

주관절 운동의 상완·전완좌표계 타당도 및 굴곡/신전과 회내/회외의 상호작용

김진욱¹

¹군산대학교 자연과학대학 체육학과

The Validity Test of Upper · Forearm Coordinate System and the Exploratory Analysis of the Interactive Effect between Flexion/Extension and Pronation/Supination during Elbow Joint Motion

Jin-Uk Kim¹

¹Department of Physical Education & Sports, College of Natural Science, Kunsan National University, Gunsan, Korea

Received 30 April 2010; Received in revised from 28 May 2010; Accepted 12 June 2010

ABSTRACT

The axes of upper forearm coordinate system have been considered as principal axis of each segment which was component of elbow joint. The purpose of this study was to verify whether the mean direction(principal axis) of instantaneous axes of rotation for pure flexion/extension motion coincided with the flexion/extension axis of upper forearm coordinate system. The same procedure was done for pronation/supination motion. Futhermore, it was tested indirectly that there was an interaction effect between the two rotational motions. The results showed that most segment coordinate axes statistically were not consistent with the mean directions of flexion/extension and pronation/supination axes of rotation. From the results, it would be concluded that the ISB coordinate systems was proved to be a little valid for human movement analysis. There also was an effect of pronation/supination angles on flexion/extension motion.

Keywords : Elbow Joint, Axis of Rotation, Axial Data, Coordinate System, Directional Statistics, Watson Distribution

I. 서 론

공간에서 손(hand)의 정교한 움직임을 조절하고, 물건을 힘껏 잡기, 그리고 전완(forearm)의 받침점으로서 역할을 하는(Zampagni, Casino, Martelli, Visani & Marcacci, 2008) 주관절(elbow joint)은 대개 굴곡/신전, 회내/회외의 자유도가 2인 관절(Prokopenko, Frolov, Biryukova, Robi-Brami, 2001; Veeger, Yu, An &

Rozendal, 1997)로 모형화 한다.

주관절운동은 두 분절 간의 상대운동이므로 전완과 상완 양 분절의 좌표계가 모두 사용되어 상대분절의 운동인 관절의 회전 운동을 묘사할 수 있다. 해부학적 랜드마크(anatomical landmark)에 의해서 정의된 분절좌표계는 항상 오차가 포함된 것으로 가정하기 때문에 좌표계의 타당성 검증은 필수적이라 할 것이다. 만일 주관절이 순수한 굴곡/신전운동을 수행하였다고 가정한다면 상완좌표계와 전완좌표계에서의 회전축(axis of rotation)은 이 상적으로 굴곡/신전 성분만 나타나야 한다. 실재는 이와 같은 관측값이 나타나지는 않을 것이며 여러 종류의 오차가 포함된 좌표계에서 관측된 값은 타당하다고 할 수 있는지 판단해야 한다. 또한 자유도가 2인 주관절에서는 전완의 회내/회외 각도를 달리

Corresponding Author : Jin-Uk Kim

Department of Physical Education & Sports, Kunsan National University, 1170 Ave., Gunsan-si, Jeollabuk-do, Korea
Tel : +82-63-469-4644 / Fax : +82-63-469-4641

E-mail : windoft@hanmail.net

본 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-359-G00005)

하였을 때 일관된 결과를 나타내는지 살펴볼 필요성이 있다.

Veeger et al.(1997)은 주관절의 굴곡/신전, 회내/회외 회전축을 단위벡터로 표현하여 성분별로 분석하였다. 대표축은 Woltring(1990)이 제안한 최적방향벡터(optimal direction vector)를 이용하여 구하였으며 각 순간회전축과 최적방향벡터간의 차이에 대한 평균 각도를 오차로서 보고하였다. 굴곡/신전과 회내/회외 두 회전축의 방향은 거의 직교한다고 하였다. 여기서 사용된 좌표계는 고정된 전역좌표계이며 사체(cadaver)를 고정시켜 수동운동에 의하여 분석하였다. Cutti, Garofalo, Davalli, 와 Cappello(2006)는 순수하게 주관절의 굴곡/신전운동을 시켰을 때 좌표계의 다른 축에서 발생하는 회전운동을 관측하여 수량화 하였다. 발생오차는 각 축들의 대략적인 정의(approximated definition)때문이라 하였다. 사용된 좌표계는 ISB(international society of Biomechanics)에서 권장하는 두 개의 상완좌표계와 한 개의 전완좌표계이며 사체를 이용하였다. 일상적인 동작으로는 van Andel, Wolterbeck, Doorenbosch, Veeger, 와 Harlaar(2008)가 ISB표준의 상완좌표계의 옵션 2를 이용하여 주관절의 굴곡/신전, 회내/회외 분석을 수행한 바 있다.

선행연구들은 고정된 좌표계 또는 ISB권장좌표계에서 주관절의 순간회전축을 묘사하고 분석하면서 좌표계의 오차가 어느 정도 되는가에 대한 측정으로 요약된다. 그러나 이 연구들은 오차가 받아들일 수 있는가에 대한 한계(limit)를 제시하고 있지 못하다. 즉, 신뢰영역(confidence region)에 대한 고려를 하고 있지 않는데 이는 회전축이 일반통계학을 적용시켜서는 안 되는 특수한 형태의 자료이기 때문이다(김진욱, 2009). 그리고 굴곡/신전, 회내/회외의 두 운동이 독립적으로 발생하는가를 알아보기 위해서는 회내/회외각도를 고려한 상태에서 굴곡/신전운동의 회전축과, 굴곡/신전각도를 고려한 상태에서 회내/회외 회전축에 대한 분석이 요구된다.

본 연구에서는 두 가지 연구문제를 설정하였다. 첫 째, 주관절의 굴곡/신전회전축과 회내/회외회전축이 상완좌표계와 전완좌표계의 해당축과 일치하는가에 대한 가설검정이다. 둘째, 회내/회외운동과 굴곡/신전운동간의 상호작용에 대한 것이다. 두 연구문제를 통해서 상지분절 좌표계의 타당성과 회내/회외축, 굴곡/신전축이 서로 직교하는지 알아보는데 연구의 목적이 있다.

II. 연구방법

본 연구를 위해 상지의 근골격계 부상 경력이 없는 오른손을 주로 사용하는 5명의 피험자(남자, 신장 : 175.8±5.8 cm, 체질량 : 72±6.4 kg, 나이 : 20±0 year)를 선택하였다. 피험자는 실험목적에 대해 간단한 설명을 받았으며 실험참여에 동의하였다.

본 연구에서 주관절 모형은 운반각(carrying angle, valgus angle)이 없으며 굴곡/신전, 회내/회외운동만 존재하는 자유도 2의 관절이라 가정하였다. 좌표계는 직교좌표계와 구형좌표계를 사용하였다. 직교좌표계의 +x 축은 전방, +y 축은 상방, 그리고 +z 축은 우측이다. 또한 구형좌표계의 θ 는 여위도(colatitude)로 +y 축과 회전축이 이루는 각도이며($0 \leq \theta \leq \pi$), ϕ 는 경도(longitude)로 x,z 축이 이루는 횡단면(transverse plane)에 투사된 회전축과 +z 축과의 각도($0 \leq \phi \leq 2\pi$)이다(Figure 1).

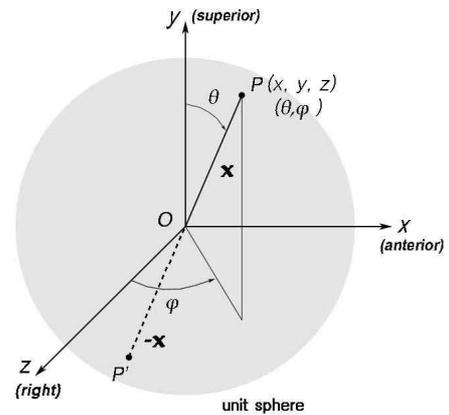


Figure 1. Coordinate system($\vec{OP} = \vec{OP}'$: axis of rotation)

각 분절에 손으로 만져지는 랜드마크(landmark)에 마커(marker)를 부착하여 마커의 위치로서 좌표계를 정의 하였다(Meskers, van der Helm, Rozendaal, & Rozing, 1988; Wu et al., 2005). 상완좌표계를 정의하려면 GH(glenohumeral joint center)의 좌표가 필요하며, GH 추정에는 ISB의 권장에 따라(Wu et al., 2005) 예측방법(prediction method)을 이용했다(Meskers et al., 1998). 본 연구에서 몸통과 상완의 움직임이 거의 없는 것을 감안할 때 예측방법이 더 적절할 수 있으며, GH의 위치 x,y,z의 회귀식은 다음과 같다(설명변수명은 Table 1 참조).

$$\begin{aligned}
 x &= 26.896 + 0.614(TS_x) \\
 &\quad + 0.295(\|AI - PC\|) \\
 y &= -16.307 + 0.825(AC_y) \quad (1) \\
 &\quad + 0.293(PC_z) \\
 z &= -1.740 - 0.899(\|AA - PC\|) \\
 &\quad - 0.229(TS_x)
 \end{aligned}$$

보다 개선되었던 식 (1)은 Campbell, Lloyd, Anderson, 과 Elliot(2009)이 MRI를 이용하여 타당함을 밝혀낸 것이다. 원점을 AC로 설정한 Meskers et al.(1998)의 좌표계를 ISB 좌표계 원점인 AA로 변환시킨 것이다. 그러나 ISB좌표계의 각 성분과 약간 다르며 GH좌표를 ISB좌표계 성분으로 변환하였다.

