

6-자유도 Eclipse-II 모션 시뮬레이터의 최적 원점 복귀 알고리즘

Optimal Home Positioning Algorithm for a 6-DOF Eclipse-II Motion Simulator

신현표^{1,✉}, 김종원²
Hyunpyo Shin^{1,✉} and Jongwon Kim²

¹ 삼성전기 (Precision System Group, Samsung Electro-Mechanics)

² 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.)

✉ Corresponding author: hpshin@rodell.snu.ac.kr, Tel: 02-886-2986

Manuscript received: 2011.10.14 / Accepted: 2011.12.20

This paper describes the optimal home positioning algorithm of Eclipse-II, a new conceptual parallel mechanism for motion simulator. Eclipse-II is capable of translation and 360 degrees continuous rotation in all directions. In unexpected situations such as emergency stop, riders have to be resituated as soon as possible through a shortest translational and rotational path because the return paths are not unique in view of inverse kinematic solution. Eclipse-II is man riding. Therefore, the home positioning is directly related to the safety of riders. To ensure a least elapsed time, ZYX Euler angle inverse kinematics is applied to find an optimal home orientation. In addition, the subsequent decrease of maximum acceleration and jerk values is achieved by combining the optimal return path function with cubic spline, which consequently reduces delivery force and vibration to riders.

Key Words: Home Positioning (원점 복귀), Motion Simulator (모션 시뮬레이터), Parallel Mechanism (병렬 기구), Inverse Kinematics (역기구학), Optimization (최적화), Cubic Spline (3 차 스플라인)

1. 서론

모션 시뮬레이터(motion simulator)는 탑승자에게 가능한 한 실제와 흡사한 운동특성을 느끼도록 운동을 재현해 주는 장치이다. 예를 들어 거대한 장소를 차지하는 롤러 코스터를 타지 않더라도 좁은 공간에서 실제로 롤러 코스터를 타고 있는 듯한 운동특성을 구현하여 줄 수 있다. 이는 실제로 롤러 코스터를 제작할 때의 비용을 절감하는 효과가 있으며 가상 공간 상에서 사용자가 원하는 대로 다양한 모션과 경로를 구성할 수 있다는 장점이 있다. 또한 비행기 조종사의 훈련용으로도 응용이 가능하여 비행기를 직접 조종하며 훈련할 때의 위험성을 줄여주기도 한다.

이러한 시뮬레이터의 모션 베이스(motion base)로 쓰이는 다양한 기구가 있는데 대표적인 예로 스투어트-고흐 플랫폼(Stewart-Gough platform)을 들 수 있다.¹ 이는 신축이 가능한 링크를 병렬로 연결하여 X, Y, Z-축 병진운동(translation)과 회전운동(rotation)이 가능하도록 고안되었으나 회전운동의 경우 회전각도가 +15 ~ -15 도 정도로 상당히 제한되어 있다. 그러므로 완전한 회전 또는 탑승자가 거꾸로 머물게 되는 동작을 구현해 주지 못하는 단점이 있다.

이에 비해 Eclipse-II 는 병진 및 무제한 회전 운동이 가능한 6-자유도(degrees of freedom) 병렬 기구(parallel mechanism)의 모션 시뮬레이터이다.² 구조는 수평 원형 가이드(horizontal circular guide) 상

을 두 개의 수직직선칼럼(vertical linear column)이 움직이고 수직 원형 가이드 상을 한 개의 칼럼이 움직여 회전운동의 범위를 극대화한 구조로 기존의 플랫폼보다 넓은 회전운동 범위를 가지고 있다. 모션 시뮬레이터의 경우 사람을 대상으로 하는 장치이므로 비상 정지(emergency stop) 상태와 같은 비정상적인 작동 중단의 상태에서 플랫폼은 가능한 한 빨리 적은 충격으로 원점에 복귀하는 것이 필요하다. 그러나 Eclipse-II 는 완전한 회전운동을 구현해 주므로 어떠한 자세와 위치에서 정지가 될지 모른다. 그러므로 신속하고 원활한 원점복귀는 탑승자의 안전과도 직결된 문제라고 할 수 있다.

이를 위해 본 논문에서는 기존의 플랫폼과 다른 운동 범위를 가지고 있는 Eclipse-II 모션 시뮬레이터의 최적 원점 복귀 알고리즘 관해서 연구하였다. 먼저 크게는 최적 원점에 대해 정의하는 부분과 최적 원점이 정의되었을 때 현 위치 및 자세로부터 구해진 최적 원점까지의 최적 경로를 생성하는 부분으로 나누어 연구를 전개하였다.

