF-7, CF-11, CF-13, CF-8, CF-12 간에는 통계적으로 차이가 나타나지 않았다. 8개의 컨트롤 포인트를 사용한 CF-1과 20개의 컨트롤 포인트를 사용한 CF-2 사이에는 <그림 2>에서 보이는 바와 같은 결과가 통계적으로도 유의한 차이가 나타나는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 Chen(1994)의 연구 결과와 동일하게 나타난 것이다. 특이한 점은 동일한 컨트롤 포인트 개수를 사용한 CF-2와 CF-3 사이에도 유의한 차이가 나타났다는 것이다. CF-2는 기본 프레임(12개의 연결막대(string)와 8개의 컨트롤 포인트)의 각 연결막대 중간에 컨트롤 포인트를 추가한 것이고, CF-3은 기본 프레임의 연결막대를 1m씩 균등 분할하여 분할 지점에 컨트롤 포인트를 추가한 것이다. 따라서 <표 3>의 분석 결과에 의하면 동일한 컨트롤 프레임과 포인트 개수를 사용하더라도 포인트를 균등하게 배치한 것이 유의하게 RMSE 값이 작게 나타났다.

Hinrichs & McLean(1995)의 연구 결과와 유사하게 44개의 포인트를 사용한 CF-6이 좋은 결과를 나타냈으며, 그 이상의 포인트를 사용하는 것은 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다.

<표 4>는 집단 2에 대한 분산분석 결과로서 z축으로 컨트롤 프레임의 크기를 확장한 집단 2에 대해서는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다.

표 4. 집단 2에 대한 분산분석 결과

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	4	0.00394748	0.00098687	0.63	0.6424
Error	45	0.07029407	0.00156209		
Corrected Total	49	0.07424154			

<표 5>는 y축으로 컨트롤 프레임을 확장한 집단 3에 대한 분산분석 결과이다. 분석 결과 CF-23과 CF-20 사이에 유의한 차이가 나타났으나, 다른 컨트롤 프레임 간에는 유의한 차이가 발견되지 않았다.

표 5. 집단 3에 대한 분산분석 결과

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	4	0.01244978	0.00311244	2.65	0.0453
Error	45	0.05283230	0.00117405		
Corrected Total	49	0.06528208			
		R-Square : 0.190707			
Tukey의 HSD		23 22 19 21 20			

z축으로 확장한 경우에 비해 y축으로 확장한 경우에는 컨트롤 프레임간 유의한 차이가 나타났는데 이는 집단 3의 영상이 집단 2의 영상보다 화면 가장자리까지 위치하고 있음을 고려해 볼 때 확장에 의한 것이라기보다는 렌즈의 왜곡에 의한 것으로 판단된다.

<표 6>은 집단 별로 개별 영상 프레임의 RMSE 평균과 2차원 평균 좌표값을 이용한 RMSE 값의 차이를 분석한 내용이다.

표 6. RMSE에 대한 t-test 분석 결과

	변 인	N	Mean	SD	DF	t Value	Pr>|t|
집단 1	개별 영상 프레임의 RMSE 평균	13	.5385	.0496	24	0.31	0.7606
	2차원 평균 좌표값을 이용한 RMSE	13	.5328	.0439			
집단 2	개별 영상 프레임의 RMSE 평균	5	.1439	.0099	8	4.60	0.0018
	2차원 평균 좌표값을 이용한 RMSE	5	.096	.021			
집단 3	개별 영상 프레임의 RMSE 평균	5	.1414	.0176	8	2.94	0.0187
	2차원 평균 좌표값을 이용한 RMSE	5	.1049	.0215			

<그림 2>에서는 집단 1에 대하여 2차원 평균 좌표값을 이용한 RMSE가 개별 영상 프레임의 RMSE 평균 값보다 상대적으로 작게 나타났으나 통계적 분석에서는 유의한 차이를 나타내지 않았으며, 집단 2와 집단 3에서는 유의한 차이를 나타내고 있다. 이러한 결과는 집단 1의 경우 영상이 화면의 가장자리까지 꽉 차 있으므로 해서 렌즈의 왜곡에 의한 에러의 변화 폭이 크기 때문인 것으로 판단되며, 집단 2와 집단 3의 경우는 상대적으로 렌즈의 왜곡이 작아 에러의 변화폭이 작기 때문에 나타난 결과인 것으로 판단된다.