Table 1. The marker placement positions & coordinate systems

Segments	Marker placement positions
Scapula	AC(art. acromioclaviculare)
	AA(angulus acromialis)
	TS(trigonum scapulae)
	AI(angulus inferior)
	PC(process coracoideus)
Forearm	EL(lateral epicondyle)
	EM(medial epicondyle)
	H1(middle point of lateral surface)
	H2(middle point of medial surface)
	Coordinate Systems humerus coordinate system option1 z_{opt1} a humerus coordinate system option2 z_{opt2} a
Lower arm	US(ulna styloid)
	RS(radial styloid)
	R1(2/3 point of lateral surface)
	R2(2/3 point of medial surface)
	Coordinate Systems forearm coordinate system y_f b ulna coordinate system y_u b radius coordinate system y_r b

a. used in the test of flexion/extension motion(z)
b. used in the test of pronation/supination motion(y)

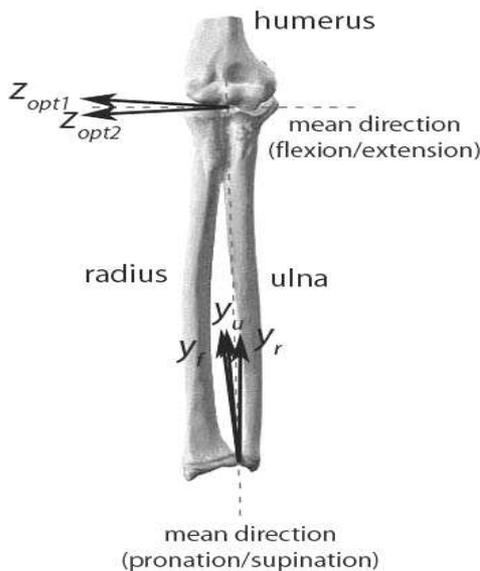


Figure 2. Two mean directions of elbow joint & the axes of fore and lowerarm coordinate system

마커가 부착된 위치는 <Table 1>과 같다. H1, H2, R1, R2는 추정될 회전축의 효율성을 위해서 추가적으로 부착된 마커이다. H1, H2는 상완의 중간지점에, R1, R2는 전완의 원위쪽(distal) 2/3 지점에 부착하였다.

본 연구에서 검정에 사용된 좌표계는 상완좌표계 2개, 전완좌표계 3개로 총 5개의 좌표계이다<Table 1>, 상완의 좌표계는 상완골(humerus)좌표계 옵션1, 옵션2이며, 전완의 좌표계는 전

완(forearm)좌표계, 척골(ulna)좌표계, 요골(radius)좌표계이다(Wu et al., 2005).

굴곡/신전 회전축 일치검정에 사용된 좌표계는 상완골좌표계 옵션1, 옵션2이며 해당축 z 를 각각 z_{opt1} , z_{opt2} 로 표기하였다. 회내/회외 회전축 일치검정에 사용된 좌표계는 전완의 세 개의 좌표계로 해당축 y 를 각각 y_f (전완좌표계), y_u (척골좌표계), y_r (요골좌표계)로 표기했다(Table 1, Figure 2).

주관절의 각 회전운동의 순간회전축은 Söderkvist 와 Wedin(1993), Challis(1995)의 SVD(singular value decomposition)에 의한 최소제곱법(least squares method)으로 상완, 전완 분절의 회전행렬을 추정된 다음, 관절의 회전행렬을 계산하였으며 이 회전행렬로 순간회전축을 구하였다(Greenwood, 2003). 이 방법은 프레임 간 마커들의 위치변화에서 순수한 회전성분만을 추출하는 polar decomposition의 방법이다. 각 순간회전축들의 위치는 Spoor 와 Veldpaus(1980)에 의한 방법을 이용하여 표현하였다. 샤슬레의 정리(Charles' theorem)에 의해서 회전축과 수직인 반경벡터와 병진 성분으로서 회전축을 표현하는 방법이다. 순간회전축들은 검정에 사용될 각 분절의 좌표계 성분으로 변환하였다.

1. 실험설계와 절차

본 연구의 문제를 해결하기 위해서 두 가지 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 회내/회외각도를 고려한 상태에서 굴곡/신전 운동의 회전축에 대한 것이며, 두 번째 실험은 반대로 굴곡/신전 각도를 고려한 상태에서 회내/회외운동의 회전축에 대한 것이다. 두 실험 모두 요인(factor)이 두 개인 피험자내 설계(within-subjects design)를 이용하였다. 피험자는 상의를 탈의한 상태에서 상체를 수직으로 세우고 의자에 앉아서 높이 75 cm의 탁자위에 자연스럽게 오른쪽 전완을 수평상태로 놓았다. 그리고 전완만을 움직여서 굴곡/신전, 회내/회외운동을 수행하도록 하였다. 동작 시작 전에 전완이 놓인 위치에 테이프로 표시를 하여 한 주기가 끝날 때 원래의 위치로 쉽게 올 수 있도록 하였다.

첫 번째 실험의 구체적인 내용은 다음과 같다. 두 개의 요인은 수동운동(passive motion)과 능동운동(active motion)을 수준(level)으로 하는 운동형태요인(type of motion factor)과 회내, 중립, 회외 세 가지 수준을 가지는 전완의 장축각도요인(forearm long axis angle factor)이다. 피험자는 운동형태요인의 수준이 먼저 랜덤하게 선택되었다. 그리고 이 조건에서 장축각도요인의 수준인 회내, 중립, 회외가 랜덤하게 선택되어 굴곡/신전운동을 세 번씩 시도(trial)하였다. 각 시도는 세 번의 주기(cycle)로 이루어졌으며 시도간 휴식은 10 s, 수주간 휴식은 30 s로 하였다. 세 번의 시도 중에서 랜덤하게 한 개가 선택되어 두 번째 주기를 분석에 이용하였다. 두 번째 실험은 운동형태요인(수동운동, 능동운동)과 굴곡, 중립, 신전의 전완과 상완의 각도요인(angle

between forearm and lowerarm)에서 모든 피험자가 회내/회외운동을 수행하였다. 처리순서는 첫 번째 실험과 마찬가지로 랜덤하게 결정하였다.

수동운동은 연구자가 피험자의 관절운동을 수행하는 것이며, 능동운동은 피험자가 자발적으로 관절운동을 수행하는 것이다. 전완장축각도요인의 수준인 회내는 손등이 위로, 중립은 손이 수직, 회외는 손바닥이 위로 향한 상태로 정의하였다. 전/상완각도요인의 수준인 굴곡은 약 45° , 중립은 약 90° , 신전은 약 135° 로 정의하였다. 운동수행 전에 되도록 순수한 굴곡/신전, 회내/회외 동작이 되도록 연습하였으며, 연구자의 “하나, 둘” 구령의 리듬에 맞춰 동작을 수행하였다. 주관절의 굴곡/신전, 회내/회외 운동의 평균각속도는 약 2 rad/s 였다. 각 피험자의 실험시간은 약 30분 소요되었다. 이 동작수행은 네 대의 카메라(VM-HMX20C, 삼성)에 의해서 촬영되었고(60 frames/s) KWON3D(Visol)에 의해서 마커의 3차원좌표를 얻었다.



