새로운 개념의 운동 재현용 병렬기구 이클립스-II 를 위한 운동계획 알고리즘

Motion Planning Algorithm of the Eclipse-II, A New Conceptual Parallel Mechanism for Motion Simulator

*이성철 [1], #김종원 [1], 이동훈 [1]
*Sungcheul Lee[1], #Jongwon Kim(jongkim@snu.ac.kr)[1] , Donghun Lee[1]
[1] 서울대학교 기계항공공학부

Key words : Motion Planning, Motion Simulator, Parallel Mechanism

1. 서론

운동 재현기는 가상 현실 구현 장치와 운동 구동기를 결합하여 사용자에게 시각적인 현실감을 제공해 줌과 동시에 운동감을 느낄 수 있도록 하여 실제 상황을 모사해 주는 시스템이다. 비행사의 훈련용으로 이용되는 비행 시뮬레이터, 실제 놀이기구에 탑승한 것과 같은 재미를 주는 롤러코스터 시뮬레이터 등이 대표적인 예이다.

이러한 모션 시뮬레이터의 운동 구동기로는 지금까지 주로 스튜어트 플랫폼 또는 이를 변형한 구조의 다자유도 운동 재현기가 이용 되었다. 스튜어트 플랫폼은 6 자유도 운동이 가능하긴 하지만, 회전운동의 범위가 ±20~30° 정도로 제한적이어서 물체가 상하로 뒤집어지는 운동은 재현이 불가능하고, 맥스 플라이트와 같은 운동 재현기는 회전 운동만을 구현하여 360° 이상의 회전이 가능하지만, 병진운동은 불가능하다는 단점이 있다.

이러한 운동 재현기의 단점을 극복하기 위해 이클립스-II 구조가 제안되었다[1]. 이클립스-II 는 X, Y, Z 병진운동과 A, B, C 회전운동의 6 자유도 운동을 구현함은 물론, 플랫폼의 360° 이상 무한 회전이 가능하기 때문에 비행기나 롤러코스터 등의 모션 시뮬레이터에 응용될 경우, 보다 현실에 가까운 운동감을 사용자에게 전달해 줄 수 있게 된다.

그렇지만 이클립스-II 수평의 원형 가이드 위에 한 개의 원형 칼럼과 두개의 수직 칼럼이 이송하여 직선운동과 회전 운동을 구현하는 구조를 가지기 때문에, 360° 이상 회전이 가능한 장점에도 불구하고 특정 방향으로의 회전 운동 시 제한이 가해지는 한계를 가지고 있다.

이러한 회전의 제약을 극복하기 위해 ±90° 회전이 가능한 쾌속시작기용 병렬기구형 공작기계 이클립스-RP 는 ZYZ 오일러 회전각을 사용하고 있다[2]. 하지만 이 공작기계에서 롤링 모션을 구현하기 위해서는 Z, Y, Z 모든 회전을 동시에 해주어야 하기 때문에 시간 지연을 초래하게 된다.

이런 이유로, 이클립스-II 기계 구동을 위해서는 회전에 적용할 수 있고, 출력 값을 표현하는데 있어서 입력 값과의 시간 지연을 줄일 수 있는 새로운 회전 방법이 필요한 것이다. 이 논문에서는 이런 조건에 맞는 최적화된 해를 구하는 알고리즘을 생성하고자 하는 것이다.

