



실험 데이터를 이용한 회전운동 순간 중심점 분석 프로그램 개발(I)

Development of a Program That Computes the Position of the Instantaneous Center of Rotation on the Basis of Experimental Data(I)

박진*(서울여자대학교) · 신기훈(서울산업대학교)

Park, Jin*(Seoul Women's University) · Shin, Ki-Hoon(Seoul National University of Technology)

국문요약

본 연구의 목적은 원위지점에서 움직이는 실험 데이터를 이용하여 그 점들의 회전운동 순간 중심점을 분석하는 프로그램(Centering 1.0)을 개발하는 것이다. 이를 위해 수학적 알고리즘을 정의하고, 물체의 운동에 대한 실험 데이터를 입력하여 회전운동 순간 중심점을 찾아내는 컴퓨터 프로그램을 구현하였다. 프로그램을 검증하기 위한 실험 데이터는 한명의 숙련된 여성골퍼의 피칭(40m 캐리)과 퍼팅(4m) 스트로크 시 클럽의 움직임으로 수집하였다. 그리고 이 데이터를 본 연구를 통해 개발된 회전운동 순간 중심점 분석 프로그램에 적용하여 클럽의 움직임 시 회전의 중심점을 찾고, 그 위치의 크기를 반지름으로 나타내었다. Centering 1.0 프로그램은 구간을 크게 정의할 때 반지름의 오차가 약간 있었으나, 구간을 작게 나눌수록 매우 근사치의 값을 제시해주었다. 피칭과 퍼팅을 비교 할 경우에 피칭의 반지름이 퍼팅보다 매우 작게 나타났으며, 퍼팅의 경우 중심의 위치는 인체 내에 있지 않고 최고 3m 외부에 위치하는 것으로 나타났다. Centering 1.0 프로그램은 회전운동에서 구한 데이터의 최소 3개만 입력하면 반지름 값을 알 수 있으며, 이것이 누적되면 회전운동 순간 중심점의 이동경로를 알 수 있다.

ABSTRACT

J. PARK, and K. H. SHIN, Development of a Program That Computes the Position of the Instantaneous Center of Rotation on the Basis of Experimental Data(I). Korean Journal of Sport Biomechanics, Vol. 19, No. 4, pp. 779-791, 2009. The purpose of this study is to develop a program that computes the position of the instantaneous center of rotation while an object moves in a circular motion. For this study, a mathematical algorithm was developed and implemented on the experimental data. Data for pitching (40 m carry) and putting (4 m) strokes were obtained from a skilled female golfer. A computer program (Centering 1.0) calculated the experimental data and found the radius of the instantaneous center of rotation. When the data were taken broadly, the program produced an error distance of radius. When the data were divided gradually, the program produced a very close instantaneous center of rotation. On comparing pitching and putting strokes, putting was found to have a greater radius than pitching. The instantaneous centers of rotation of putting were not in the golfer's body rather, they were 3 m away from the club head. The Centering 1.0 program can calculate the instantaneous center of rotation with at least three sets of experimental data.

KEYWORDS : RADIUS, INSTANTANEOUS CENTER OF ROTATION, EXPERIMENTAL DATA, ALGORITHM,

이 논문은 2009학년도 서울여자대학교 교내학술특별연구비의 지원을 받았음.

*Corresponding Author : 박진

서울특별시 노원구 공릉동 126 서울여자대학교 자연과학대학 체육학과

Tel : 02-952-7333 / Fax : 02-970-5980

E-mail : jpark@swu.ac.kr

I. 서론

19C 후반 처음으로 사진이 선수의 동작분석에 활용된 이후 영상장비는 인체움직임의 연구에 필수 불가결한 요소가 되었다. 초기에 사용된 사진분석법은 2차원분석의 범주를 벗어나지 못했다. 그러나 인간의 활동이 공간 상에서 이루어지는 만큼 3차원분석의 필요성이 제기되었으며, 1970년대에 들어서서 공간에서의 분석방법이 다양하게 시도되었다. 그 중에서도 Abdel-Aziz와 Karara(1971)가 발표한 DLT(direct linear transformation) 방식은 카메라의 설치 상 제약이 없을 뿐 아니라 설치 변인을 측정할 필요가 없는 획기적인 방법이었다(성낙준 등, 1987). DLT 방식의 개발로 3차원 공간에서 일어나는 움직임을 대부분 분석이 가능하게 되었고, 현재는 실시간으로 움직임을 분석할 수 있는 경지까지 다다르게 되었다.

영상장비를 이용하여 인체의 움직임을 분석하기 위해서는 관절에 마커(marker)를 부착한 후 그 지점의 운동학적 위치(kinematical position)를 찾고, 찾아낸 위치 데이터와 영상장비의 촬영속도를 근거로 마커지점의 운동학적 변인들 즉, 변위, 속도, 가속도 등을 수학적으로 계산하게 된다. 기구를 이용하는 종목의 경우에도 필요한 지점에 마커를 부착하여 동일한 방법으로 분석이 이루어진다. 마커가 부착되는 관절은 운동의 회전축인 동시에 그 분절의 끝 지점이기도 하다. 영상분석의 차원에서 인체는 이러한 분절 점이 연결되어있는 강체(rigid body)로 인식된다. 이들 강체 분절들은 서로의 중심점을 축으로 회전운동을 하며 최종적으로는 하나의 회전 중심점을 축으로 회전운동을 하게 된다.

Frankel과 Nordin(1980)은 하퇴부위를 고정시킨 상태에서 무릎관절을 굴곡에서 신전시키면 관절 중심점은 운동의 방향과 동일하게 움직이는 것으로 보고하였다. 이들의 연구는 인체의 어느 한 쪽 분절을 고정시킨 상태에서 다른 분절에 움직임을 일으킨다 하더라도 분절 회전 중심점은 이동하고 있음을 입증하였다. 또한 분절의 회전운동을 통한 중심점의 운동방향 예측이 가능함을 보여주었다. 한편 박영훈, 염창홍, 및 서국웅(2007)은 10.94m 퍼팅 스트로크에서 퍼터헤드의 움직임 실험 데이터를 이용하여 수학적으로 회전중심점을 도출해내고,

퍼터의 움직임이 중심이 고정된 진자운동인가에 대한 해답을 구하고자하였다. 이 연구에 의하면 퍼터헤드의 회전중심점은 A-P(anterior-posterior) 방향으로 10cm 범위 내에서 움직임이 일어나고, M-L(medial-lateral) 방향으로는 60cm, S-I(superior-inferior)는 최대 227cm에 위치하는 것으로 보고하였다. 즉, 퍼터헤드의 회전중심점 위치 관점에서 볼 때 퍼팅 동작은 진자운동이 아니라는 결론을 내렸다. 이는 현재 일반적으로 통용되고 있는 퍼팅에 대한 개념을 뒤집는 결과라고 할 수 있다.