Figure 3. Position of a subject during the experiments

2. 통계적 분석

첫 번째 연구문제인 좌표계축 일치에 관한 통계적 가설검정은 수준의 조합인 여섯 가지 처리에서 모든 피험자에 대해 수행하였다. 본 연구에서 얻어진 표본인 순간회전축은 축자료(axial data)에 해당된다. 축자료에 대한 가설검정은 Mardia 와 Jupp(2000)의 집중모수가 큰 경우의 점근적 분석(high-concentration asymptotics)에 의한 분산분석분해 검정을 이용했으며 다음과 같다. 분절좌표계의 굴곡/신전축 단위벡터는 $\mathbf{k} = (0, 0, 1)$, 회내/회외축 단위벡터는 $\mathbf{j} = (0, 1, 0)$ 이며 분절좌표계 성분으로 변환된 순간회전축들의 평균방향(mean direction)이 이와 동일한가에 대한 검정이므로 다음과 같은 귀무가설을 세울 수 있다.

$$H_0 : \pm \boldsymbol{\mu} = \pm \boldsymbol{\mu}_0 \quad (2)$$

여기서 굴곡/신전의 경우 $\boldsymbol{\mu}_0 = (0, 0, 1)$ 이며, 회내/회외일 경우 $\boldsymbol{\mu}_0 = (0, 1, 0)$ 이다. 순간회전축 $\pm \mathbf{x}_1, \dots, \pm \mathbf{x}_n$ 이 왓슨 분포(Watson distribution)로부터 추출된 표본으로 양극(bipolar)분포를 할 때 다음과 같은 분해식을 얻을 수 있다(Mardia & Jupp, 2000).

$$2n\kappa(1 - \boldsymbol{\mu}_0 \mathbf{T} \boldsymbol{\mu}_0) = 2n\kappa(1 - \tau) + 2n\kappa(\tau - \boldsymbol{\mu}_0 \mathbf{T} \boldsymbol{\mu}_0) \quad (3)$$

여기서 n 은 표본수, κ 는 왓슨분포의 집중모수(concentration parameter), \mathbf{T} 는 표본들의 관성모멘트 행렬($\mathbf{T} = n^{-1} \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^T$), τ 는 관성모멘트 행렬의 가장 큰 아이겐값(eigenvalue)이다. 식 (3)의 각 항은 표본들이 $\boldsymbol{\mu}_0$ 주위에 퍼진 정도, $\boldsymbol{\mu}$ 의 추정량(estimator)인 $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ 주위에 퍼진 정도, 그리고 $\boldsymbol{\mu}_0$ 로부터 $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ 의 편차를 나타낸다. 우변의 두 항은 각각 자유도 $(n-1)(p-1)$, $(p-1)$ 의 χ^2 분포를 하고 거의 독립으로 자유도를 고려한 두 항의 비율은 다음과 같다.

$$F = \frac{(\tau - \boldsymbol{\mu}_0 \mathbf{T} \boldsymbol{\mu}_0)/(p-1)}{(1-\tau)/(n-1)(p-1)} \quad (4)$$

$$\sim F_{(p-1), (n-1)(p-1)}$$

이 통계량이 크다면 귀무가설은 기각되며, 순간회전축의 평균방향과 좌표계축은 일치하지 않는다고 할 수 있다. 여기서 p 는 자료의 차원으로 본 연구에서는 3이다. $\boldsymbol{\mu}$ 의 추정량 $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ 은 평균방향(주축)으로 τ 에 해당되는 아이겐벡터(eigenvector)이며, $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ 의 구형표준오차(spherical standard error) $\hat{\sigma}$, 95% 신뢰영역(confidence cone), 그리고 $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ 와 95% 신뢰영역이 이루는 각도 γ 를 구하였다(Fisher, Lewis, & Embleton, 1993). 원자료의 스무딩, 좌표계 정의, 회전축 그리고 통계적 추정과 가설검정은 MATLAB ver 6.1(The MathWorks)을 이용하였다.

두 번째 연구문제인 두 회전운동요인의 직접적인 교호작용 효과(interaction effect)는 검정이 불가능하다. 따라서 회내, 중립, 회외 간 굴곡/신전회전축의 변화양상과, 굴곡, 중립, 신전 간 회내/회외회전축의 변화양상을 살펴보고 상호작용을 탐색하였다. 식 (3)의 분산분석분해모형을 보면 표본벡터들의 관성모멘트 행렬의 가장 큰 아이겐값들로 이루어져 있는 것을 알 수 있다. 따라서 여섯 개의 처리에 대한 아이겐값을 표본이라 가정하고 SPSS ver 12(SPSS)의 반복측정분산분석(repeated measures ANOVA)절차를 추가적으로 수행하였다. 이 분석으로 상호작용을 간접적으로 검정하였다. 회전축과 같은 방향자료(directional data)의 경우 이원분산분석모형(Figueiredo, 2006; Stephen, 1982)만이 존재하기 때문이다. 처리간 등분산과 등상관성 가정은 실험

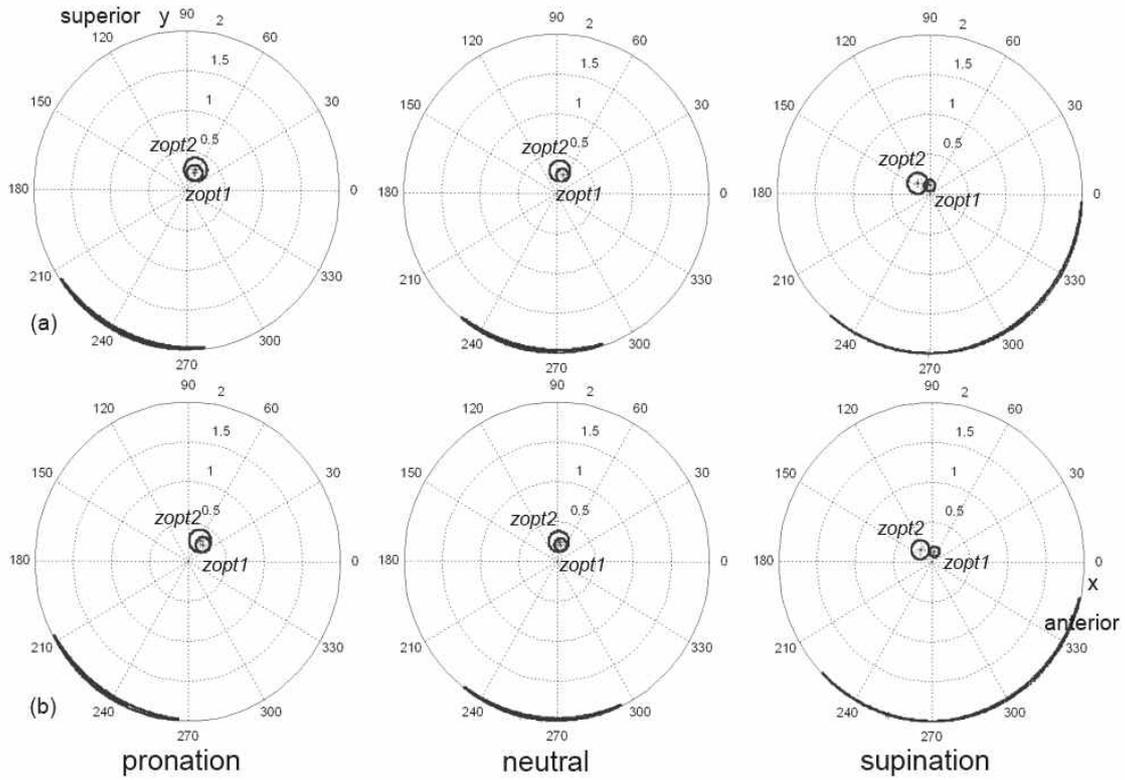


Figure 4. 95% confidence regions of flexion/extension principal axes(subject 2) : (a) passive motion, (b) active motion.

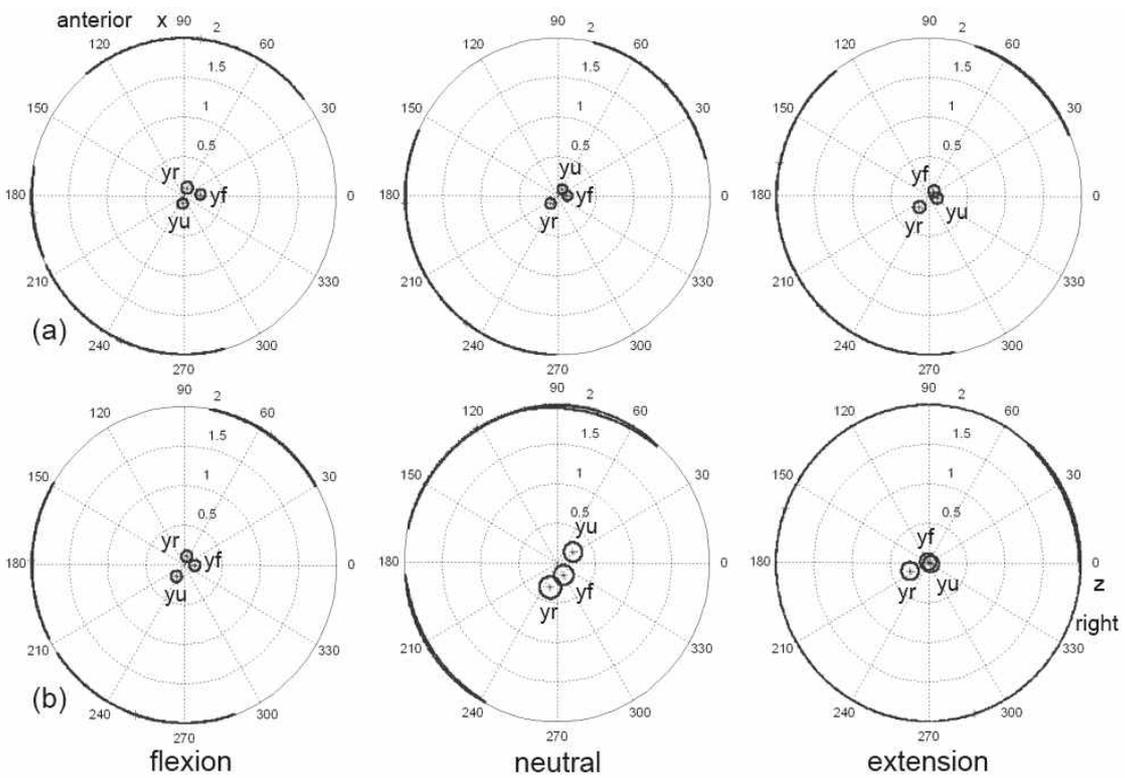


Figure 5. 95% confidence regions of pronation/supination principal axes(subject 2) : (a) passive motion, (b) active motion.