Ⅳ. 결론 및 제언

본 연구는 DLT를 이용한 3차원 공간 검증시 발생되는 RMSE에 대한 통계적 분석으로서 연구 결과들을 종합해 보면 아래와 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 2차원 평균 좌표 값을 이용한 RMSE가 개별 영상 프레임의 RMSE 평균값 보다 전체 집단에서 상대적으로 작게 나타났으나, 통계적으로는 집단 2와 집단 3에서만 유의한 차이가 나타났다.
2. 집단 1에 비해 화면의 중앙에 촬영된 집단 2와 집단 3의 RMSE 값이 작게 나타났다.
3. 컨트롤 포인트를 44개 사용하였을 경우에 가장 작은 RMSE 값을 나타냈으며, 통계적으로도 유의한 차이를 나타냈다.

4. 동일 개수의 컨트롤 포인트를 사용하였을 경우에는 컨트롤 프레임에 균등하게 배치하였을 때 RMSE 값이 작게 나타났으며, 통계적으로도 유의한 차이를 나타냈다.
5. 촬영에서 얻어진 영상의 크기에 따라 RMSE의 값에 변화가 발생하는 것으로 보아 렌즈의 왜곡에 의해 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.
6. 컨트롤 프레임의 볼록화 현상은 나타나지 않았다.

위와 같은 결과들을 종합해 볼 때 컨트롤 프레임을 이용한 3차원 공간검증시 RMSE 값을 최소화 할 수 있는 방법은 24~44개의 컨트롤 포인트를 균등하게 배치한 컨트롤 프레임을 이용하며, 촬영시 컨트롤 프레임의 영상이 화면 전체에 꽉 차지 않도록 하여 가능한 화면의 중앙부에 촬영이 되도록 하여야 한다. 또한 왜곡이 작은 렌즈를 사용하여 여러개의 영상 프레임을 얻어 2차원 평균 좌표 값을 이용하여 3차원 좌표 값을 계산하는 것이다.

이러한 결론에도 불구하고 각 컨트롤 프레임 별로, 10개의 영상 프레임 각각의 RMSE 값들 중에는 2차원 평균 좌표 값을 이용한 RMSE 값보다 작은 프레임이 존재하였다. 따라서 정확한 공간검증 방법 중의 또 다른 방법으로서 여러개의 영상 프레임을 얻어 그 중 RMSE가 가장 작은 영상프레임을 이용하는 것도 고려해 볼 수 있을 것이다. 그러나 이러한 방법을 사용하기 위해서는 x, y, z축 모두 작은 RMSE 값을 나타내었을 때만 사용하는 것이 바람직하다.

본 연구의 결과에서 8개의 컨트롤 포인트를 사용하였을 경우 RMSE 평균값이 가장 크게 나타났으나 각 영상 프레임별로 살펴보면, 각 축별로 1cm 이하인 영상 프레임이 존재하는 것을 볼 때, 사용상에는 커다란 문제가 없는 것으로 판단된다. 그러나 보다 정확한 분석을 위해서는 본 연구의 결과를 수용하는 것이 바람직하다고 생각한다.

참 고 문 헌

Challis, J. H. (1995). A multiphase calibration procedure for the direct linear transformation(Technical note). Journal of Applied Biomechanics, 11, pp.351-358.

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(4), pp.493-500.

Hatze, H. (1988). High-precision three-dimensional photo-grammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach. Journal of Sport Biomech., 5, pp.457-460.

Hinrichs, R. N., & McLean, S. P. (1995). NLT and extrapolated DLT: 3-D cinematography alternatives for enlarging the volume of calibration. Journal of Biomechanics(Technical note), 28(10), pp.1219-1223.

Walton, J. S. (1981). Close-range cine-photogrammetry: a generalized technique for quantifying gross human motion. Unpublished doctoral dissertation, Pennsylvania State University.

Wisner, D. M. (1992). Determination of the precision, accuracy and resolution of a video-based motion analysis system. master's thesis, Purdue University.

Wood, G. A., & Marshall, R. N. (1986). The accuracy of DLT extrapolation in three-dimensional film analysis. Journal of Biomechanics, 19, pp.781-785.