Broer(1973)는 그의 저서에서 회전운동을 하는 분절의 순간 중심점(instantaneous center of rotation) 위치가 한 점이 아니라 평탄(flattening)하다면 운동의 결과가 목표를 향할 수 있는 확률은 매우 높을 것으로 예상하였다. 테니스 스트로크에서 라켓 면이 일정 구간을 동일하게 유지하도록 지도한다거나, 퍼팅 스트로크에서 퍼터 면을 퍼트라인에 일정 구간동안 유지시키도록 지도하는 것들 모두 회전운동에서의 정확성을 높이기 위한 방법이라 할 수 있다. 즉, 운동의 결과가 나타나는 원위 점(distal point)의 움직임 데이터를 이용하여 근위 점(proximal point)의 움직임을 알아보는 것은 운동을 지도하는데 매우 유익한 자료를 제공할 것으로 판단된다. 그러나 현재 사용되고 있는 많은 프로그램들은 이러한 정보까지 제공하는데 다소 미흡한 점이 있다. 따라서 본 연구의 목적은 원위 지점에서 움직이는 실험 데이터를 이용하여 그 점들의 회전운동 순간 중심점을 분석하는 프로그램을 개발하는 것이다. 이를 위해 수학적 알고리즘(algorithm)을 정의하고, 물체의 운동에 대한 실험데이터를 입력하여 회전운동 순간 중심점을 찾아내는 컴퓨터 프로그램을 구현한다.

II. 연구방법

실험 데이터를 이용한 회전운동 순간 중심점 분석 프로그램(이하 Centering 1.0) 개발을 위한 수학적 알고리즘은 부록(appendix 1)으로 첨부하였으며, VC++ 및 OpenGL 그래픽 라이브러리를 사용하여 가시화 프로그램을 구현하였다.

1. 회전운동 순간 중심점을 찾기 위한 실험데이터의 수집

본 연구에 활용된 실험 데이터는 골프스윙에서 수집하였다. 피험자는 숙련된 여성 골퍼로서 키 160cm, 인체질량 53kg, 핸디캡 0인 투어프로이다. Motion Master 100 카메라 8대(촬영속도 120fps, 셔터스피드 1/500s)가 설치된 실내실험실에서 로프트가 56도인 클럽을 이용하여, 볼의 이동거리(carry)가 40m인 피칭 스트로크를 10회 실시하였다. 그리고 퍼터를 이용하여 4m 퍼팅 스트로크를 목표지점을 만들어 놓고 10회 실시하였다. 매번 스트로크가 끝난 다음 피험자와 연구자가 3단계 척도의 스트로크 느낌표를 만들어 스윙의 상태를 기록하였다. 20회의 스트로크 중 피칭에서 3회 퍼팅에서 4회 좋은 스윙이었다고 피험자와 연구자가 일치되어 이들 중 피칭과 퍼팅의 각 한 실험(trial)을 연구자가 임의 선택하여 분석하였다.

회전운동 위치좌표를 수집하기 위해 클럽의 페이스 끝(toe) 부분에 마커를 부착하였고, 이 마커의 위치를 Kwon3d xp version(비של)으로 분석한 후 x, y, z 좌표를 생성하였다. 이 때 x 좌표 값은 피험자의 전후(anterior-posterior)방향으로의 움직임, y 좌표 값은 볼의 진행방향(medial-lateral), 그리고 z 좌표 값은 수직 움직임(superior-inferior)이다. 분석을 위한 시점(event)은 어드레스(e1), 백스윙의 끝(e2), 임팩트(e3), 피니시(e4), 스윙 끝(e5)이다. 구간정의는 e1에서 e2는 백스윙(P1), e2에서 e3는 다운스윙(P2), e3에서 e4는 폴로스루(P3)이다. e4에서 e5는 피니시 지점의 안정성을 위하여 실험 시 추가로 설정된 것으로 실험의 분석에서 제외하였다. 헤드의 움직임이 분석된 좌표 값들은 Microsoft Office Excel 2007(엑셀)에 저장하였다.

2. Centering 1.0의 구동

Centering 1.0 프로그램의 구동을 위해서는 엑셀과 메모장 프로그램이 필요하다. 먼저 엑셀에 저장된 위치 데이터 중 필요한 부분을 선택하여 메모장의 두 번째 줄부터 입력한다. 그리고 첫 번째 줄에 각 이벤트 값을 입력하며, 이벤트 사이는 one space의 간격을 둔다(그림 1).

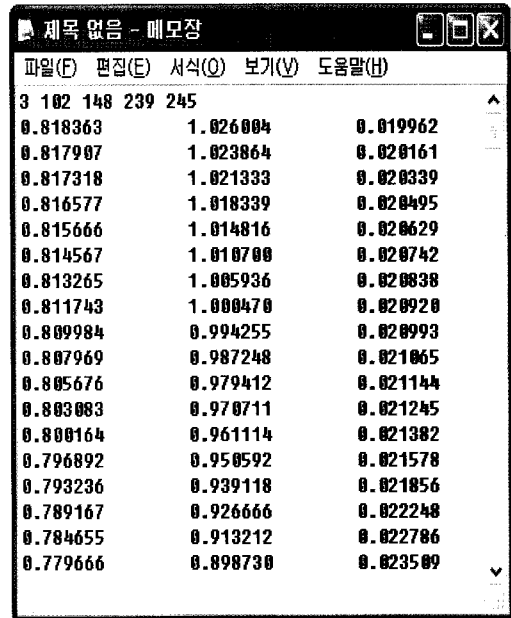


그림 1. 메모장에 입력된 실험결과 엑셀 데이터. 첫 번째 줄은 실험의 이벤트를 의미하며 데이터는 좌측부터 x, y, z이다.

Centering 1.0 프로그램을 더블 클릭하면 두 개의 창이 동시에 생성된다. 좌측 창은 명령어 창이며, 우측 창은 그림 창이다. 그림 창에 커서(화살표)를 화면위에 놓은 다음 "G"키를 선택한다. "뿅"하는 소리음과 함께 명령어 창에 "In put a file name ."이라는 명령어가 생성된다. 이때 마우스를 좌측 창으로 옮겨서 클릭을 하면 명령어 입력 커서가 작동한다. 파일이 생성된 주소를 입력하고 Enter 키를 치면 네 개의 원점을 찾는 방법이 제시된다.

방법 1은 회전의 각을 이용하여 회전운동 순간 중심점을 찾는 것이고, 방법 2는 데이터의 값(최소 3이상 선택해야 함)을 이용하여, 방법 3은 회전운동을 n등분하여, 방법 4는 전체회전만을 보여준다. 방법 1, 2, 3을 선택하면 좌측 창에서는 중심점을 찾는 계산 과정을 나타내고, 우측 창에는 데이터에 의한 클럽헤드의 움직임이 굵은 선으로 표시되며 이를 바탕으로 최적화된 원과 원점이 생성된다. 마우스로 우측 창을 클릭한 다음에 "N"키를 누르면 원과 원점이 처음 선택한 구간만큼 한 개씩 생성되며, "B"키를 누르면 반대로 한 개씩 소멸된다. 이때 원과 원점은 색깔로 구분되어 있다(그림 2).