Table 2. The statistic of flexion/extension axes of rotation

Type of motion(A)		Passive			Active		
Forearm long axis angle(B)		Pronation	Neutral	Supination	Pronation	Neutral	Supination
s ₁	z_{opt1}	$\pm \hat{\mu}$ (-.176 .157 .972)	(-.163 .170 .972)	(-.283 .012 .959)	(-.179 .135 .975)	(-.356 .126 .926)	(-.277 .029 .960)
	σ, γ $F(p)$	.075, 7.50° 8.44(.000)	.062, 6.20° 12.16(.000)	.071, 7.00° 19.11(.000)	.069, 6.81° 9.21(.000)	.080, 7.96° 26.94(.000)	.051, 5.05° 25.85(.000)
s ₂	z_{opt1}	$\pm \hat{\mu}$ (.191 .187 .964)	(-.000 .202 .979)	(-.120 .044 .992)	(.192 .167 .967)	(-.045 .166 .985)	(-.125 .048 .991)
	σ, γ $F(p)$	.096, 9.59° 7.45(.000)	.087, 8.68° 4.99(.007)	.115, 11.48° 2.04(.132)	.103, 10.25° 6.75(.001)	.122, 12.20° 2.58(.082)	.0803, 7.99° 2.83(.061)
s ₃	z_{opt1}	$\pm \hat{\mu}$ (.111 .228 .967)	(.077 .226 .971)	(.001 .111 .994)	(.197 .230 .958)	(.054 .214 .975)	(.038 .129 .991)
	σ, γ $F(p)$	.059, 5.82° 15.34(.000)	.048, 4.71° 17.37(.000)	.041, 4.08° 4.49(.012)	.055, 5.44° 22.16(.000)	.047, 4.71° 13.46(.000)	.038, 3.74° 8.09(.000)
s ₄	z_{opt1}	$\pm \hat{\mu}$ (.120 .269 .956)	(.047 .278 .960)	(-.1566 .139 .978)	(.160 .256 .954)	(.026 .254 .967)	(-.145 .155 .977)
	σ, γ $F(p)$	.087, 8.64° 11.11(.000)	.078, 7.72° 11.18(.000)	.076, 7.52° 6.41(.002)	.083, 8.22° 13.23(.000)	.076, 7.60° 8.95(.000)	.068, 6.80° 7.91(.000)
s ₅	z_{opt1}	$\pm \hat{\mu}$ (-.093 .078 .993)	(.089 .079 .993)	(-.034 .072 .997)	(.018 .095 .995)	(-.051 .059 .997)	(-.072 .108 .992)
	σ, γ $F(p)$	.052, 5.19° 3.69(.026)	.064, 6.35° 2.77(.065)	.043, 4.23° 2.29(.103)	.051, 5.09° 2.29(.105)	.047, 4.67° 1.81(.166)	.037, 3.64° 8.87(.000)
s ₆	z_{opt1}	$\pm \hat{\mu}$ (.195 .099 .976)	(.208 .108 .972)	(-.055 .085 .995)	(.257 .120 .959)	(.095 .084 .992)	(-.083 .127 .988)
	σ, γ $F(p)$	.080, 7.92° 5.99(.002)	.099, 9.62° 5.76(.003)	.077, 7.66° 1.51(.222)	.086, 8.56° 9.09(.000)	.082, 8.12° 2.03(.134)	.074, 7.34° 3.65(.028)
s ₇	z_{opt1}	$\pm \hat{\mu}$ (-.241 .129 .962)	(-.349 .089 .933)	(-.313 .029 .949)	(-.306 .152 .940)	(-.123 .091 .988)	(-.252 .023 .968)
	σ, γ $F(p)$	.075, 7.44° 12.12(.000)	.065, 6.45° 28.77(.000)	.049, 4.85° 32.77(.000)	.078, 7.79° 19.01(.000)	.066, 6.57° 4.60(.011)	.046, 4.58° 19.51(.000)
s ₈	z_{opt1}	$\pm \hat{\mu}$ (.052 .145 .988)	(-.085 .110 .990)	(-.194 .039 .980)	(.047 .180 .983)	(-.033 .122 .992)	(-.185 .031 .982)
	σ, γ $F(p)$	.099, 9.78° 2.47(.087)	.099, 9.88° 2.10(.126)	.075, 7.46° 6.94(.001)	.113, 11.32° 3.05(.049)	.103, 10.28° 1.41(.246)	.084, 8.33° 4.89(.008)
s ₉	z_{opt1}	$\pm \hat{\mu}$ (-.164 .141 .976)	(-.070 .142 .988)	(-.238 .116 .964)	(.011 .245 .970)	(-.112 .192 .975)	(-.093 .113 .989)
	σ, γ $F(p)$	.061, 6.10° 9.74(.000)	.046, 4.52° 7.40(.001)	.056, 5.53° 20.52(.000)	.079, 7.82° 8.71(.000)	.062, 6.12° 9.18(.000)	.076, 7.52° 3.36(.036)
s ₁₀	z_{opt1}	$\pm \hat{\mu}$ (.160 .178 .971)	(.124 .170 .978)	(-.111 .146 .983)	(.176 .295 .939)	(.075 .228 .971)	(-.052 .185 .981)
	σ, γ $F(p)$	.095, 9.47° 6.79(.001)	.079, 7.87° 5.83(.003)	.092, 9.15° 4.24(.016)	.109, 10.85° 10.74(.000)	.097, 9.66° 5.32(.005)	.127, 12.74° 2.39(.095)

Note. s₁, s₂, s₃, s₄, s₅ = subjects; z_{opt1} = humerus coordinates option1; z_{opt2} = humerus coordinates option2; $\pm \hat{\mu}$ = principal axis(mean direction); σ = spherical standard error; γ = semi-vertical angle of 95% confidence cone; F(p) = test statistic(sig. p); ■ = not significant.

처리의 순서를 랜덤하게 진행하였기 때문에 만족하는 것으로 보았으며, 그렇지 못한 경우에는 Huynh-Feldt의 보정된 자유도에 의한 일반량분석결과를 가설검정에 이용했다. 동일한 조건에서 비교를 위하여 모든 처리의 관성모멘트행렬은 전역좌표계 성분으로 하였다. 주효과가 있는 경우 사후검정은 Bonferroni의 방법을 이용하였으며, 모든 가설검정의 유의수준은 .05로 하였다.

III. 결 과

전원의 회내, 중립, 회외 상태에서 주관절 굴곡/신전 운동시 각각 상완좌표계 옵션1, 옵션2에서 추정된 굴곡/신전 순간회전 축들의 주축(*)과 95% 신뢰영역(○)을 나타낸 equal-area

projection은 <Figure 4>와 같다. 이것은 관측자가 각 좌표계의 +z축에서 바라보도록(+x : 전방, +y : 상방) 추가적으로 변환시킨 것이다. 굴곡/신전운동의 경우 주축이 상완좌표계 옵션1과 옵션2의 z축에서 상방으로 약간 치우쳐 있으며, 신뢰영역이 z축을 확실하게 포함하지 않은 것으로 보아 좌표계 축과 주축은 일치하지 않는다 할 수 있다.

<Figure 5>는 주관절의 굴곡, 중립, 신전 상태에서의 회내/회외 운동시 각각 전완좌표계, 척골좌표계, 요골좌표계에서 추정된 회내/회외 주축과 95% 신뢰영역의 equal-area projection이다. 이는 관측자가 +y축에서 바라본 것을 나타낸 그래프이다. 회내/회외 주축이 y축에 모여 있지만 95% 신뢰영역을 포함하는 경우도 있고 그렇지 못한 경우도 있다. 또한 주관절이 신전되었을 때 회내/회외 주축이 y축과 더 가깝게 분포하는 것을 볼 수 있다.