무제한 회전운동이 가능한 구조에서는 원점으로 볼 수 있는 자세 값들이 수없이 많이 존재한다. 그 중 회전 거리가 가장 가까우면서도, 탑승자가 불쾌감을 많이 느끼는 방향으로의 회전 거리가 적어지도록 하는 자세 값을 회전운동의 역기구학을 이용하여 도출해 내었다. 또한 최적 경로 생성의 경우 탑승자에게 충격을 적게 전달 하는 것을 항목으로 하는 최적화 지수를 구성하여 이 지수를 최소화하는 경로식을 만들었다. 이를 위해 원하는 동특성을 가지도록 특성의 조절이 용이한 3 차 스플라인(cubic spline) 식을 구성하였고, 기존 식과의

비교를 통해 최대 가속도와 저크 특성이 향상되었음을 확인하였다.

2. Eclipse-II 와 원점 복귀

모션 시뮬레이터의 원점복귀 시 충격을 적게 느끼면서도 신속히 움직이도록 복귀 명령을 내리는 것이 또한 중요하다. 예를 들어 임의의 위치에서 비상정지 상태가 발생했을 때 탑승자의 자세가 거꾸로 된 채로 정지하게 될 수도 있다. 이 때 충격이 적은 부드러운 운동을 하면서도 가능한 한 빨리 탑승자의 자세를 정상적인 상태로 이동시켜 주는 것이 필수적이다.

2.1 Eclipse-II 의 기구 구조

모션 시뮬레이터는 탑승자에게 가능한 한 실제와 흡사한 시각효과, 청각효과 및 운동특성을 느끼도록 고안된 장치이다. 이를 위해 기존에 여러 가지 기구학적 구조를 가지고 있는 모션 베이스가 개발되었다.

스튜어트-고흐 플랫폼과 델타(Delta) 구조, 헥사(Hexa) 구조 플랫폼 등이 그 예인데 모션 시뮬레이터로 많이 쓰이는 스텐더트-고흐 플랫폼의 경우 6-자유도 병렬 기구로써 X, Y, Z-축 병진운동과 회전운동이 가능하다. 그러나 수평자세에서 전후좌우로 회전하는 각도(tilt angle)가 최대 30 도 정도로 제한되어 있어 360 도 회전운동의 구현이 불가능하다. 또한 델타 구조는 3-자유도 병진운동만 가능하고, 헥사 구조는 6-자유도이기는 하나 여전히 회전운동의 범위가 스텐더트-고흐 플랫폼의 한계를 벗어나지 못하고 있다.

그러나 Eclipse-II 는 6-자유도를 갖는 모션 시뮬레이터로 기존의 병진운동만 가능하거나 회전운동만 가능한 경우, 또한 6-자유도이기는 하지만 회전운동에 상당한 제약이 있는 기구와는 달리 병진운동 및 무제한 회전운동이 가능한 기구 구조를 가지고 있다. 기구 구조를 살펴 보면, Eclipse-II 는 고정된 수평면 상의 원형가이드를 따라 움직이는 3 개의 PPRS(prismatic-prismatic-revolute-spherical) 직렬연쇄기구(serial chain mechanism)로 구성되어 있다. 원형가이드를 따라 움직이는 세 개의 A 관절, 수직직선칼럼 상의 C₂, C₃ 관절 및 수직원형칼럼을 따라 움직이는 C₁ 관절이 구동관절로서 Fig. 1 에서 움직이는 방향이 화살표로 표시되어 있다. 2 개의 수직칼럼과 마찬가지로 수직원형칼럼도 수평원형

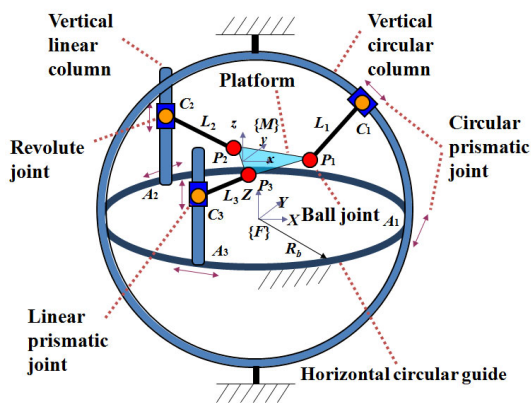


Fig. 1 Kinematic structure of Eclipse-II

가이드 상을 따라 운동하도록 되어있어 결과적으로 3 개의 PPRS 직렬연쇄기구를 이루는 것이다. 연결링크 $\overline{P_i C_i} (i=1,2,3)$ 는 세 개의 수직칼럼과는 회전관절로 연결되고, 플랫폼과는 볼관절(spherical joint)로 연결된다. 연결링크에 부착된 회전관절(revolute joint)과 볼관절은 모두 수동관절이다. 3 개 모두 직선의 수직칼럼인 경우 회전 운동이 90 도 이하로 제한된다. 그러나, 1 개의 수직칼럼을 원형칼럼으로 대체함으로써, 360 도 회전이 가능하게 되어 모션시뮬레이터가 구현해야 하는 공간상의 자유로운 회전운동이 가능하게 되는 것이다. 결과적으로, 원형의 수직칼럼으로써 회전운동의 범위를 극대화한 구조로 운동좌표계(moving frame coordinate) $\{M\}$ 에서의 Y-축과 Z-축에 대해 360 도 무한 회전이 가능하다.³