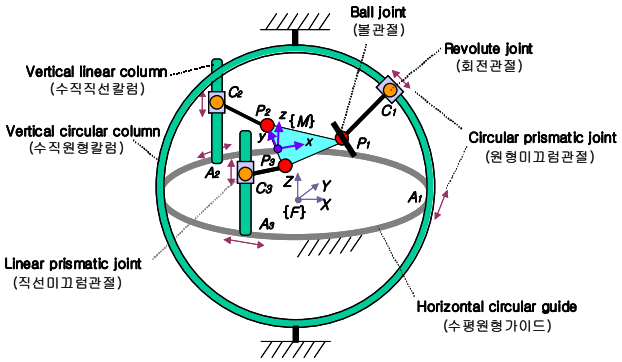

Fig. 1 Schematic diagram of Eclipse-II structure

2. 이클립스-II 의 구조 및 한계점 해결방안

이클립스-II 는 고정된 원형 가이드를 따라 각각 독립적으로 움직이는 세 개의 PPRS 직렬 기구로 구성된다. 여기에서 P 는 이송 조인트(Prismatic Joint), R 은 회전 조인트(Revolute Joint), S 는 볼 조인트(Ball Joint)를 나타낸다. 이클립스-II 는 기존 6 축 6 자유도에, 특이점 회피를 위해 자유도를 추가하여 총 8 축 7 자유도를 가진다. 기본 구조는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 1 개의 수직 원형 칼럼과 2 개의 수직 직선 칼럼이 수평 원형 가이드 위를 움직이며, 플랫폼과 볼 조인트(Fig. 1 에서 P_i)로 연결된 3 개의 링크가 원형 칼럼에 회전 관절(Fig. 1 에서 C_1), 그리고 수직 직선 칼럼에 직선 미끄럼관절(Fig. 1 에서 C_2, C_3)로 연결되어 칼럼 위를 움직인다.

이러한 구조를 통해 이클립스-II 의 플랫폼은 작업영역 내의 어느 위치에서나 모든 방향으로 이송이 가능하며, 원형 가이드와 원형 칼럼을 이용하여 피치 모션과, 요 모션이 360° 이상 연속적으로 가능하다. 그렇지만 원형 칼럼이나 원형 가이드를 이용하는 피치 모션과 요 모션과는 다르게 롤 모션은 2 개의 수직 칼럼을 사용하게 된다. 이 수직 직선 칼럼들을 사용하기 때문에 롤 회전은 제한을 받게 된다.

이클립스-II 플랫폼 자체의 롤 모션에 있어서 한계가 있음을 알아보았다. 이것은 볼조인트에 의해 더욱 극명히 드러난다. 기계에 사용되는 볼 조인트(Fig. 1 에서 P_2, P_3)는 수평면에 대해서 최대 45°까지만 움직일 수 있는 한계를 가진다(Fig. 2). 여기에 플랫폼이 홈위치에 있을 때의 볼조인트와 연결된 링크의 초기값을 고려하면, 플랫폼의 가능한 회전 각도는 실제로 -17°에서 +17°로 제한된다. 이로 인해 홈 위치에서는 17° 이상의 롤 모션을 구현할 수 없기에, 이것을 가능하게 하기 위해서 새로운 방법이 필요했다. 이에 우리는 여분의 자유도를 추가함으로써 이런 플랫폼 롤 모션의 한계를 극복하고자 하였다.

이클립스-II 는 이 문제의 해결을 위해 플랫폼의 회전뿐만 아니라 탑승자의 의자를 회전 가능하게 함으로써 여분의 자유도를 추가하였다. 이를 이용하여 플랫폼의 모션과 의자의 모션을 제어함으로써, 탑승자가 입력된 모션과 같은 모션을 느끼도록 하려는 것이다.

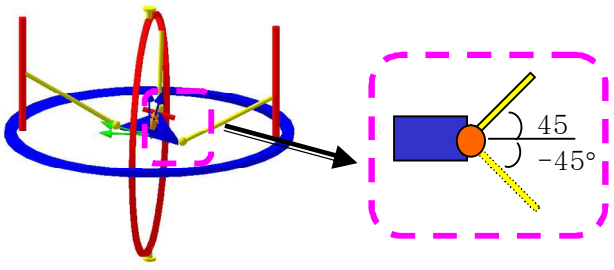

Fig. 2 Limitation of ball joint

3. 최적해 알고리즘

4 자유도의 최적해를 찾는 알고리즘은 주어진 3 자유도의 입력 값에 대해서 4 자유도의 동일한 해의 집합을 구한 후, 최적의 해를 선택하는 것이다.

이 논문에서는 이클립스-II 의 입력되는 사람 자세 좌표를 ZYX 오일러 각도라고 정의하였다. 반면 4 자유도의 기계 회전은 플랫폼 회전에 의자의 회전(Z 축 회전)을 더한, ZYXZ 오일러 회전으로 정의하였다. 단 플랫폼의 롤 회전인 X 축 회전은 -17°에서 +17°로 제한 받게 된다. 이제 3 자유도를 가지는 사람의 자세 좌표(p,q,r)를 4 자유도의 기계 자세 좌표(a,b,c,d)로 맵핑하고, 이중 적절한 데이터를 선정하는 알고리즘을 개발하고자 한다.