Table 3. The statistic of pronation/supination axes of rotation

Type of motion(A)		Passive			Active		
Angle between fore and lowerarm(B)		Flexion	Neutral	Extension	Flexion	Neutral	Extension
s_1	y_f	$\pm \hat{\mu}$ (-.064 -.974 .217)	$\pm \hat{\mu}$ (.0171 -.990 .141)	$\pm \hat{\mu}$ (-.043 -.993 .114)	$\pm \hat{\mu}$ (-.063 -.985 .163)	$\pm \hat{\mu}$ (-.100 -.973 .208)	$\pm \hat{\mu}$ (-.025 -.990 .140)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.045, 4.51°	$\hat{\sigma}, \gamma$.043, 4.28	$\hat{\sigma}, \gamma$.470, 4.66	$\hat{\sigma}, \gamma$.055, 5.49	$\hat{\sigma}, \gamma$.045, 4.44	$\hat{\sigma}, \gamma$.040, 3.94
		$F(p)$ 13.97(.000)	$F(p)$ 7.30(.000)	$F(p)$ 4.25(.016)	$F(p)$ 5.61(.004)	$F(p)$ 16.22(.000)	$F(p)$ 7.63(.000)
s_1	y_u	$\pm \hat{\mu}$ (-.181 .979 .099)	$\pm \hat{\mu}$ (-.147 .984 -.103)	$\pm \hat{\mu}$ (-.087 .992 .087)	$\pm \hat{\mu}$ (-.176 .977 -.121)	$\pm \hat{\mu}$ (-.176 .978 -.112)	$\pm \hat{\mu}$ (-.085 .995 -.052)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.049, 4.85	$\hat{\sigma}, \gamma$.041, 4.01	$\hat{\sigma}, \gamma$.048, 4.73	$\hat{\sigma}, \gamma$.054, 5.33	$\hat{\sigma}, \gamma$.045, 4.43	$\hat{\sigma}, \gamma$.042, 4.19
		$F(p)$ 12.46(.000)	$F(p)$ 13.60(.000)	$F(p)$ 4.50(.013)	$F(p)$ 10.23(.000)	$F(p)$ 13.69(.000)	$F(p)$ 3.66(.028)
s_1	y_r	$\pm \hat{\mu}$ (.223 .974 .053)	$\pm \hat{\mu}$ (.092 .987 .136)	$\pm \hat{\mu}$ (.173 .977 .127)	$\pm \hat{\mu}$ (.222 .970 .097)	$\pm \hat{\mu}$ (-.226 -.973 -.052)	$\pm \hat{\mu}$ (.172 .980 .095)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.047, 4.64	$\hat{\sigma}, \gamma$.049, 4.91	$\hat{\sigma}, \gamma$.051, 5.08	$\hat{\sigma}, \gamma$.062, 6.13	$\hat{\sigma}, \gamma$.046, 4.57	$\hat{\sigma}, \gamma$.041, 4.02
		$F(p)$ 14.17(.000)	$F(p)$ 7.80(.000)	$F(p)$ 12.18(.000)	$F(p)$ 10.52(.000)	$F(p)$ 16.57(.000)	$F(p)$ 14.49(.000)
s_2	y_f	$\pm \hat{\mu}$ (.026 -.975 .223)	$\pm \hat{\mu}$ (.006 -.991 .133)	$\pm \hat{\mu}$ (-.023 -.994 .108)	$\pm \hat{\mu}$ (-.003 -.992 .130)	$\pm \hat{\mu}$ (.150 .984 -.095)	$\pm \hat{\mu}$ (-.019 .999 .015)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.038, 3.81	$\hat{\sigma}, \gamma$.035, 3.48	$\hat{\sigma}, \gamma$.041, 4.08	$\hat{\sigma}, \gamma$.040, 4.01	$\hat{\sigma}, \gamma$.073, 7.24	$\hat{\sigma}, \gamma$.060, 5.98
		$F(p)$ 20.19(.000)	$F(p)$ 7.55(.000)	$F(p)$ 3.91(.022)	$F(p)$ 6.86(.001)	$F(p)$ 3.84(.024)	$F(p)$.10(.903)
s_2	y_u	$\pm \hat{\mu}$ (-.112 .993 -.047)	$\pm \hat{\mu}$ (-.086 .994 -.064)	$\pm \hat{\mu}$ (.065 -.996 .063)	$\pm \hat{\mu}$ (-.112 .993 -.026)	$\pm \hat{\mu}$ (.136 -.968 .212)	$\pm \hat{\mu}$ (-.011 -.999 .025)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.044, 4.39	$\hat{\sigma}, \gamma$.036, 3.60	$\hat{\sigma}, \gamma$.042, 4.19	$\hat{\sigma}, \gamma$.041, 4.06	$\hat{\sigma}, \gamma$.070, 6.19	$\hat{\sigma}, \gamma$.060, 5.96
		$F(p)$ 4.99(.007)	$F(p)$ 4.78(.009)	$F(p)$ 2.61(.076)	$F(p)$ 5.32(.006)	$F(p)$ 10.02(.000)	$F(p)$.12(.883)
s_2	y_r	$\pm \hat{\mu}$ (.090 .996 .012)	$\pm \hat{\mu}$ (.093 .991 .092)	$\pm \hat{\mu}$ (.136 .983 .124)	$\pm \hat{\mu}$ (.140 .984 .108)	$\pm \hat{\mu}$ (-.304 -.949 -.081)	$\pm \hat{\mu}$ (.097 .964 .248)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.039, 3.87	$\hat{\sigma}, \gamma$.039, 3.88	$\hat{\sigma}, \gamma$.045, 4.42	$\hat{\sigma}, \gamma$.043, 4.23	$\hat{\sigma}, \gamma$.080, 7.99	$\hat{\sigma}, \gamma$.066, 6.53
		$F(p)$ 3.17(.044)	$F(p)$ 6.27(.002)	$F(p)$ 9.75(.000)	$F(p)$ 12.00(.000)	$F(p)$ 12.23(.000)	$F(p)$ 10.94(.000)
s_3	y_f	$\pm \hat{\mu}$ (.024 -.998 .045)	$\pm \hat{\mu}$ (.047 -.992 .120)	$\pm \hat{\mu}$ (-.005 .999 .045)	$\pm \hat{\mu}$ (-.069 -.996 .052)	$\pm \hat{\mu}$ (.005 -.996 .094)	$\pm \hat{\mu}$ (.031 .998 .037)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.036, 3.60	$\hat{\sigma}, \gamma$.034, 3.40	$\hat{\sigma}, \gamma$.037, 3.66	$\hat{\sigma}, \gamma$.052, 5.11	$\hat{\sigma}, \gamma$.055, 5.45	$\hat{\sigma}, \gamma$.061, 6.09
		$F(p)$ 1.25(.289)	$F(p)$ 8.31(.000)	$F(p)$.78(.462)	$F(p)$ 1.43(.244)	$F(p)$ 1.59(.207)	$F(p)$.36(.701)
s_3	y_u	$\pm \hat{\mu}$ (-.068 .998 -.007)	$\pm \hat{\mu}$ (-.110 .992 .056)	$\pm \hat{\mu}$ (-.054 .998 .017)	$\pm \hat{\mu}$ (.094 -.988 .124)	$\pm \hat{\mu}$ (-.149 .988 .047)	$\pm \hat{\mu}$ (-.068 -.997 .033)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.035, 3.46	$\hat{\sigma}, \gamma$.034, 3.34	$\hat{\sigma}, \gamma$.037, 3.70	$\hat{\sigma}, \gamma$.050, 4.94	$\hat{\sigma}, \gamma$.052, 5.14	$\hat{\sigma}, \gamma$.061, 6.03
		$F(p)$ 2.41(.093)	$F(p)$ 7.85(.000)	$F(p)$ 1.26(.285)	$F(p)$ 4.79(.009)	$F(p)$ 5.07(.007)	$F(p)$.92(.402)
s_3	y_r	$\pm \hat{\mu}$ (.140 .969 .204)	$\pm \hat{\mu}$ (.101 .984 .145)	$\pm \hat{\mu}$ (.135 .938 .320)	$\pm \hat{\mu}$ (.238 .948 .213)	$\pm \hat{\mu}$ (.136 .970 .203)	$\pm \hat{\mu}$ (.179 .934 .309)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.039, 3.90	$\hat{\sigma}, \gamma$.034, 3.41	$\hat{\sigma}, \gamma$.040, 3.99	$\hat{\sigma}, \gamma$.059, 5.86	$\hat{\sigma}, \gamma$.053, 5.24	$\hat{\sigma}, \gamma$.062, 6.20
		$F(p)$ 25.62(.000)	$F(p)$ 15.60(.000)	$F(p)$ 42.54(.000)	$F(p)$ 15.00(.000)	$F(p)$ 10.96(.000)	$F(p)$ 18.39(.000)
s_4	y_f	$\pm \hat{\mu}$ (.052 -.995 .089)	$\pm \hat{\mu}$ (.014 -.988 .152)	$\pm \hat{\mu}$ (-.003 .991 -.134)	$\pm \hat{\mu}$ (.006 -.992 .123)	$\pm \hat{\mu}$ (-.015 -.992 .127)	$\pm \hat{\mu}$ (-.044 -.996 .074)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.040, 3.92	$\hat{\sigma}, \gamma$.037, 3.65	$\hat{\sigma}, \gamma$.044, 4.36	$\hat{\sigma}, \gamma$.044, 4.40	$\hat{\sigma}, \gamma$.044, 4.41	$\hat{\sigma}, \gamma$.046, 4.61
		$F(p)$ 3.86(.023)	$F(p)$ 10.07(.000)	$F(p)$ 5.72(.004)	$F(p)$ 4.17(.017)	$F(p)$ 4.62(.011)	$F(p)$ 2.09(.127)
s_4	y_u	$\pm \hat{\mu}$ (-.086 .996 -.014)	$\pm \hat{\mu}$ (-.124 .992 .004)	$\pm \hat{\mu}$ (-.078 .995 -.062)	$\pm \hat{\mu}$ (-.114 .993 -.033)	$\pm \hat{\mu}$ (-.183 .979 -.086)	$\pm \hat{\mu}$ (.039 -.997 .062)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.039, 3.87	$\hat{\sigma}, \gamma$.037, 3.65	$\hat{\sigma}, \gamma$.046, 4.52	$\hat{\sigma}, \gamma$.044, 4.36	$\hat{\sigma}, \gamma$.043, 4.24	$\hat{\sigma}, \gamma$.045, 4.45
		$F(p)$ 2.78(.064)	$F(p)$ 6.53(.001)	$F(p)$ 3.07(.0486)	$F(p)$ 3.99(.020)	$F(p)$ 13.29(.000)	$F(p)$ 1.48(.231)
s_4	y_r	$\pm \hat{\mu}$ (.122 .978 .167)	$\pm \hat{\mu}$ (.139 .986 .095)	$\pm \hat{\mu}$ (-.102 -.991 -.085)	$\pm \hat{\mu}$ (.167 .981 .103)	$\pm \hat{\mu}$ (.167 .981 .096)	$\pm \hat{\mu}$ (.172 .972 .163)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.045, 4.46	$\hat{\sigma}, \gamma$.040, 3.97	$\hat{\sigma}, \gamma$.046, 4.57	$\hat{\sigma}, \gamma$.048, 4.79	$\hat{\sigma}, \gamma$.050, 4.98	$\hat{\sigma}, \gamma$.049, 4.83
		$F(p)$ 13.09(.000)	$F(p)$ 11.50(.000)	$F(p)$ 5.44(.005)	$F(p)$ 10.50(.000)	$F(p)$ 8.88(.000)	$F(p)$ 14.07(.000)
s_5	y_f	$\pm \hat{\mu}$ (-.078 .990 -.121)	$\pm \hat{\mu}$ (-.102 .993 -.056)	$\pm \hat{\mu}$ (.050 -.998 -.004)	$\pm \hat{\mu}$ (.047 .999 -.019)	$\pm \hat{\mu}$ (-.005 .994 -.110)	$\pm \hat{\mu}$ (-.077 .997 -.032)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.044, 4.37	$\hat{\sigma}, \gamma$.050, 4.97	$\hat{\sigma}, \gamma$.043, 4.25	$\hat{\sigma}, \gamma$.064, 6.40	$\hat{\sigma}, \gamma$.059, 5.83	$\hat{\sigma}, \gamma$.054, 5.35
		$F(p)$ 6.08(.002)	$F(p)$ 3.85(.023)	$F(p)$.76(.472)	$F(p)$.46(.632)	$F(p)$ 2.48(.087)	$F(p)$ 1.39(.252)
s_5	y_u	$\pm \hat{\mu}$ (.084 -.989 -.125)	$\pm \hat{\mu}$ (.062 -.996 -.070)	$\pm \hat{\mu}$ (-.054 .995 .089)	$\pm \hat{\mu}$ (-.084 .995 -.052)	$\pm \hat{\mu}$ (.146 -.989 -.031)	$\pm \hat{\mu}$ (.027 -.998 -.054)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.045, 4.50	$\hat{\sigma}, \gamma$.052, 5.19	$\hat{\sigma}, \gamma$.042, 4.15	$\hat{\sigma}, \gamma$.060, 5.99	$\hat{\sigma}, \gamma$.059, 5.82	$\hat{\sigma}, \gamma$.055, 5.49
		$F(p)$ 6.02(.003)	$F(p)$ 2.11(.124)	$F(p)$ 3.48(.033)	$F(p)$ 1.83(.165)	$F(p)$ 4.29(.015)	$F(p)$.71(.496)
s_5	y_r	$\pm \hat{\mu}$ (-.058 -.981 -.187)	$\pm \hat{\mu}$ (-.005 -.978 -.209)	$\pm \hat{\mu}$ (.064 .964 .260)	$\pm \hat{\mu}$ (.199 .951 .238)	$\pm \hat{\mu}$ (-.120 -.979 -.165)	$\pm \hat{\mu}$ (.052 .975 .218)
		$\hat{\sigma}, \gamma$.044, 4.39	$\hat{\sigma}, \gamma$.052, 5.19	$\hat{\sigma}, \gamma$.043, 4.29	$\hat{\sigma}, \gamma$.067, 6.68	$\hat{\sigma}, \gamma$.058, 5.80	$\hat{\sigma}, \gamma$.054, 5.36
		$F(p)$ 11.52(.000)	$F(p)$ 11.14(.000)	$F(p)$ 22.38(.000)	$F(p)$ 15.57(.000)	$F(p)$ 8.53(.000)	$F(p)$ 9.72(.000)