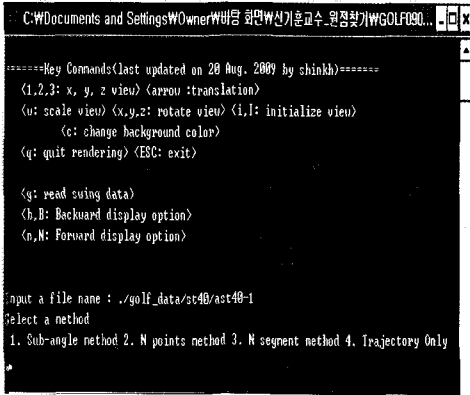


그림 2. Centering 1.0 프로그램 창과 네 개의 방법. 1, 2, 3 방법은 결과 값이 동시에 제공되는 반면에 방법 4는 단지 회전 그림만을 보여준다.

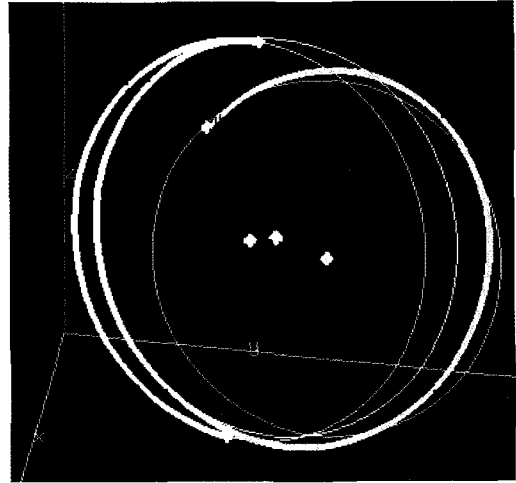


그림 3. 40m 피칭 샷의 구간별 궤도와 각각의 중심점 위치. 굵은 선은 실험결과 데이터 값이며, 가는 선은 데이터 값을 최적화하여 만든 원이다. 중심점은 최적화 한 원의 중심이다. 그리고 적색은 백스윙, 노란색은 다운스윙, 초록색은 폴로스루이다.

3. 자료처리

Centering 1.0 프로그램에 실험데이터 값을 입력하면 최적화된 원을 백스윙, 다운스윙, 폴로스루로 구분하여 계산하며, 이 과정을 통하여 생성되는 새로운 데이터들은 중심점의 좌표 값, 반지름의 길이, 반지름계산 시 오차 값 등이고 메모장에 자동으로 저장된다. OpenGL 그래픽 라이브러리에서 그림으로 나타낼 때 백스윙은 “붉은색”, 다운스윙은 “노란색”, 폴로스루는 “초록색”으로 구분하였고, 메모장에 저장될 때에는 백스윙은 “0”, 다운스윙은 “1”, 폴로스루는 “2”로 하였다. 본 실험에서 생성된 자료 중 전 구간, 1/2, 1/4에 관한 그림과 결과 값은 본문에 제시하였다. 1/8의 그림은 본문에 결과 값은 Appendix 2로 첨부하였고, 1/40은 그림은 본문에 결과 값은 제시하지 않았다.

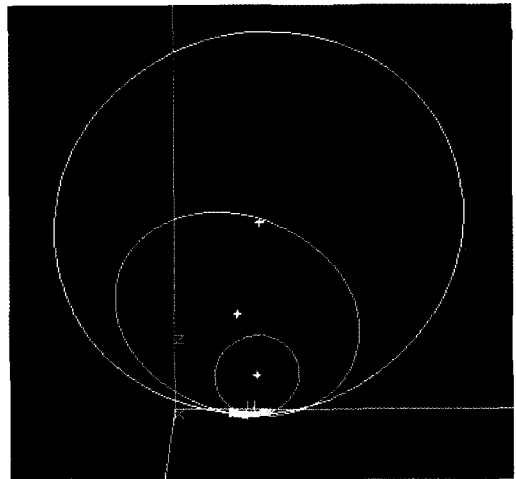


그림 4. 4m 퍼팅의 구간별 궤도와 각 구간의 원점 위치

III. 연구결과 및 논의

수련된 여성골퍼의 40m 피칭 샷과 4m 퍼팅 데이터를 Centering 1.0 프로그램을 이용하여 클럽헤드의 회전 운동 순간 중심점을 찾고, 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 전 구간의 중심점 위치

표 1. 40m 피칭 샷의 클럽이동각도와 원의 반지름, 그리고 최적화 원을 그릴 때 발생하는 오차크기

Initial	Angle (deg)	Radius (cm)	Radius Error(cm)
0	-199.0	105.8	0.6
1	-0.0	102.2	2.2
2	201.7	94.8	5.8

note. 0: backswing(-), 1: downswing, 2:follow-through(+)

표 2. 4m 퍼팅의 클럽이동각도와 원의 반지름, 그리고 최적화 원을 그릴 때 발생하는 오차크기

Initial	Angle (deg)	Radius (cm)	Radius Error(cm)
0	-14.1	181.8	0.0
1	-0.0	299.4	0.0
2	20.2	62.4	0.3

40m 피칭 샷의 구간별 궤도와 각각의 원점 위치는 <그림 3>, <표 1>과 같으며, 퍼팅의 구간별 궤도와 원점 위치는 <그림 4>, <표 2>와 같다.

2 구간을 1/2로 나누었을 때 중심점 위치

40m 피칭 샷을 구간별로 1/2로 나누었을 때 궤도와 각각의 원점 위치는 <그림 5>, <표 3>과 같으며, 퍼팅의 구간별 궤도와 원점 위치는 <그림 6>, <표 4>와 같다.

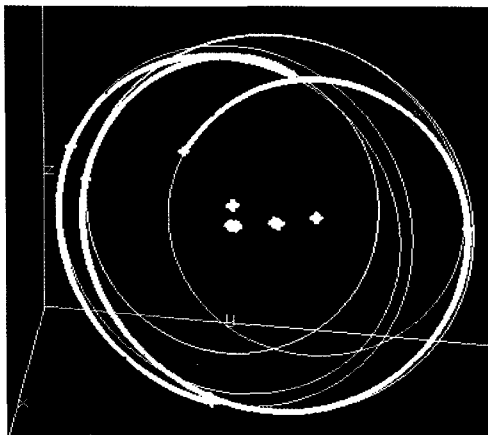


그림 5. 40m 피칭 샷의 구간을 1/2로 구분하여 데이터 처리하였을 때 궤도와 각각의 중심점 위치. 굵은 선은 실험결과 데이터 값이며, 가는 선은 데이터 값을 최적화하여 만든 원이다. 전체 구간을 하나의 원으로 처리한 데이터보다 더 정확하게 실험결과 데이터와 원의 궤도가 일치됨을 보여주고 있다.