2.2 Eclipse-II 의 역기구학

최적 원점 복귀 경로식의 구현을 위해 각 구동기의 구동량을 역기구학식을 통해 알아내는 것이 필요하다. 역기구학식은 플랫폼 상에 위치한 운동좌표계의 위치와 자세가 주어졌을 때, 각 구동관절의 관절값(joint value)을 구하는 문제이다. Eclipse-II 기구의 역기구학식은 각 직렬연쇄기구의 역기구학식을 푸는 것에 의해 구할 수 있다. 고정좌표계(fixed frame coordinate) $\{F\}$ 에 대해 운동좌표계 $\{M\}$ 의 원점 위치를 나타내는 벡터 P_c 와 플랫폼의 회전을 나타내는 회전행렬 R 이 주어졌을 때, 각 볼관절의 위치벡터 P_i 는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$P_i = R^M P_i + P_c \tag{1}$$

여기에서는 ${}^M P_i$ 는 운동좌표계에서 표현된 i 번째 볼관절의 위치벡터이다. 회전행렬 R 과 위치이송벡터 P_c , 볼관절의 위치 P_i 는 모두 고정좌표계 $\{F\}$ 에 대해 표현된다. 이렇게 계산된 P_i 의 X, Y, Z-축 좌표는 각각 P_{ix}, P_{iy}, P_{iz} 로 나타낸다. 수평원형가이드 상에서 움직이는 원형 미끄럼 관절값 A_i 은 볼관절의 위치로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_{i1} = \arctan 2(P_{iy}, P_{ix}) \tag{2}$$

θ_{ij} 는 i 번째 직렬연쇄기구에서의 j 번째 조인트의 구동량을 의미한다. 다음으로 수직원형칼럼 상에서 회전관절의 위치 값을 다음과 같이 구한다.

L_i 와 R_b 는 각각 Fig. 1 에서와 같이 플랫폼 볼관절과 수직원형칼럼 또는 수직칼럼의 회전관절 간의 거리, 수평원형가이드의 반경을 의미한다.

$$\theta_{i3} = -\arccos\left(\frac{L_i^2 + R_b^2 - \|P_i\|^2}{2L_i R_b}\right) \tag{3}$$

수직원형칼럼 상을 미끄럼 이송하는 회전관절의 위치 값은 다음의 식으로 구한다.

$$\theta_{i2} = -\left(\arcsin\left(\frac{P_{iz}}{\|P_i\|}\right) + \arccos\left(\frac{\|P_i\|^2 + R_b^2 - L_i^2}{2R_b \|P_i\|}\right)\right) \tag{4}$$

마지막으로 수직직선칼럼 상을 이송하는 회전관절의 이송량 ($i = 2,3$)와 회전관절의 회전량 ($i = 2,3$)는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\theta_{i3} = -\arccos\left(\frac{R_b - \sqrt{P_{ix}^2 + P_{iy}^2}}{L_i}\right) \tag{5}$$

$$\theta_{i2} = P_{iz} - L_i \sin \theta_{i3}, i=2,3 \tag{6}$$

이상과 같이 역기구학식의 해를 구하는 과정에서 식 (2)의 관절 값에 180 도를 더한 값도 가능한 해이다. 또한 식 (3)에서 구한 관절값의 음수값도 가능한 해이며, 식 (4)의 괄호 안의 양수 부호를 음수로 바꾼 값도 가능한 해이다. 식 (5)와 식 (6)에서 구한 관절 값들의 음수 값들도 역기구학식의 해로서 가능하다. 이 때 양수인 경우는 링크가 볼관절로부터 위쪽을 향하는 경우이고, 음수인 경우는 아래쪽을 향하는 경우이다. 따라서 역기구학식의 해는 다양한 조합이 가능하지만, 이 중에서 Fig. 1 에 도시된 바와 같은 자세에 해당하는 해를 최종 해로 결정한다.

3. Eclipse-II 에서의 최적 원점 위치 및 자세

3.1 최적 원점의 정의

여기에서 말하는 최적 원점 위치(position) 및 자세(orientation)란 최단 소요 시간, 최단 거리를 가지는 위치와 자세를 의미한다. 물론 위치의 경우는 자세와 상관 없이 X, Y, Z-축 좌표가 (0, 0, 0)이 되는 위치를 유일하게 원점의 위치로 정의할 수 있다.