Note. s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 = subjects; z_f = forearm coordinates; z_u = ulna coordinates; z_r = radius coordinates; $\pm \hat{\mu}$ = principal axis(mean direction); σ = spherical standard error; γ = semi-vertical angle of 95% confidence cone; $F(p)$ = test statistic(sig. p); ■ = not significant.

<Figure 4>, <Figure 5>는 임의의 피험자 한 명에 대한 것이며 수동운동(a)과 능동운동(b)을 같이 나타냈다. 두 그래프 모두 수동운동과 능동운동의 주축 신뢰영역이 서로 겹치고 있어 수동운동과 능동운동의 결과는 차이가 없어 보인다.

<Table 2>는 모든 피험자 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 에 대한 전완의

회내, 중립, 회외인 조건에서 굴곡/신전 순간회전축들의 주축추정값 $\hat{\mu}$, 구형표준오차추정값 $\hat{\sigma}$, 신뢰영역의 원뿔(cone)과 중심의 주축이 이루는 각도 γ , 그리고 각각의 주축추정값이 z_{opt1} , z_{opt2} 축과 일치하는가에 대한 검정통계량 F 값과 유의확률 p , 아이젠값 τ 와 표본수 n 을 나타낸 것이다(수동운동과 능동운

Table 4. ANOVA for flexion/extension axes of rotation

Type of motion(A) Forearm long axis angle(B)	Passive			Active		
	Pronation	Neutral	Supination	Pronation	Neutral	Supination
s_1	.6391 (137)	.6691 (144)	.6870 (127)	.6918 (116)	.6837 (104)	.7557 (130)
s_2	.7289 (114)	.7793 (107)	.7958 (108)	.7399 (108)	.7544 (111)	.8362 (101)
$\tau(n)$ s_3	.7503 (111)	.7004 (103)	.7912 (116)	.7780 (82)	.7958 (88)	.8512 (95)
s_4	.7169 (95)	.7329 (99)	.7767 (109)	.7102 (94)	.7278 (90)	.7775 (101)
s_5	.7337 (104)	.7884 (94)	.7627 (105)	.6698 (96)	.7285 (87)	.7057 (89)

Repeated measures ANOVA
 $F_{A \times B} = .932(.433)$
 $F_A = .234(.654)$
 $F_B = 11.001(.005)$ (pronation neutral supination)

Note. $\tau(n)$ = eigenvalue(sample number); s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 = subjects.

Table 5. ANOVA for pronation/supination axes of rotation

Type of motion(A) Angle between fore and lowerarm(B)	Passive			Active		
	Flexion	Neutral	Extension	Flexion	Neutral	Extension
s_1	.8166 (76)	.8491 (82)	.7992 (84)	.7618 (79)	.8193 (76)	.8549 (73)
s_2	.8155 (100)	.8292 (99)	.8005 (92)	.8401 (88)	.6905 (83)	.7109 (84)
$\tau(n)$ s_3	.8461 (100)	.8561 (99)	.7996 (97)	.7692 (67)	.7247 (88)	.6980 (86)
s_4	.8190 (93)	.8425 (91)	.7933 (97)	.8039 (81)	.8072 (84)	.7847 (88)
s_5	.7704 (101)	.7646 (96)	.7978 (85)	.7407 (69)	.7573 (76)	.7675 (72)

Repeated measures ANOVA
 $F_{A \times B} = .931(.433)$
 $F_A = 6.287(.066)$
 $F_B = .525(.611)$

Note. $\tau(n)$ = eigenvalue(sample number); s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 = subjects.