표 3. 구간을 1/2로 나누었을 때 40m 피칭 샷의 클럽이동각도와 원의 반지름, 그리고 최적화 원을 그릴 때 발생하는 오차크기

Initial	Angle (deg)	Radius (cm)	Radius Error(cm)
0	-99.5	109.8	0.3
0	-199.0	104.1	0.1
1	-99.6	89.1	0.7
1	-0.0	114.5	0.1
2	100.9	114.1	0.2
2	201.7	83.0	0.3

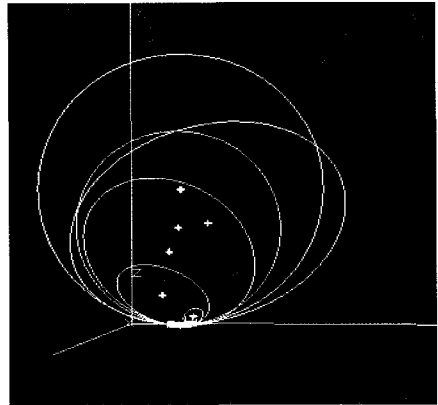


그림 6. 4m 퍼팅의 구간을 1/2로 구분하여 데이터 처리하였을 때 궤도와 각각의 중심점 위치

표 4. 구간을 1/2로 나누었을 때 4m 퍼팅의 클럽이동각도와 원의 반지름, 그리고 최적화 원을 그릴 때 발생하는 오차크기

Initial	Angle (deg)	Radius (cm)	Radius Error(cm)
0	-7.0	175.6	0.0
0	-14.1	93.6	0.0
1	-6.3	270.4	0.0
1	-0.0	289.4	0.0
2	10.1	207.1	0.0
2	20.2	20.2	0.3

3. 구간을 1/4로 나누었을 때 중심점 위치

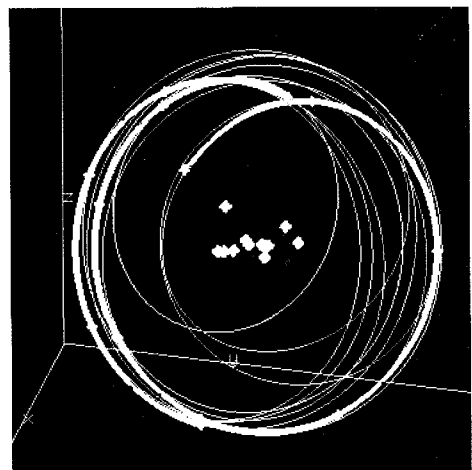


그림 7. 40m 피칭 샷의 구간을 1/4로 구분하여 데이터 처리하였을 때 궤도와 각각의 중심점 위치. 구간을 1/2의 원으로 처리한 데이터보다 더 정확하게 일치됨을 보여주고 있다.

표 5. 구간을 1/4로 나누었을 때 40m 피칭 샷의 클럽이동 각도와 원의 반지름, 그리고 최적화 원을 그릴 때 발생하는 오차크기

Initial	Angle (deg)	Radius (cm)	Radius Error(cm)
0	-49.8	116.4	0.1
0	-99.5	104.1	0.0
0	-149.3	105.0	0.0
0	-199.0	105.5	0.1
1	-149.4	77.7	0.3
1	-99.6	103.1	0.0
1	-49.8	111.6	0.0
1	-0.0	115.7	0.0
2	50.4	107.9	0.0
2	100.9	115.8	0.1
2	151.3	87.3	0.2
2	201.7	81.0	0.1

140m 피칭 샷을 구간별로 1/4로 나누었을 때 궤도와 각각의 원점 위치는 <그림 7>, <표 5>와 같으며, 퍼팅의 구간별 궤도와 원점 위치는 <그림 8>, <표 6>과 같다.

표 6. 구간을 1/4로 나누었을 때 4m 퍼팅의 클럽이동각도와 원의 반지름, 그리고 최적화 원을 그릴 때 발생하는 오차크기

Initial	Angle (deg)	Radius (cm)	Radius Error(cm)
0	-3.5	202.1	0.0
0	-7.0	172.3	0.0
0	-10.5	235.9	0.0
0	-14.1	17.5	0.1
1	-9.5	192.6	0.0
1	-6.3	303.6	0.0
1	-3.2	297.3	0.0
1	-0.0	280.3	0.0
2	5.0	242.2	0.0
2	10.1	173.1	0.0
2	15.1	101.7	0.0
2	20.2	4.9	0.5

4. 구간을 1/8로 나누었을 때 중심점 위치

40m 피칭 샷을 구간별로 1/8로 나누었을 때 궤도와 각각의 원점 위치는 <그림 9>와 같으며, 퍼팅의 구간별 궤도와 원점 위치는 <그림 10>과 같다.(클럽이동각도와 원의 반지름, 그리고 최적화 원을 그릴 때 발생하는 오차크기는 Appendix 2 참조)

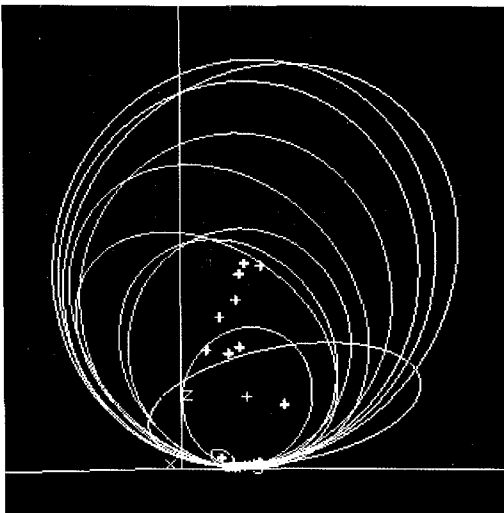


그림 8. 4m 퍼팅의 구간을 1/4로 구분하여 데이터 처리하였을 때 궤도와 각각의 중심점 위치

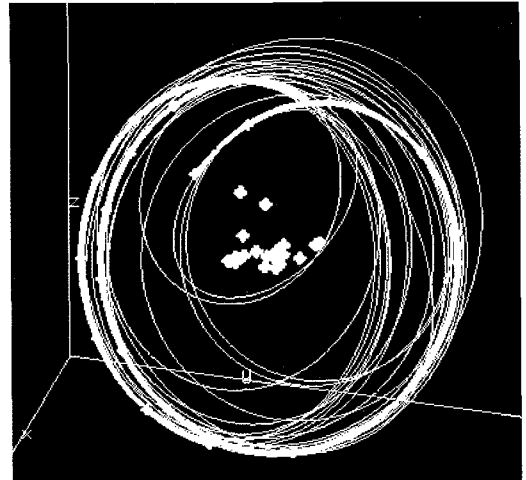


그림 9. 40m 피칭 샷의 구간을 1/8로 구분하여 데이터 처리 하였을 때 궤도와 각각의 중심점 위치. 구간을 1/4의 원으로 처리한 데이터보다 더 정확하게 자료가 일치됨을 보여주고 있다.