그러나 Eclipse-II 는 Fig. 2 에서 알 수 있는 바와 같이 Y 및 Z-축으로의 회전운동은 즉시 구현 가능하나 X-축의 경우 수직직선칼럼과 플랫폼 간의 연결링크로 인하여 직접적인 회전운동이 제한되고 탑승자의 의자 회전을 통하여 운동계획(motion planning)을 거쳐 최종적인 회전운동을 구현할 수 있게 된다.⁴ 또한 동일한 임의의 자세를 만들어 낼 수 있는 회전운동의 조합 또한 ZYX 오일러 각을 사용하여 다양하게 구해낼 수 있다. ZYX 오일러 각 역기구학식(ZYX Euler angle inverse kinematics)의 해가 유일하게 정해지지 않고 조합으로 나타나기 때문이다.

그것이 탑승자를 대상으로 하는 상황이라면 전체적인 회전운동 및 불쾌감을 느끼는 방향의 회전운동이 최소가 되도록 목표 지점을 정해주는 것은 안전 및 인간공학적 관점에서 고려되어야 할 중요한 사항이라고 할 수 있다.

3.2 최적 자세 값 계산

최적의 목표 자세 각 정보를 얻기 위해 다음과 같은 식을 구성하였다.

$$R_{yx} = R_z(\alpha)R_y(\beta)R_x(\gamma)$$

$$= \begin{bmatrix} c(\alpha)c(\beta) & c(\alpha)s(\beta)s(\gamma)-s(\alpha)c(\gamma) & c(\alpha)s(\beta)c(\gamma)+s(\alpha)s(\gamma) \\ s(\alpha)c(\beta) & s(\alpha)s(\beta)s(\gamma)+c(\alpha)c(\gamma) & s(\alpha)s(\beta)c(\gamma)-c(\alpha)s(\gamma) \\ -s(\beta) & c(\beta)s(\gamma) & c(\beta)c(\gamma) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

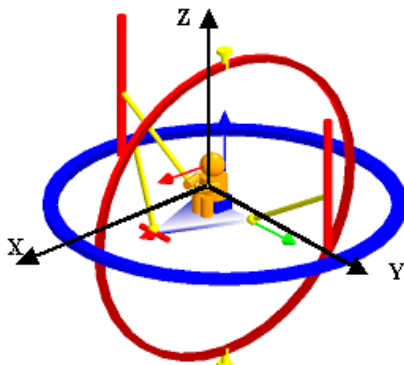


Fig. 2 View and reference coordinate of a rider in Eclipse-II

여기에서 c(·), s(·) 는 각각 cos(·), sin(·) 를 의미한다. 이는 플랫폼의 회전운동을 ZYX 오일러 각으로 표현한 것이다. 원점에서는 회전각이 0 이며 이 때 회전행렬은 단위행렬이 된다. 원점 자세를 표현하는 해를 찾기 위해, 원점의 자세를 단위행렬로 정의하였고 아래의 역기구학 식을 이용해서 이를 만족시키는 X, Y, Z-축 방향 회전각 α, β, γ 를 구하였다.

$$\alpha = \arctan2(r_{11}, r_{21})$$

$$\beta = \arctan2(\pm\sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}, -r_{31}) \quad (8)$$

$$\gamma = \arctan2(r_{33}, r_{32})$$

arctan2 함수의 특성상 여러 개의 해가 나타나지만 탑승자가 가장 불쾌감을 많이 느끼는 X, Y-축 방향의 회전을 적게 하는 해를 구하기 위해 X, Y-축 방향 회전 거리에 보다 큰 가중치를 두어 최적해를 결정하였다. 이를 위해 다음과 같은 최적화 지수(optimization index)를 이용하여,

$$\min I = 0.4abs(\alpha) + 0.4abs(\beta) + 0.2abs(\gamma) \quad (9)$$

현재 자세에서 새롭게 얻어진 모든 원점 자세까지의 각도 거리 ($abs(\alpha), abs(\beta), abs(\gamma)$) 를 계산하였다. 그리고 X, Y, Z-축 방향에 각각 4:4:2 의 가중치를 두어 최적화 지수를 최소로 하는 원점 자세를 구하였다.