동). 그리고 운동형태요인(A)과 전완장축각도요인(B)의 회전축 차이에 대한 반복측정분산분석 결과가 <Table 4>에 나타나 있다. <Table 2>를 보면 추정된 주축들의 z 축 성분이 크게 나타나 z 축과 거의 평행하게 놓여 있음을 알 수 있다. 이러한 주축들은 상완골좌표계 z_{opt1} 과 z_{opt2} 축과 대부분 일치하지 않는 것으로 나타났다($p < .05$). 일치하는 경우는 ($p > .05$) 음영으로 표시하였는데 z_{opt1} 축과 일치하는 경우는 유일하게 피험자 S_3 에서 수동의 중립, 회외, 능동의 회내, 중립이며 나머지 피험자는 전혀 일치하지 않는 것으로 나타났다. z_{opt2} 축의 경우는 s_2 를 제외한 모든 피험자에서 약간 일치하는 결과를 보이고 있다.

<Table 3>은 주관절의 굴곡, 중립, 신전 처리조건에서 회내/

회외 순간회전축의 표본수, 통계량 그리고 주축추정값이 y_f, y_u, y_r 축과 일치하는가에 대한 검정통계량과 유의확률이 나타나 있다. 그리고 운동형태요인(A)과 전/상완각도요인(B)의 회전축 차이에 대한 반복측정분산분석 결과가 <Table 5>에 나타나 있다. <Table 3>을 보면 추정된 주축들의 y 축 성분이 크게 나타나 좌표계의 y 축과 거의 평행하게 놓여 있음을 알 수 있다. 그러나 주축들은 전완좌표계, 척골좌표계, 요골좌표계의 y_f, y_u, y_r 축과 대부분 일치하지 않는 것으로 나타났다($p < .05$). 일치하는 경우는($p > .05$) 음영으로 표시하였다. 세부적인 결과를 살펴 보면 요골좌표계의 y_r 과 일치하는 경우는 전혀 없었으며, 전완좌표계와 척골좌표계는 피험자, 운동형태, 전/상완각도를 전체적으로 모두 고려했을 때 각각 11번의 일치를 나타내 비슷한 결과를 보이고 있다. 특히, 신전상태에서 회내/회외회전축과 좌표계축과 가장 많은 일치를 보이고 있다.

운동형태요인과 전완장축각도요인 반복측정분산분석 결과 두 요인의 교호작용효과는 없는 것으로 나타났으며($F = .932, p = .433$), 운동형태간의 차이도 없는 것으로 나타났다($F = .234, p = .654$). 그러나 전완장축각도간의 굴곡/신전 주축은 차이가 있는 것으로 나타나($F = 11.001, p = .005$) 회내/회외각도가 굴곡/신전운동에 영향을 미쳤음을 알 수 있다 (Table 4).

운동형태(A)와 전/상완각도(B)의 회내/회외회전축 차이에 대한 반복측정분산분석 결과는 두 요인의 교호작용이 없었으며 ($F = .931, p = .433$), 주효과 또한 각각 $F = 6.287$ ($p = .066$), $F = .525$ ($p = .611$)로 없는 것으로 나타났다 (Table 5).

IV. 논의

인체운동의 역학적 분석에서 좌표계는 아주 중요하다. 좌표계의 설정이 잘못되었을 경우 전혀 다른 운동의 결과가 나타날 수 있기 때문에 타당한 좌표계의 수립이 올바른 인체운동의 해석에 있어 필수조건이다. 본 연구에서는 생체역학에서 많이 사용되는 인체의 상지분절 지역좌표계의 타당성에 대해서 통계적 방법을 이용하여 검증하였다. 마커로 정의된 좌표계 축은 관성주축(principal axis of inertia)으로 해부학적 회전축이라 가정하는데 이 축과 운동학적 회전축이 일치하는가에 대한 본 연구의 검정결과 대부분 일치하지 않는 것으로 나타났다. 마커에 의해서 정의된 축은 분절의 정확한 관성주축이 아니기 때문일 수 있으며, 마커의 움직임에 따른 결과일 수도 있다. 또한 두 분절의 접촉면인 관절의 구조가 복잡하기 때문일 수도 있다. 관성주축과 좌표계축이 다른 경우는 해석의 어려움뿐만 아니라

운동역학적(kinetic) 분석에 있어서도 복잡하기 때문에 보정을 해주는 것이 좋을 것이다.

상관좌표계 z_{opt2} 는 상완의 마커만 가지고 정의한 z_{opt1} 과는 달리 전완의 마커를 같이 이용하였기 때문에 z_{opt1} 에서 발생하기 쉬운 오차를 완화한 것이라 할 수 있다. 따라서 z_{opt2} 는 상완과 전완의 위치뿐만 아니라 전완의 방향(orientation)에 의해서도 영향을 받는다. 그러므로 주관절이 90° 관상면(sagittal plane)에서 굴곡되고, 전완이 완전히 회내된 상태에서 정의되어야 한다고 하였다(Wu et al., 2005). 또한 전완마커의 정보가 있다면 z_{opt2} 를 사용하고, 그렇지 않으면 z_{opt1} 을 사용할 것을 권장하고 있다. 본 연구에서는 s_3 를 고려하더라도 z_{opt1} 는 4번, z_{opt2} 는 10번의 일치된 결과를 보였기 때문에 z_{opt2} 의 상관좌표계가 타당하며 이것을 굴곡/신전 회전축으로 사용하는 것이 좋을 것이다. 그러나 주관절이 완전 신전되어 상완과 전완이 거의 일직선을 이루는 극단적인 상황에서 z_{opt2} 축은 정의되지 않을 수 있다.

전완의 경우 요골좌표계는 연구결과로 볼 때 회내/회외운동을 다루는데 있어 타당도가 아주 떨어지는 좌표계라 할 수 있으므로 사용해서는 안된다. 반면 전완좌표계와 척골좌표계는 요골좌표계보다 타당도에 있어서 약간 우위에 있다고 할 수 있다. 전완좌표계와 척골좌표계는 모두 동일한 y 축을 가지고 있으나 나머지 축을 정의하는데 있어 차이가 나타난다. 즉, 전완좌표계는 x 축을 정의하는데 EL, EM, RS, US를 이용하지만 척골좌표계는 RS를 이용하지 않고 EL, EM, US만 이용하기 때문이다. 따라서 표준오차가 달라져 추정의 효율성(accuracy)에 있어서도 차이가 난다. 그러나 결과를 보면 피험자, 운동형태, 전/상완각도를 모두 고려했을 때 두 경우 11번의 일치를 보였기 때문에 타당도 있어서 두 좌표계는 차이가 없다고 할 수 있다.

본 연구의 대상인 주관절은 회전자유도가 두 개인 모형으로 가정했다. 주관절은 굴곡/신전과 내전/외전이 독립적으로 발생할 수 있는 구조를 가진 것으로 일반적으로 알려져 있다 (Neumann, 2002). 그러나 마커를 가지고 주관절 동작분석을 수행할 경우 두 회전운동이 독립적인가에 대해서는 문제를 제기할 수 있겠다. 골격계보다는 근육과 피부 등을 포함한 전체적인 생체분절의 관점에서 보았을 때 결과는 달리 나타날 수 있기 때문이다. 또한 주관절 구조는 상완골의 활차(trochlea)가 소두(capitulum)보다 더 원위쪽으로 뻗어서 나타나는 윤반각이 존재할 수 있는데, Zampagni et al.(2008)의 연구에서 약 154°의 굴곡각도를 이를 때 약 $12.42 \pm 4.06^\circ$ (상완의 연장선과의 각도)의 윤반각이 측정되었다. 만일 이 각도가 심각하게 나타나면 운동학적 회전축은 달라질 수 있다. 근육, 피부의 움직임과 주관절 구조에 의한 윤반각 때문에 두 회전운동 주축이 비직교하는가에 대한 물음은 본 연구를 통해 충분한 답을 얻을 수 없

었다. 전완장축각도는 굴곡/신전회전축에 영향을 주었지만 ($F=11.001, p=.005$), 전/상완각도는 회내/회외회전축에 영향이 미치지 않았기($F=.525, p=.611$) 때문이다. 또한 이 분산분석은 근사적 방법이기 때문에 더욱 그러하다. 그러므로 굴곡/신전운동이 이루어질 때, 전완이 회외되었을 경우는 윤반각으로 인하여 완전한 굴곡/신전운동이 이루어지지 못하기 때문에 두 개의 회전축은 직교하지 않으며(Table 2의 반복측정분산분석 사후검정), 회내/회외운동이 이루어질 때는 두 개의 회전축은 직교한다고 잠정적으로 결론을 지을 수도 있을 것이다. 따라서 굴곡/신전과 회내/회외의 두 평균방향이 거의(nearly) 수직하다는 Veeger et al.(1997)의 기술적(descriptive) 결론과, 주관절 굴곡운동을 MRI로 촬영하였을 때 회전축이 횡단면(axial plane)에서 평균 11.02° ($5.67 - 17.23^\circ$), 관상면(coronal plane)에서 평균 $11.95 - 19.4^\circ$ 벗어나 있음을 보고하면서 굴곡/신전축이 단일회전축이 아니라 결론지은 Goto et al.(2004)의 상반된 두 연구결과를 모두 만족한다고 할 수도 있겠다. 사실 기술적으로 거의 수직한다는 의미는 통계적으로 수직하지 않을 수도 있기 때문이다. 두 회전운동이 비직교한다는 것은 주관절의 일반운동(general motion)에서 회전축이 '0'이 아닌 세 개의 성분을 가지는 것을 의미한다. 특히, 주관절이 신전되고 회외 되었을 때 두 운동은 동시에 존재한다. 전후축 회전인 윤반각 때문이다. 이러한 상황이 많은 경우의 운동이라면 모형에 세 개의 회전자유도를 고려하여 분석하는 것이 반드시 필요하다. 그러나 스포츠활동을 포함한 일반적 운동에서 굴곡/신전의 범위는 $30^\circ \sim 130^\circ$, 내전/외전의 범위는 $-50^\circ \sim 50^\circ$ (Nordin & Frankel, 2001)에서 이루어지므로 윤반각은 무시하고 운동분석을 수행할 수도 있을 것이다.