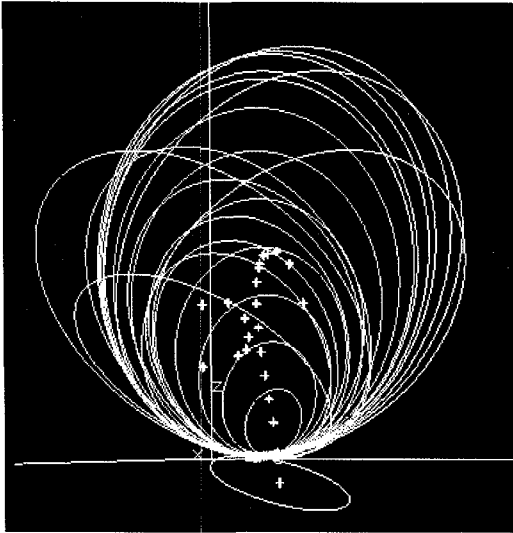


그림 10. 4m 퍼팅의 구간을 1/8로 구분하여 데이터 처리하였을 때 궤도와 각각의 중심점 위치

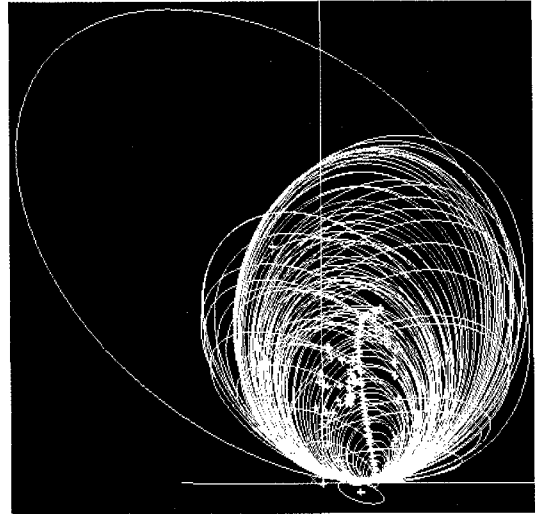


그림 12. 4m 퍼팅의 구간을 1/40로 구분하여 데이터 처리하였을 때 궤도와 각각의 중심점 위치. 구간을 1/8의 원으로 처리한 데이터보다 더 정확하게 자료가 일치됨을 보여주고 있다.

5. 구간을 1/40로 나누었을 때 중심점 위치

40m 피칭 샷을 구간별로 1/40로 나누었을 때 궤도와 각각의 원점 위치는 <그림 11>과 같으며, 퍼팅의 구간별 궤도와 원점 위치는 <그림 12>와 같다.

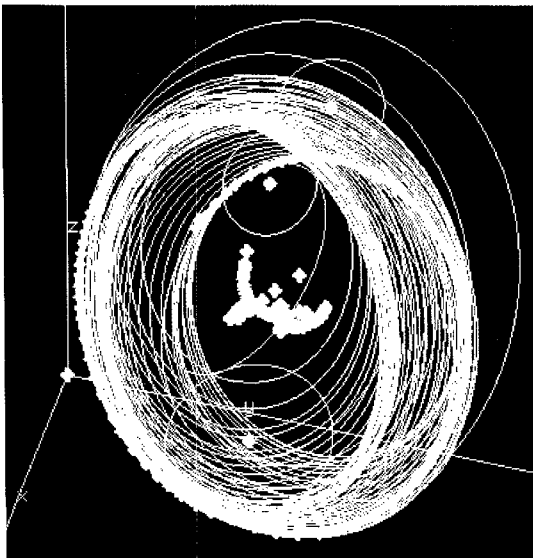


그림 11. 40m 피칭 샷의 구간을 1/40로 구분하여 데이터 처리하였을 때 궤도와 각각의 중심점 위치. 구간을 1/8의 원으로 처리한 데이터보다 더 정확하게 자료가 일치됨을 보여주고 있다.

피칭 샷 전체 동작의 관점에서 볼 때 스윙궤도의 반지름 크기는 세 구간이 대체적으로 유사하게 나타났다. 그러나 퍼팅의 경우에는 반지름에 많은 차이를 보였다. 특히, 다운스윙궤도가 반지름 299.4cm로 매우 완만하게 볼에 진입함을 볼 수 있다. 이는 박영훈 등(2007)이 제시한 퍼팅 시 반지름 최대값 240.5cm보다 큰 것으로, 회전 반지름이 크다는 것은 퍼터가 볼과 임팩트 할 때 지면과 수평으로 움직이기 때문에 매우 안정적으로 힘을 전달할 수 있음을 나타내는 것이다. 또한 Broer(1973)가 제시한 대로 스윙의 방향이 평탄하다면 운동의 수행결과가 목표를 향할 수 있는 확률은 매우 높을 것으로 예상한 것과 일치한다. 클럽은 임팩트가 끝난 다음에 회전의 반지름이 급격히 줄어들게 되는데 이는 클럽헤드를 세우기 위한 손목의 움직임 때문인 것으로 사료된다.

<그림 3>과 <그림 4>는 스윙을 정면에서 바라본 그림이다. 피칭의 경우 원의 중심이 스윙방향(y축)으로 수평 이동하는 반면에 퍼팅은 원의 중심이 스윙방향에 수직으로 이동함을 알 수 있다. 즉, 볼을 멀리 보낼 경우에는 스윙 속도 함께 스윙방향으로 움직이지만, 볼을 안정적으로 보내는 동작에서는 볼의 이동방향에는 전혀 영향을 미치지 않는 쪽으로 중심이 이동함을 알 수 있다. 이 역시 Broer(1973)의 관점에서 해석한다면 피칭의 경우 중

심의 이동을 통해서 궤도가 평탄해지는 것을 유도하는 반면에 퍼팅은 반지름을 크게 유지하면서 궤도를 평탄하게 만드는 것으로 사료된다.

본 연구에서 제시된 <표 1, 3, 5>를 분석하여 보면 원의 구간을 좁게 나눌수록 스윙의 운동학적 내용을 이해하는데 많은 도움이 된다. 피칭의 백스윙은 거의 일정한 반지름으로 움직이나 다운스윙 초기에서 반지름이 급격하게 줄어들고 이후 증가하여 큰 반지름으로 볼에 임팩트를 가한다. 폴로스루에서는 원의 폭을 초기에는 다운스윙과 동일하게 유지하다가 스윙 후반부에 급격히 궤도의 폭을 줄이면서 클럽을 멈추게 한다. 스윙반지름의 폭이 줄어드는 가장 큰 원인은 관계하는 관절 중에 손목의 움직임 영향이 가장 클 것으로 사료된다. <표 2, 4, 6>에 나타난 퍼팅의 경우에는 피칭보다도 반지름의 편차가 더 큰 것으로 나타났다. 퍼팅이 피칭보다 움직임의 각도가 작으면서도 반지름의 편차가 큰 원인은 손목관절의 움직임이 더 많이 받기 때문인 것으로 사료된다.