4. 최적 원점 복귀 경로의 생성

4.1 최적 원점 복귀 경로와 최적화 지수

다음으로 최적의 위치와 자세가 결정되었을 때 기계가 원하는 동특성(dynamic characteristic)을 가지고 움직일 수 있도록 이동 경로를 지정해 주는 과정이 필요하다. 기하학적인 이동 경로가 아닌 동특성을 말하는 이유는 비록 직선이 최단거리라고 하더라도 같은 직선 상을 어떠한 동특성을 가지고 원점에 복귀하도록 계획하느냐에 따라 탑승자가 느끼는 느낌은 완전히 달라지기 때문이다. 그러므로 앞으로 언급할 경로라는 용어는 기하학적인 경로를 뜻하지 않고 직선 상을 어떠한 동특성을 가지고 움직이도록 하는가와 관련된 용어임을 밝힌다.

일반적으로 동특성은 속도, 가속도, 저크로 표현할 수 있다. 속도의 경우 이미 최적 원점 위치와 자세를 결정하는 과정에서 고려되었고 또한 직선 경로를 채택했기 때문에 최적화 항(optimization term)에서 제외시켜도 무관하다. 따라서 충격을 최소화 하는 방향으로 최적 경로를 정의하는 것이 보다 타당성이 있는 것으로 보인다.

본 연구에서는 기계가 동일한 평균 속도를 낼 때 탑승자가 충격을 가장 적게 느끼도록 하는 경로를 구하기 위해 이를 만족하는, 시간에 대한 위치 함수를 결정하는 문제로 문제를 정의하고 진행하였다. 결과적으로 가속도와 저크를 항으로 하여 적절한 가중치(weight)를 주어 최적화를 진행하여 최적화 지수를 최소화하는 함수를 결정하였다. 가속도는 직접으로는 기계가 탑승자에게 가하는 힘과 관련되어 있다. 그리고 저크는 가속도의 시간에 따른 변화량으로서 기계의 진동 및 탑승자에게 미치는 충격과 관련되어 있다. 그러므로 이 문제는 가속도와 저크에 일정 가중치를 곱한 합을 최소화하는 함수를 결정하는 문제로 귀결된다. 일반적으로 가속도와 저크 두 항은 어느 한 항의 크기를 줄이면 다른 항의 크기가 증가하는 것으로 경향이 있다.

여기서는 진동 및 충격과 관련된 저크 항에 보다 큰 가중치를 두어 최적화를 진행하였으며 최적화 지수는 다음과 같다.

$$\min I = \alpha \cdot \frac{A}{A_m} + \beta \cdot \frac{J}{J_m}, (\alpha + \beta = 1.0) \quad (10)$$

위의 식에서 A 와 A_m 은 가속도와 가속도의 최대값, J 와 J_m 은 저크와 저크의 최대값을 뜻하며 α 와 β 는 가중치를 뜻한다. 가속도와 저크의 단위가 다르므로 이 두 항을, 비교 대상으로 하는 경로식의 가속도 및 저크의 최대값으로 각각 나누어 무차원화 시킴으로써 보다 객관적인 평가가 가능하도록 했으며 각각의 변화에 따른 최적화 지수의 변화를 관찰하여 결과를 얻을 수 있었다.

4.2 기존 경로식과 3 차 스플라인을 이용한 식의 비교

경로식에 대한 유사한 연구가 캠(cam) 설계 분야에서 진행되고 있다. 캠은 직접 접촉된 종동절(follower)이 예정된 운동경로를 따라 움직일 수 있

Table 1 Maximum acceleration and jerk values of various curves

| Curve type | Comparison item | | |
|--------------------|--|--------------------------|--------------------|
| | Maximum acceleration (m/s ²) | Jerk (m/s ³) | Optimization index |
| Parabolic | 4 | ∞ | ∞ |
| Simple harmonic | 4.93 | ∞ | ∞ |
| Cycloidal | 6.28 | 39.47 | 1 |
| Modified sine | 5.53 | 69 | 1.48 |
| 3-4-5 polynomial | 5.77 | 60 | 1.33 |
| 4-5-6-7 polynomial | 7.52 | 52 | 1.28 |

Table 2 Changes in maximum acceleration and jerk values according to the number of splines curves

| No. of splines | Maximum acceleration (m/s ²) | Jerk (m/s ³) |
|----------------|--|--------------------------|
| 4 | 8.016 | 32.064 |
| 6 | 6.000 | 36.002 |
| 8 | 5.337 | 42.700 |
| 10 | 5.866 | 57.526 |
| 12 | 5.184 | 61.171 |

Table 3 Change in optimization index according to the various weight ratio and number of splines

| No. of splines | Weight ratio | | | | |
|----------------|--------------|---------|-------|---------|-------|
| | 4:6 | 4.5:5.5 | 5:5 | 5.5:4.5 | 6:4 |
| 4 | 0.998 | 1.021 | 1.044 | 1.067 | 1.090 |
| 6 | 0.929 | 0.931 | 0.933 | 0.936 | 0.938 |
| 8 | 0.989 | 0.977 | 0.966 | 0.954 | 0.943 |
| 10 | 1.247 | 1.221 | 1.195 | 1.168 | 1.142 |
| 12 | 1.260 | 1.224 | 1.187 | 1.151 | 1.115 |