(1) 사람의 자세에 해당하는 회전행렬을 계산한다.

$$R_{zyx}(p,q,r) = ROT(\hat{z},p)ROT(\hat{y},q)ROT(\hat{x},r) \quad (1)$$
$$= \begin{bmatrix} r11 & r12 & r13 \\ r21 & r22 & r23 \\ r31 & r32 & r33 \end{bmatrix}$$

여기에서, $R_{zyx}(p,q,r)$은 ZYX 오일러 회전을 나타내며, ROT(x, θ)는 x 축 주위로 θ 만큼 회전하는 것으로 정의한다.

(2) 의자의 회전까지 고려한 기계의 회전 행렬을 구한다.

$$R_{zyxz}(a,b,c,d) = ROT(\hat{z},a)ROT(\hat{y},b)ROT(\hat{x},c)ROT(\hat{z},d) \quad (2)$$
$$= \begin{bmatrix} cacbcd + casbscsd - saccsd & -cacbsd + casbscсd - saccсd & casbcc + sasc \\ sacbcd + sasbscsd + caccsd & -sacbsd + sasbsccd + caccсd & sasbcc - casc \\ -sbcd + cbscsd & sbsd + cbsccd & cbcc \end{bmatrix}$$

ca 는 cos a 를, sa 는 sin a 를 간단히 쓴 것이다.

(3) 기계 자세 좌표 a, b, d 값을 c 값을 기준으로 계산하면 다음과 같다.

$$b = \cos^{-1}\left(\frac{r33}{cc}\right) \quad (3)$$

$$a = \cos^{-1}\left(\frac{-(sc)(r23) \pm \sqrt{(s^2c)(r23)^2 - (s^2bc^2c + s^2c)(r23^2 - s^2bc^2c)}}{s^2bc^2c + s^2c}\right) \quad (4)$$

$$d = \cos^{-1}\left(\frac{(cb)(sc)(r32) \pm \sqrt{(c^2b)(s^2c)(r32)^2 - (c^2bs^2c + s^2b)(r32^2 - s^2b)}}{c^2bs^2c + s^2b}\right) \quad (5)$$

(4) 한계값 c 값의 범위(-17°~ +17°, 원점위치) 내의 값들을 대입하면서 a, b, c, d 의 해집합을 구할 수 있다. X(n, k)={a(n,k), b(n,k), c(n,k), d(n,k)}의 집합으로 표시한다. X(n, k) (1≤k≤s, n, k 는 정수, s 는 동일한 해의 개수)는 n 번째 입력 값의 a(n,k), b(n,k), c(n,k), d(n,k) 집합이다.

(5) 이런 해 집합 중에서 모션을 구현 하기 위해서 근접해 선택 방식을 사용하였다.

X(n,0)={a(n,0),b(n,0),c(n,0),d(n,0)}

X(n,0)={a(n,k),b(n,k),c(n,k),d(n,k}|min[{a(n,k)-a(n-1,0)}^{2}+{b(n,k)-b(n-1,0)}^{2}+{c(n,k)-c(n-1,0)}^{2}+{d(n,k)-d(n-1,0)}^{2}]}

이상에서 구한 X(n,0)의 포인트를 지나감으로써 최적의 모션으로 패스를 지나갈 수 있다.

4. 실제 운동에 적용한 시뮬레이션

현재 개발된 이클립스-II 의 워킹 샘플의 각속도(120deg/s), 각가속도(400deg/s^2) 값을 기준으로 구현이 어려운 X 축 롤(Roll) 모션에 대해서 살펴보도록 한다.

이 모션은 이클립스-RP 의 ZYZ 오일러 회전 알고리즘을 사용하면 롤 각이 0°에서 20°까지 회전하는데 1.04 초의 시간 딜레이 후에 0.32 초로 가는 것이 가능하다. 즉 0°에서 20°를 가는 시간은 총 1.36 초 걸린다.