<그림 9, 10, 11, 12>는 스윙의 궤도를 조금 더 세분하여 분석을 시도한 것이다. Hay(1985)는 운동을 이해하기 위해서는 전체를 하나로 분석하기 보다는 구간으로 나누어 보는 것이 매우 효과적이라고 하였다. Centering 1.0으로 구분된 물체의 궤도는 구간이 세분화 될수록 더 정확하게 중심의 이동방향까지 해석할 수 있다. 회전운동에서 중심의 위치는 궤도를 움직이는 물체의 구심가속도(radial acceleration)를 구하는 중요한 요소이다(Tipler, 1991). 물체의 회전반지름이 커질수록 접선속도 역시 커지기 때문에 큰 힘을 전달하기 위해서는 반지름을 키우는 것이 바람직한 방향이라 할 수 있다.

IV. 결론 및 제언

본 연구의 목적은 원위지점에서 움직이는 실험데이터를 이용하여 그 점들의 회전운동 순간 중심점을 분석하는 프로그램(Centering 1.0)을 개발하는 것이다. 이를 위해 여성골퍼의 피칭(40m 캐리)과 퍼팅(4m) 스트로크에 관한 실험데이터를 수집하였고, 개발한 프로그램을 적용시켜 회전운동 순간 중심점을 찾았다. 그리고 각 순간의 반지름

크기로 피칭과 퍼팅의 스윙내용을 평가하였다. Centering 1.0 프로그램은 구간이 클수록 반지름의 오차가 비교적 컸으나 구간을 작게 나눌수록 매우 근사치의 반지름 값을 제시하여 주었다. 구심가속도가 일정할 경우에 반지름이 커진다면 속도는 매우 크게 증가할 것이다.

참고문헌

- 박영훈, 엄창홍, 서국웅(2007). 퍼티헤드 회전중심점 위치 관점에서 본 남자프로골퍼의 10.94m 퍼팅동작의 진자운동여부. *한국운동역학회지*, 17(2), 217-226.
- 성낙준, 진성태, 김의환, 장윤진, 이계산, 최규정, 신인식, 권영후(1987). 3차원 영상분석시스템 개발. 스포츠과학연구소.
- Abdel-Aziz, Y. I., & Karara, H. M.(1971). *Direct linear transformation from comparator coordinates in object-space coordinates in close range photogrammetry*. Proceedings of the ASP Symposium of Close-Range Photogrammetry. Urbana: University of Illinois.
- Broer, M. R.(1973). *Laboratory Experiences: exploring efficiency of human movement*. Philadelphia, W.B. Sanders Co.
- Faires, J. D., & Burden, R. L.(1996). *Numerical Methods*. International Thomson Publishing.
- Frankel, V. H., & Nordin, M.(1980). *Basic Biomechanics of the Skeletal System*. Philadelphia, Lea & Febiger.
- Hay, J. G.(1985). *The Biomechanics of Sports Techniques*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.
- Tipler, P. A.(1991). *Physics for Scientists and Engineers*. NY, Worth Publishers, Inc.

투 고 일 : 10월 09일

심 사 일 : 11월 09일

심사완료일 : 12월 04일

Appendix 1. 운동 회전 중심 및 반경 계산 알고리즘

임의의 m개의 운동 궤적 점의 회전 중심 및 반경의 수치해(numerical solution)를 계산하는 알고리즘은 아래와 같이 2 단계로 구성된다. 먼저 m개의 데이터가 놓이는 근사 평면의 방정식을 계산한다. 다음으로 근사된 평면상에서 원의 중심 및 반지름을 계산한다. 특수한 경우로 m = 3인 경우는 근사해가 아닌 엄밀해(exact solution)를 구할 수 있다.

1. 임의의 m (m > 3)개의 회전 중심 및 반경의 수치해 계산

step1) m개의 점이 놓이는 3차원 근사 평면의 방정식 계산

3차원 평면의 방정식(g) 및 단위법선벡터(\vec{n})은 식(1)과 같이 정의된다.

$$g(x, y, z) = ax + by + cz + d = 0 \quad \text{식(1)}$$

$$\text{여기서 } \vec{n} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

한편, 임의의 운동궤적 점 (x_i, y_i, z_i)으로부터 평면(g)까지의 최단수직거리(f_i)는 식(2)와 같이 정의된다.

$$f_i = \frac{|ax_i + by_i + cz_i + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad \text{식(2)}$$

m개의 점좌표 (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), ..., (x_m, y_m, z_m)를 식(2)에 대입하여 얻어지는 m개의 구속조건식 ($f_1 = 0, f_2 = 0, \dots, f_m = 0$)을 풀면 최적의 근사평면을 찾을 수 있다. 실제 계산에 서는 자명해(trivial solution, $a = b = c = d = 0$)를 방지하기 위하여 식(3)과 같이 a, b, c 중 하나의 미지수를 1로 놓아 전체 미지수 개수를 3으로 줄여 계산한다.

$$f_i = \frac{|x_i + by_i + cz_i + d|}{\sqrt{1^2 + b^2 + c^2}} = 0 (a \neq 0) \quad \text{식(3)}$$

위의 연립방정식은 비선형 연립방정식이므로 선형화하여 아래와 같은 선형 연립방정식을 구성하여 뉴턴랩슨 반복법(Newton-Raphson iteration method)으로 해를 구한다.

$$A_i \Delta q_i = -F(q_i) \quad \text{식(4)}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \frac{\partial f_1}{\partial q_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} & \frac{\partial f_2}{\partial q_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \frac{\partial f_m}{\partial q_2} & \frac{\partial f_m}{\partial q_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1(q_1, q_2, q_3) \\ -f_2(q_1, q_2, q_3) \\ \vdots \\ -f_m(q_1, q_2, q_3) \end{bmatrix} \quad \text{여기서 } q_1 = b, q_2 = c, q_3 = d (a \neq 0)$$

구속조건의 개수(m)가 미지수의 개수(n=3)보다 많으므로 양변에 전치행렬 A^T 을 곱하여 최소자승법 (Least-squared method)에 의한 해를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$A_i^T A_i \Delta q_i = A_i^T \cdot -F(q_i) \quad \text{식(5)}$$

뉴턴랩슨 반복법에 의한 변수의 갱신은 초기치(q_0)로부터 출발하여 아래 식(6)과 같이 진행한다. Δq_i 의 모든 항이 일정 공차 이하가 되면 수렴한 것으로 간주한다.

$$q_{i+1} = q_i + \Delta q_i \quad \text{식(6)}$$

step2) 3차원 근사 평면상에 놓이는 원의 중심 및 반지름 계산

step1에서 계산된 평면 위로 m개의 운동궤적점을 투사(projection)시킨 투사점들을 아래 식(7)과 같이 구한다.