도록 고안된 기계 요소이다. 그러므로 원하는 속도와 가속도, 저크 특성을 갖는 캠을 설계하기 위해 다양한 캠곡선 식이 사용되고 있다. 특히 종동절에 가하는 충격을 줄이기 위해 가속도와 저크를 최소화하는 다양한 곡선식이 제시되어 왔다.⁵

가장 간단한 형태는 처음과 끝에 적당한 가속도를 가지는 직선식과 중간에 등속도 직선식이 조합된 형태의 식이지만 이는 가속도가 변하는 부분에서 불연속이 발생하여 이 부분에서 무한대의 저크를 만들어낸다. 또한, 불연속성을 제거하기 위해 등가속도곡선을 사용할 수 있지만 이는 시작과 끝

부분에서 무한대의 저크가 나타난다. 이를 개선하기 위해 단진자운동의 정사영을 이용한 단현곡선이 제시되었으나 여전히 무한 저크가 존재한다. 이 외에도 높은 수준의 연속성을 만족시키기 위해 다항식에 경계조건을 적용한 다항식 곡선, 여러 가지 기본 곡선들을 구간별로 연결하여 만든 변형 곡선들이 있지만 최적 경로를 생성하기 위해 최소화 해야할 가속도와 저크 특성이 미흡하다. 이들의 가속도 및 저크 특성을 단위 시간(sec)당 단위 거리(m)를 움직인 경우에 대하여 나타낸 것이 Table 1 에 나와 있다.^{6,7}

여기에서는 이 중 저크 특성이 가장 좋은 사이클로이드 곡선을 기준 곡선으로 택하여 먼저 언급한 식과 같이 이의 최대 가속도와 저크로 각 항을 나누어 무차원화 시킨 후 최적화 지수가 가장 작은 곡선식을 택하는 방법을 취하였다.

연구를 위해 접근한 식은 3 차 스피라인(cubic spline) 곡선식이며 이 식들을 연결하여 원하는 동특성을 가장 잘 나타내는 최적화된 식을 결정하고자 하였다. 다항식은 여러 차수가 가능하지만 일반적으로 계산의 불확실성을 피하기 위해 1, 3, 5, 7 차와 같이 홀수 차수를 가진 식을 사용하며 이 중에서 가속도의 연속성과(무한대 저크를 포함) 저크까지의 함수 값을 보장하기 위해 3 차식 이상을 사용하는 것이 바람직함을 알 수 있다. 그러나 차수가 올라갈수록 곡선의 떨림 현상이 심해지며 계산량의 증가되므로 3 차를 접근 차수로 정하였다.⁸

5. 3 차 스피라인을 이용한 최적 경로의 생성과 최대 가속도·저크의 경향

5.1 3 차 스피라인 곡선식과 가속도·저크 특성

3 차 스피라인 곡선식의 기본 형태는 다음과 같으며 이는 3 차 다항식의 계수를 다항식의 경계점의 위치와 기울기로 다시 표현한 식이다.

$$P = P_{i-1} + P'_{i-1}t + [3(P_i - P_{i-1}) - 2P'_{i-1} - P'_i]t^2 + [2(P_{i-1} - P_i) + P'_{i-1} + P'_i]t^3 \quad (11)$$

식 (11)은 시간 t 에 대한 위치 P 의 관계를 함수를 나타낸 것이며 각 항의 계수인 P 은 그 점에서의 스피라인의 기울기를 뜻한다. 즉 하나의 스피라인 식이 정의 되기 위해서는 양 단의 위치 및 속도에 대한 4 개의 조건이 있어야 하는 것이다. 그러나 여러 곡선식을 연결하는 경우 가장 처음과

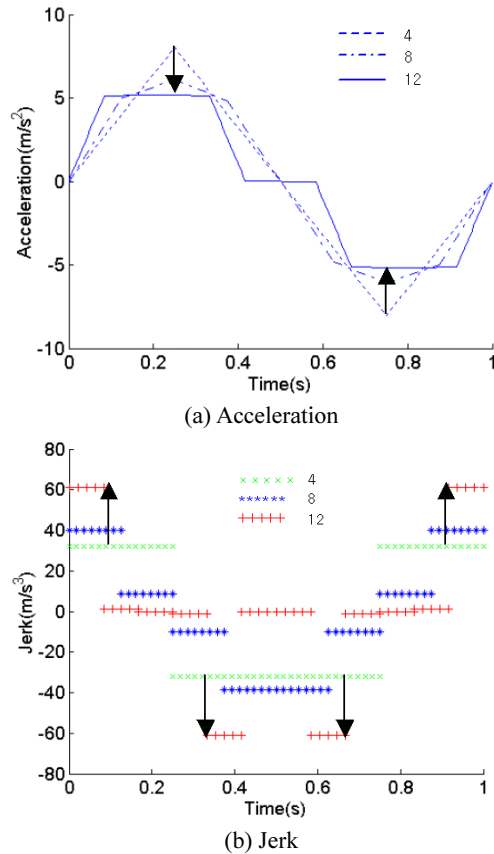


Fig. 3 Changes in acceleration and jerk graphs according to the number of splines