입력 모션은 원점에서 롤링 각도를 20°씩 180°까지 증가시키면서 해의 경향을 비교해보았다.

4.1. 구한 해의 경향

c 값이 -17°~ +17°의 범위 내에서 0.02°씩 증가하기 때문에 같은 자세에 대해서 많은 해를 가지게 되고, 이것은 그래프에서 같은 색깔로 표시된다(Fig.3). 즉 같은 색깔 띠 위에 있는 점들은 사람의 자세 좌표가 되는 후보가 된다.

4.2. 구한 해를 추적하는 알고리즘 대입

4.1 절에서 구한 동일해 그래프와 3 장에서 설명한 근접해 선택 알고리즘을 바탕으로 해를 구한 결과를 나타내었다. 처음 값에서 다음 자세에 해당하는 점들의 집합 중에서 가장 거리가 가까운 점들을 선택한다. 그리고 그렇게 선택된 점에서 다음 해집합에서 가장 가까운 점을 선택하는 작업을 반복하였다. 결과의 점들을 연결하였다. (Fig. 3)

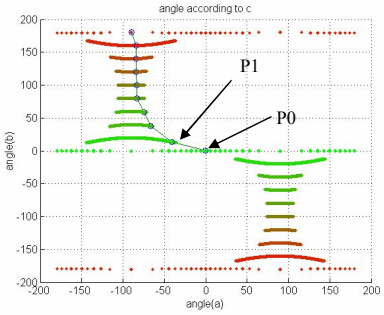

Fig. 3 Tracking of solutions of view of a-b plane

4.3 알고리즘 사용 결과

Fig. 3 그래프에서 알 수 있는 포인트 사이의 간격이 큰 부분, 즉 시간 지연이 많이 일어나는 부분은 P0 에서 다음 각을 나타내는 P1 사이가 된다. 이는 입력 데이터의 X 축 롤링 모션, 0°에서 20° 사이 회전 값을 나타내게 된다. 이 범위에서의 기계 움직임에 대해서 살펴보도록 하자. 이 때 a 는 –40.3°, b 는 13.4°, c 는 15° 그리고 d 는 42.6°를 회전해야 한다. 이때 회전이 많이 필요한 d 각을 기준으로 살펴보자. 기계가 최대 각속도와 각가속도로 42.6°를 움직여야 하며, 이클립스-II 워킹 샘플에서는 0.5 초가 소요된다. ZYZ 오일러 회전을 사용했을 경우 1.36 초 걸리는 반면, ZYXZ 오일러 회전을 사용 시 0.5 초 소요된다.

5. 결론

본 논문에서 언급한 연구 내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 이클립스-II 의 롤링 운동의 시간 딜레이를 줄이기 위해 탑승자의 의자 회전을 추가하여 기존의 8 축 7 자유도 기구를 9 축 8 자유도 운동기구로 변형하였다.

(2) 이클립스-II 의 모션 플래닝을 위해 ZYZ 오일러 회전과는 다른 ZYXZ 라는 변형된 좌표계의 행렬을 생성하였다. 제한된 X 축 회전 범위내에서 행렬의 역기구학식을 풀어서 각각의 회전 값 a, b, c, d 의 집합을 구하였다.

(3) 근접 해 선택 알고리즘을 사용하여 입력된 자세 행렬과 같은 행렬의 해를 구하였다. 이 모션플래닝을 적용함으로써 1.36 초의 회전 시간을 0.5 초로 63% 감소시켰다.

후기

이 논문은 2007 년 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음

참고문헌

1. Jongwon Kim, Jae-Chul Hwang,Jin-Sung Kim, F.C.Park and Young Man Cho, 2001, “Eclipse-II : A New Parallel Mechanism Enabling Continuous 360-degree Spining Plus Three-axis Translational Motion”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001 / 6
2. Jongwon Kim, Kwang Sup Cho, Jae Chul Hwang, Cornel C. Iurascu and Frank C. Park, 2002, “Eclipse-RP: A New RP Machine Based on Repeated Depositon and Machining”, *Journal of Multi-body Dynamics,* 2002