$$\vec{r}'_i = \vec{r}_i - ((\vec{r}_i - \vec{r}_0) \cdot \vec{n}) \vec{n} \quad \text{식(7)}$$

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} - \frac{ax_i + by_i + cz_i + d}{a^2 + b^2 + c^2} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

여기서 $\vec{r}_0 : [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$, 평면 상에 놓이는 임의의 점 ($ax_0 + by_0 + cz_0 + d = 0$)

$\vec{r}_i : [x_i \ y_i \ z_i]^T$, i번째 운동궤적 점

$\vec{r}'_i : [x'_i \ y'_i \ z'_i]^T$, 평면 위로 투사된 i번째 운동궤적 점

\vec{n} : 평면의 단위법선벡터

투사된 3차원 점좌표 $(x'_1, y'_1, z'_1), (x'_2, y'_2, z'_2), \dots, (x'_m, y'_m, z'_m)$ 를 다시 평면 상의 2차원 좌표값 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_m, Y_m)$ 으로 아래 식(8)과 같이 변환한다.

$$X_i = (\vec{r}'_i - \vec{r}_0) \cdot \vec{i}, \quad Y_i = (\vec{r}'_i - \vec{r}_0) \cdot \vec{j} \quad \text{식(8)}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } \vec{j} &= \vec{n} \times \vec{i} \\ \vec{i} &= \vec{j} \times \vec{n} \end{aligned}$$

근사평면 상에서 중심 및 반경을 계산하기 위한 원(circle)의 방정식은 아래 식(9)과 같이 정의된다.

$$(X-a)^2 + (Y-b)^2 = R^2 \quad \text{식(9)}$$

식(9)로부터 근사원 계산을 위한 구속조건식을 유도하면 아래 식(10)과 같다. m개의 점좌표를 식(10)에 대입하면 m개의 구속조건식($f_1 = 0, f_2 = 0, \dots, f_m = 0$)을 얻을 수 있다.

$$f_i(q_1, q_2, q_3) = (X_i - q_1)^2 + (Y_i - q_2)^2 - q_3^2 = 0 \quad \text{식(10)}$$

여기서 (q_1, q_2) : 원의 중심좌표, q_3 : 원의 반경

m 개의 비선형연립방정식을 step1에서의 뉴턴랩슨반복법 및 최소자승법을 이용하여 풀면 최적의 근사해 (q_1, q_2, q_3) 를 구할 수 있다. 근사평면 상에서의 2차원 원의 중심좌표를 아래 식(11)과 같이 역변환하여 최종 3차원 중심 좌표를 구한다.

$$\vec{r}_c = \vec{r}_0 + X_c \vec{i}' + Y_c \vec{j}' \quad \text{식(11)}$$

2 $m = 3$ 인 경우의 엄밀해(exact solution) 계산

$m = 3$ (운동 궤적점 \vec{r}_0, \vec{r}_1 및 \vec{r}_2 만 고려)인 경우는 근사적인 수치 해가 아닌 엄밀해를 아래와 같은 기하학적 관계를 이용하여 계산 할 수 있다.

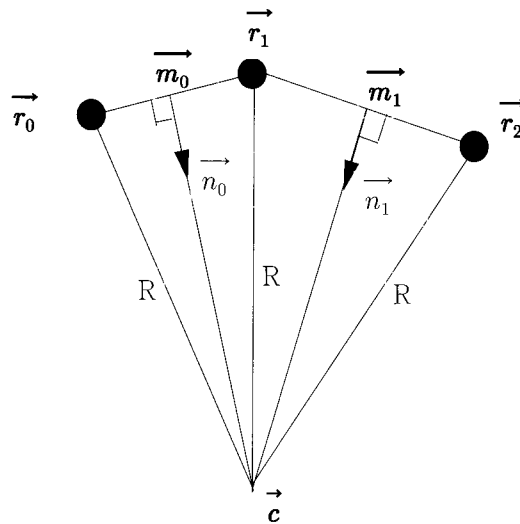


Fig. A1 Calculation of the center of rotation using three sample points

step 1) 세 점이 놓이는 평면에 수직인 단위 벡터의 계산

$$\begin{aligned} \Delta r_0 &= \vec{r}_1 - \vec{r}_0 \\ \Delta r_1 &= \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \\ \vec{e} &= \frac{\Delta r_0 \times \Delta r_1}{|\Delta r_0 \times \Delta r_1|} \end{aligned}$$

step 2) 각 선분의 중점 및 원의 중심을 향하는 단위 벡터의 계산

$$\begin{aligned} \vec{m}_0 &= (\vec{r}_0 + \vec{r}_1)/2 \\ \vec{m}_1 &= (\vec{r}_1 + \vec{r}_2)/2 \\ \vec{n}_0 &= \frac{\vec{e} \times \Delta \vec{r}_0}{|\vec{e} \times \Delta \vec{r}_0|} \\ \vec{n}_1 &= \frac{\vec{e} \times \Delta \vec{r}_1}{|\vec{e} \times \Delta \vec{r}_1|} \end{aligned}$$

step 3) 원의 중심(\vec{c})의 계산

벡터식 $\vec{c} = m_0 + sn_0 = m_1 + tn_1$ 은 x, y 및 z 성분으로 구성되는 3개의 스칼라 식이 나오므로, 2개의 식을 연립하여 매개변수 s와 t를 구하면 원의 중심 좌표를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} c_x &= m_{0x} + sn_{0x} = m_{1x} + tn_{1x} \\ c_y &= m_{0y} + sn_{0y} = m_{1y} + tn_{1y} \\ c_z &= m_{0z} + sn_{0z} = m_{1z} + tn_{1z} \end{aligned}$$

step 4) 회전반경(R)의 계산

계산된 중심좌표 및 $R = |\vec{r}_0 - \vec{c}| = |\vec{r}_1 - \vec{c}| = |\vec{r}_2 - \vec{c}|$ 관계로부터 회전반경 R을 계산할 수 있다.