끝의 조건을 제외한 나머지는 위치와 기울기(속도) 및 기울기의 변화량(가속도)이 연속되어야 하므로 연립방정식으로 표현하여 풀 수 있다. 위의 식을 $i=0, 1, 2, \dots, n$ 까지 전개하고 2 차 미분의 연속성을 위해 각 경계점에서의 두 곡선의 2 차 미분량이 같다고 놓고 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 2 차 미분량이 경계점을 둔 두 곡선에서 서로 같다는 조건에 의해,

$$\left. \frac{d^2 P_i}{dt^2} \right|_{t=1} = \left. \frac{d^2 P_{i+1}}{dt^2} \right|_{t=0}, \quad (t=0 \sim 1) \quad (12)$$

$$P'_{i-1} + 4P'_i + P'_{i+1} = 3(P_{i+1} - P_{i-1}) \quad (13)$$

식 (13)의 형태로 나타낼 수 있고, 이를 연립하여 풀기 위해 $i=0, 1, 2, \dots, n$ 을 대입하여 정리하고 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P'_0 \\ P'_1 \\ P'_2 \\ \dots \\ P'_{n-1} \\ P'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3P_1 - 3P_0 \\ 3P_2 - 3P_0 \\ 3P_3 - 3P_1 \\ \dots \\ 3P_n - 3P_{n-2} \\ 3P_n - 3P_{n-1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$[A][T] = [C] \quad (15)$$

식 (15)에서 행렬 A 는 식 (14)의 좌변항의 계수를, 행렬 T 는 스플라인 경계점의 기울기를, 행렬 C 는 식 (14)의 우변항을 나타낸다. P_o 와 P_n 은 각각 시작점과 끝점의 위치로써 이미 알고 있는 값이며 원하는 구간 수가 결정되면 이에 따라 각 구간의 경계점의 위치를 대입하여 반복적으로 계산하여 식 (16)을 이용해 최적화 지수를 최소화하는 값을 선택할 수 있다.

$$[T] = [A]^{-1}[C] \quad (16)$$

스플라인을 조합하여 하나의 곡선식을 결정할 경우 스플라인의 수에 따라 전체적인 속도, 가속도 및 저크의 값이 달라진다. Table 2 는 식(16)에 스플라인의 수를 달리하여 각 경계점의 위치를 반복 대입하고 그래프를 그려 최대치를 구한 결과로 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 스플라인의 수가 증가할수록 최대 가속도는 적어지고, 최대 저크는 증가함을 알 수 있다. 그러므로 적정 스플라인 수를 결정해야 할 필요가 있다.

5.2 최적 3 차 스플라인 곡선식

전체적인 가속도 및 저크 특성의 경향을 최적화 지수의 값을 따라 파악해 보면 스플라인의 수가 10 개일 때 가장 그 값이 크고 그 이후부터는 조금씩 줄어들으나, 그 폭이 매우 작아서 그 이상의 구간 수의 증가는 불필요한 계산을 초래할 뿐임을 알 수 있다. Table 3 을 통해 식 (10)의 가속도와 저크 각각에 4:6 의 가중치를 주었을 경우 스플라인이 6 개일 때가 최적임을 확인할 수 있었다. 또한 가중치를 약간씩 변화시켜 가며 5:5 및 6:4 로 가중치를 주었을 경우에도 동일한 결과를 얻을 수