선행연구(Cutti et al., 2006; Veeger et al., 1997)의 사체분석은 자발적운동을 할 수 없기 때문에 수동운동을 하였다. 사체에 의한 연구는 잘 통제된 상태에서 실험을 수행하기 때문에 내적타당도는 클 수 있으나 관절구조를 무시한 강제적운동을 발생시킬 가능성이 있다. 본 연구에서는 생체에서의 수동운동과 능동운동 비교를 수행하였으며 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 외부마커를 이용한 영상분석 시스템으로는 두 운동 간 차이를 밝히는 것은 불가능하다고 할 수 있겠다. 또는 생체의 수동운동과 능동운동은 원래부터 차이가 없을 수도 있다.

본 연구에서는 주관절의 부상경험이 없고 젊기 때문에 수동운동과 능동운동의 가동범위에 차이가 없을 것이라 가정하였다. 그러나 연령에 따라 관절구조는 달라질 수 있을 것이다(van Andel et al., 2008). Kontaxis, Cutti, Johnson, 과 Veeger(2009)는 마커를 가지고 실제 관절 회전운동을 해석하기에는 무리가 있으며 관절회전축은 대략적인 추정값이기 때문에 기능좌표계(functional coordinates)를 이용해야 한다고 주장하였다. 이는 굴곡/신전 회전축의 평균축과 마커에 의한 장축과의 조합으로 좌표계를 구성하게 된다. 스포츠 활동 상황에서 하나의 기준으로

축을 구한다는 것은 여전히 연구문제로 남아 있을 수 있겠지만 현재로서는 이 방법을 고려해 보는 것도 좋은 것이다. 그리고 아이젠값은 순간회전축들의 퍼짐의 정도와 주축방향에 대한 대략적 정보를 포함하고 있지만 아이젠값을 가지고 차이검정을 수행한 본 연구의 분석방법이 타당한가에 대한 이론적 검증도 필요하다.

V. 결론 및 제언

본 연구는 두 개의 회전자유도가 있는 것으로 가정한 주관절에서 순수한 굴곡/신전, 회내/회외운동을 수행하였을 때 순간회전축들의 평균방향이 전완과 상완좌표계의 해당 축과 일치하는가와 두 회전운동이 상호작용하고 있는가에 대해 운동학적 자료로서 통계적 가설검정을 수행한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

굴곡/신전과 회내/회외 모두 수동운동과 능동운동은 차이가 없는 것으로 나타났으며, 두 회전운동의 주축이 해당좌표계의 축과 대부분 일치하지 않아 타당도가 대체로 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 굴곡/신전의 운동에서는 상완골좌표계 옵션2를, 회내/회외 운동에서는 전완좌표계와 척골좌표계를 사용하는 것이 그나마 타당한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 전완장축각도는 굴곡/신전회전운동에 영향을 주지만, 전/상완각도는 회내/회외회전운동에 영향을 주지 않는다.

본 연구에서는 두 회전운동간의 상호관련성을 알아보기 위해서 하나의 회전운동을 세 개의 수준으로 나누어 분석하였다. 그러나 더욱 타당한 연구가 되기 위해서는 두 개의 회전운동이 동시에 일어나는 상황에서 관련성을 찾아낼 수 있는 실험설계가 요구된다.

참고문헌

- 김진욱(2009). 방향통계학을 이용한 슬관절 회전축자료의 분석. *한국체육학회지*, 48, 615-623.
- Campbell, A. C., Lloyd, D. G., Alderson, J. A., & Elliott, B. C.(2009). MRI development and validation of two new predictive methods of glenohumeral joint center location identification and comparison with established techniques. *Journal of Biomechanics*, 42, 1527-1532.
- Challis, J. H.(1995). A procedure for determining rigid body transformation parameters. *Journal of Biomechanics*, 28, 733-737.
- Cutti, A. G., Garofalo, P., Davalli, A., & Cappello, A.(2006). How accurate is the estimation of elbow kinematics using ISB recommended joint coordinate systems? *Gait & Posture*, 24s, s36-s37.
- Figueiredo, A.(2006). Two-way analysis of variance for data from a concentrated bipolar Watson distribution. *Journal of Applied Statistics*, 33, 575-581.
- Fisher, N. I., Lewis, T., & Embleton, B. J. J.(1993). *Statistical analysis of spherical data*. New York, NY : Cambridge University Press.
- Goto, A., Moritomo, H., Murase, T., Oka, K., Sugamoto, K., Arimura, T., Nakajima, Y., Yamazaki, T., Sato, Y., Tamura, S., Yoshikawa, H., & Ochi, T.(2004). In vivo elbow biomechanical analysis during flexion : Three dimensional motion analysis using magnetic resonance imaging. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 13, 441-447.
- Greenwood, D. T.(2003). *Advanced dynamics*. New York, NY : Cambridge University Press.
- Kontaxis, A., Cutti, A. G., Johnson, G. R., & Veeger, H. E. J.(2009). A framework for the definition of standardized protocols for measuring upper-extremity kinematics. *Clinical Biomechanics*, 24, 246-253.
- Mardia, K. V., & Jupp, P.(2000) *Directional statistics* (2nd edition). West Sussex, England : John Wiley and Sons Ltd.
- Meskers, C. G. M., van der Helm, F. C. T., Rozendaal, L. A., & Rozing, P. M.(1998). In vivo estimation of glenohumeral joint rotation center from scapular bony landmarks by linear regression. *Journal of Biomechanics*, 31, 93-96.
- Neumann, D. A.(2002). *Kinesiology of the musculoskeletal system : Foundations for physical rehabilitation*. St. Louis, MO : Mosby, Inc.
- Nordin, M., & Frankel, V. H.(2001). *Basic biomechanics of the musculoskeletal system* (3rd ed.). Lippincott & Williams Publisher.
- Prokopenko, R. A., Frolov, A. A., Biryukova, E. V., & Robi-Brami, A.(2001). Assessment of the accuracy of a human arm model with seven degrees of freedom. *Journal of Biomechanics*, 34, 177-185.
- Söderkvist, I., & Wedin, P.(1993). Determining the movements of the skeleton using well-configured markers. *Journal of Biomechanics*, 26, 1473-1477.
- Spoor, C. W., & Veldpaus, F. E.(1980). Rigid body motion calculated from spatial coordinate of markers. *Journal of*

Biomechanics, 13, 391-393.

- Stephens, M. A.(1982). Use of the von Mises distribution to analyse continuous proportions. *Biometrika*, 69, 197-203.
- van Andel, C. J., Wolterbeck, N., Doorenbosch, C. A. M., Veeger, H. E. J., & Harlaar, J.(2008). Complete 3D kinematics of upper extremity functional tasks. *Gait & Posture*, 27, 120-127.
- Veeger, H. E. J., Yu, B., An, K. N., & Rozendal, R. H.(1997). Parameters for modeling the upper extremity. *Journal of Biomechanics*, 30, 647-652.
- Woltring, H. J.(1990). Data processing and error analysis. In N. Berme, & A. Cappozzo (Eds.), *Biomechanics of human movement : Applications in rehabilitation, Sport and Ergonomics*, 203-237. Washington, OH : Bertec Corporation.
- Wu, G., van der Helm, F. C. T., Veeger, H. E. J., Makhsous, M., Roy, P. V., Anglin, C., Nagels, J., Karduna, A. R., McQuade, K., Wang, X., Werner, F. W., & Buchholz, B.(2005). ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion - part II : shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*, 38, 981-992.
- Zampagni, M. L., Casino, D., Martelli, S., Visani, A., & Marcacci, M.(2008). A protocol for clinical evaluation of the carrying angle of the elbow by anatomic landmarks. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 17, 106-112.