Appendix 2

1) 구간을 1/8로 나누었을 때 40m 피칭 샷의 클럽이동각도와 원의 반지름, 그리고 최적화 원을 그릴 때 발생하는 오차크기

I	J	Start	End	Angle	cen_x	cen_y	cen_z	rad	rad_err	dir_x	dir_y	dir_z	dist_err
0	0	0	34	-24.9	0.04791	1.26684	0.96271	1.23252	0.00032	0.72729	-0.23778	0.64382	0.00072
0	1	34	47	-49.8	0.34702	1.12156	1.03964	1.11435	0.00004	0.83555	-0.35276	0.42121	0.00008
0	2	47	56	-74.6	0.40546	1.04531	1.02493	1.04867	0.00001	0.83433	-0.40213	0.37708	0.00001
0	3	56	64	-99.5	0.37286	1.05026	1.00861	1.03903	0.00000	0.84481	-0.37094	0.38563	0.00003
0	4	64	71	-124.4	0.36484	1.07872	0.99633	1.06247	0.00001	0.85381	-0.35245	0.38312	0.00002
0	5	71	77	-149.3	0.32138	1.06417	1.00396	1.02663	0.00002	0.86788	-0.33200	0.36955	0.00000
0	6	77	86	-174.1	0.33110	1.06976	0.99306	1.04201	0.00002	0.86658	-0.33391	0.37086	0.00004
0	7	86	105	-199.0	0.07296	1.16268	0.81912	1.14473	0.00059	0.94263	-0.31845	0.10018	0.00100
1	0	105	125	-174.4	0.28677	1.08533	1.42101	0.65906	0.00158	0.75938	-0.31922	0.56696	0.00086
1	1	125	131	-149.4	0.38375	1.12727	1.19315	0.90355	0.00012	0.80329	-0.31690	0.50428	0.00004
1	2	131	135	-124.5	0.38945	1.20725	1.10377	1.00624	0.00005	0.83952	-0.27664	0.46764	0.00005
1	3	135	138	-99.6	0.36574	1.26147	1.06523	1.05435	0.00002	0.86066	-0.23376	0.45235	0.00002
1	4	138	141	-74.7	0.35506	1.30233	1.05499	1.09125	0.00003	0.86630	-0.21311	0.45178	0.00001
1	5	141	144	-49.8	0.36212	1.34799	1.07259	1.14054	0.00003	0.86637	-0.21655	0.45002	0.00001
1	6	144	147	-24.9	0.38494	1.36291	1.10032	1.16675	0.00000	0.86920	-0.23583	0.43459	0.00002
1	7	147	149	-0.0	0.41170	1.34217	1.08280	1.13482	0.00000	0.87369	-0.24554	0.41998	0.00000
2	0	149	153	25.2	0.42177	1.33151	1.02599	1.07754	0.00006	0.86901	-0.24392	0.43050	0.00005
2	1	153	156	50.4	0.36754	1.33622	1.01987	1.09863	0.00004	0.84581	-0.25343	0.46945	0.00002
2	2	156	161	75.6	0.29410	1.29687	1.06289	1.18729	0.00006	0.83120	-0.26651	0.48793	0.00002
2	3	161	168	100.9	0.41478	1.34787	1.09590	1.10489	0.00029	0.86692	-0.18412	0.46319	0.00025
2	4	168	177	126.1	0.49552	1.49090	1.15775	0.94694	0.00029	0.87642	-0.10850	0.46916	0.00005
2	5	177	188	151.3	0.43053	1.58771	1.24015	0.80679	0.00022	0.88521	-0.13369	0.44557	0.00001
2	6	188	201	176.5	0.50206	1.58623	1.26386	0.82154	0.00011	0.83954	-0.15209	0.52157	0.00036
2	7	201	242	201.7	0.63511	1.33204	1.57015	0.62144	0.00212	0.48061	-0.44059	0.75822	0.00549

2) 구간을 1/8로 나누었을 때 4m 퍼팅의 클럽이동각도와 원의 반지름, 그리고 최적화 원을 그릴 때 발생하는 오차크기

I	J	Start	End	Angle	cen_x	cen_y	cen_z	rad	rad_err	dir_x	dir_y	dir_z	dist_err
0	0	0	14	-1.8	2.60594	0.70354	2.28384	2.89725	0.00000	0.75182	-0.22599	-0.61943	0.00000
0	1	14	24	-3.5	1.51082	0.93011	1.52307	1.65608	0.00000	0.87882	-0.24369	-0.41023	0.00000
0	2	24	32	-5.3	1.28958	0.99081	1.61176	1.66110	0.00000	0.93089	-0.24450	-0.27141	0.00000
0	3	32	39	-7.0	1.24976	1.01905	1.79177	1.82524	0.00000	0.94429	-0.24263	-0.22237	0.00000
0	4	39	46	-8.8	1.41481	1.01424	2.06310	2.12998	0.00000	0.93223	-0.24528	-0.26606	0.00000
0	5	46	54	-10.5	1.97436	0.92127	2.30454	2.56197	0.00000	0.86140	-0.25320	-0.44032	0.00000
0	6	54	62	-12.3	2.49862	0.66754	1.37048	2.17596	0.00000	0.58245	-0.24200	-0.77601	0.00000
0	7	62	82	-14.1	0.79584	0.80213	0.05548	0.02220	0.00111	0.72388	-0.24330	-0.64560	0.00002
1	0	82	93	-11.1	-0.22511	1.02814	-0.36372	1.11044	0.00002	0.34462	-0.13099	-0.92956	0.00002
1	1	93	98	-9.5	-0.72285	1.28214	2.27265	2.73411	0.00000	0.80440	-0.14840	0.57525	0.00000
1	2	98	101	-7.9	-0.25290	1.20543	2.85400	3.02393	0.00000	0.91409	-0.18082	0.36298	0.00000
1	3	101	105	-6.3	0.13073	1.13013	3.03683	3.08262	0.00000	0.95388	-0.19369	0.22932	0.00000
1	4	105	107	-4.8	0.41542	1.06992	3.00322	2.99585	0.00000	0.97008	-0.19913	0.13886	0.00000
1	5	107	110	-3.2	0.54730	1.04227	2.98175	2.95874	0.00000	0.97500	-0.20083	0.09506	0.00000
1	6	110	113	-1.6	0.67240	1.01584	2.86064	2.82840	0.00000	0.97795	-0.20168	0.05424	0.00000
1	7	112	114	-0.0	0.68452	1.01360	2.80199	2.76918	0.00000	0.97812	-0.20171	0.05095	0.00000
2	0	114	119	2.5	0.77798	0.99735	2.59172	2.55572	0.00000	0.97928	-0.20168	0.01811	0.00000
2	1	119	123	5.0	0.79985	1.00363	2.27634	2.23989	0.00000	0.97941	-0.20154	0.01166	0.00000
2	2	123	128	7.6	0.78457	1.02618	1.92645	1.88988	0.00000	0.97904	-0.20223	0.02412	0.00000
2	3	128	132	10.1	0.76556	1.05891	1.56994	1.53334	0.00000	0.97793	-0.20376	0.04610	0.00000
2	4	132	138	12.6	0.72845	1.10469	1.22068	1.18617	0.00000	0.97315	-0.20842	0.09772	0.00000
2	5	138	144	15.1	0.70702	1.16014	0.87814	0.84737	0.00000	0.96046	-0.21736	0.17397	0.00000
2	6	144	154	17.7	0.71176	1.22924	0.53444	0.50873	0.00001	0.92217	-0.23722	0.30551	0.00000
2	7	154	226	20.2	0.89425	1.35997	0.08081	0.01476	0.00518	0.51072	-0.36822	0.77690	0.00019