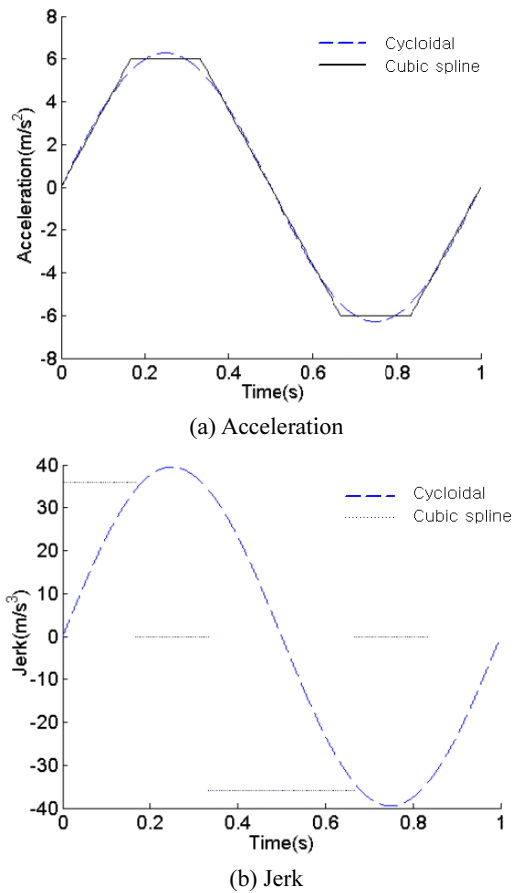


Fig. 4 Comparison of the cycloidal and optimized spline graph

있었다.

6 개의 스플라인을 연결하여 만든 식으로 2 차, 3 차 미분을 하여 그래프를 그리고 이를 최적화의 기준으로 삼았던 사이클로이드 그래프와 비교한 결과는 Fig. 4 에 나타나 있다. 이 결과는 최적화된 곡선식의 특성이 사이클로이드와 비교해서 최대 가속도의 경우 4.46 %, 그리고 최대 저크는 9.51 % 만큼 줄어들음을 나타내 주는 것이다.

본 연구의 결과를 활용하면 가중치의 변화를 통해 최적 원점 자세를 구하고 속도, 가속도, 저크 등 동특성을 기구의 구조 및 용도에 맞게 구현하는 원점 복귀 경로를 얻을 수 있다. 또한, 복귀 경로 뿐 아니라 pick-and-place 공정에서도 대상물체나 조립오차에 충격을 주는 것을 최소화하면서 이동시킬 수 있는 최적화된 경로식을 구하는데 활용할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서 언급한 연구 내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Eclipse-II 는 3 차원 공간상의 모든 회전운동을 구현해 줄 수 있으므로 임의의 위치에서 정지하는 상황이 발생시에 다양한 역기구학의 해를 지니고 있다. 그러나 탑승자의 안전을 위해 최적의 원점으로 최적의 경로를 통해 원점으로 복귀하도록 하는 연구를 수행하여 최적 원점을 정의하였고 3 차 스프라인으로 최적의 동역학적 특성을 지니는 경로를 설계했다.

(2) 스프라인의 수에 따른 최대 가속도 및 저크 값의 변화를 관찰하여 스프라인이 6 개 일 때 최적화 지수가 최소가 됨을 알 수 있다.

(3) 최적화 된 3 차 스프라인은 저크 특성의 우위로 인해 비교 대상으로 설정했던 사이클로이드 곡선 보다 최대 가속도의 경우 4.46 %, 최대 저크의 경우 9.51 % 만큼 줄어드는 결과를 나타냈다.

(4) 본 연구 결과는 병진운동이 없더라도 3 차원 무제한 회전이 가능한 모션 시뮬레이터에 적용하여 인간공학적 관점에서 탑승자를 고려한 최적의 복귀 경로를 설계하는 데에 응용될 수 있다.

참고문헌

1. Salcudean, S. E., Drexel, P. A., Ben-Dov, D., Taylor, A. J. and Lawrence, P. D., "A six degree-of-freedom, hydraulic, one person motion simulator," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2437-2443, 1994.
2. Kim, J., Hwang, J.-C., Kim, J.-S., Park, F. C. and Cho, Y. M., "Eclipse-II : A New Parallel Mechanism Enabling Continuous 360-degree Spining Plus Three-axis Translational Motion," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 3274-3279, 2001.
3. Hwang, J.-C., "Analysis and design of the Eclipse-II parallel mechanism for motion simulators," School of Mechanical and Aerospace Engineering, Ph.D, Seoul National University, 2002.
4. Kim, S., Jeon, D., Shin, H., In, W. and Kim, J., "Design and Analysis of Decoupled Parallel Mechanism with Redundant Actuator," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing,

Vol. 10, No. 4, pp. 93-99, 2009.

5. Kinzel, W., "Kinematics, dynamics and design of machinery," Jone Wiley & Sons, 1999.
6. MacCarthy, B. L. and Burns, N. D., "An evaluation of spline function for use in cam design," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 199, No. 3, pp. 239-248, 1985.
7. Tsay, D. M. and Huey, C. O. Jr., "Cam motion synthesis using spline functions," Trans. ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 110, No. 2, pp. 161-165, 1988.
8. Park, J.-K., "Minimum time trajectory planning for a robot manipulator amid obstacles," Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 78-86, 1998.