

다자유도 기계 시스템의 모션 제어를 위한 동기된 온라인 궤적 생성 방법

Synchronized On-line Trajectory Generation Method for Mechanical System with Multiple Degrees-of-Freedom

원 대 희* · 신 은 철†

(Daehee Won, Eunchol Shin)

Abstract - This work presents a synchronized on-line trajectory generation algorithm for mechanical system with multiple degrees-of-freedom. Proposed algorithm is designed to generate time-optimized trajectories and synchronized trajectories under the constraints such as maximum speed, acceleration, deceleration, non-zero initial velocity, etc. Also, because of small computation time, therefore this can be applied in real-time and it is easier to change the trajectory when an event occurs. We verified the feasibility through various trajectory generation.

Key Words : Trajectory generation, Time-optimal trajectory, Synchronized trajectory

1. 서 론

산업용/서비스 로봇, 기계 등 다자유도를 가지는 기계 시스템의 모션 제어를 위해 각 축을 이루고 있는 구동기의 궤적 생성은 매우 중요한 요소이며, 모션 제어를 위해서는 기하학적인 관점에서의 경로생성과 위치, 속도, 가속도 등 시간에 따른 진행 관점에서의 궤적 생성이 필수적이다. 특히 궤적 생성은 시스템의 정밀도에 매우 큰 영향을 미치는 요소이기 때문에 이전에는 시스템을 정밀하거나 빠르게 운용하기 위한 궤적 생성과 부드러운 궤적 생성 방법들에 대한 연구가 많이 이루어졌다[1]. 특히, Cubic/Trigonometric spline 등을 이용한 로봇의 동기 궤적 생성을 위한 연구가 이루어졌으나[2,3], 이러한 방법들은 부드러운 궤적을 생성하기 위해서는 이점이 있으나 대부분이 오프라인에서 미리 설계된 궤적들을 주로 사용하기 때문에 실시간으로 로봇의 궤적을 변경시키거나 동기 시키기 위한 응용분야에서는 사용이 불가능하다. 그래서, 최근에는 온라인 상태에서 시간 최적화된 궤적생성 방법, 가속도/저크 등 다양한 구속조건하에서의 궤적생성 방법에 대한 연구가 많이 진행 되었다[5,6,7]. 일반적인 산업용 및 서비스 로봇의 제어를 위해서는 로봇의 경로계획과 계획된 경로를 추종하는 제어 단계로 이루어져 있으며, 제어를 위해서는 기구학 및 동역학의 운동방정식의 수치 해를 구하는 과정이 필요하며, 이러한 과정은 대부분 실시간으로 이루어져야 한다. 최근에는 로봇의 경로 추종 제어 성능을 향상시키기 위해

서 강인제어, 적응제어, 수동성기반 제어 등 로봇 동역학 기반의 제어 알고리즘이 사용되고 있기 때문에 경로계획과 로봇 제어 알고리즘 적용을 위해서는 많은 연산량을 필요로 한다[8,9]. 많은 고급의 온라인 궤적 생성 알고리즘이 존재하지만, 대부분이 복잡하고 연산시간이 커서 시스템을 운용할 때 어떠한 이벤트가 발생 하였을 경우 온라인상에서 궤적 수정이 어려웠으며, 동역학 기반의 고급 제어 알고리즘과 함께 사용하기에는 고성능의 프로세서가 요구되었다. 따라서 본 논문에서는 다자유도를 가지는 시스템이 사용되는 산업 현장의 응용분야에서 온라인에서 궤적생성 및 변경이 용이한 온라인 동기 궤적 생성 방법에 대해 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존의 2차 다항식 기반의 알고리즘에 대한 내용을 간략히 정리하였고, 3장에서는 동기화된 궤적 생성 알고리즘을 제안하고, 제4장에서는 다양한 궤적 생성 결과를 보여주고 마지막 장에서는 연구 결과에 대해 정리하고 결론을 맺는다.

2. 2차 다항식 기반의 궤적 생성 알고리즘

본 논문에서는 저크 제한에 대한 것은 고려하지 않고 오직 속도와 가속도의 범위만을 고려하였다. 일반적으로 많이 사용되는 2차 다항식 형태의 알고리즘인 사다리꼴 형태의 속도 궤적 생성 알고리즘은 주어진 조건에서의 시간 최적화된 궤적 생성 알고리즘이라 말할 수 있다. 이 방법은 그림 1에서와 같이 전환 시간 T_1 , T_2 , T_f 에 의해서 가속구간, 등속구간, 감속구간 등 3단계의 구간으로 나누어 궤적을 생성하게 된다. 이러한 2차 다항식 기반의 궤적 생성 알고리즘에서의 위치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

† Corresponding Author : Robotics R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Korea.
E-mail: unchol@kitech.re.kr

* Robotics R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Korea.

Received : April 19, 2017; Accepted : July 27, 2017

$$x(t, x_0, v_0, a) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (1)$$

이미 알려진 바와 같이 식 (1)과 같은 2차 다항식 기반의 궤적 생성 알고리즘은 3단계의 궤적 형태를 가지고 있음을 알 수 있다. 첫 번째로 초기 속도에서 목표 속도까지 일정한 가속도로 이동하는 궤적 형태를 임계 프로파일로 정의하였다. 임계 프로파일에서의 이동 거리 Δx^c 는 $\Delta x = x_f - x_i$ 와 $\Delta v = v_f - v_i$ 로 정의할 때 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta x^c = \frac{s_v (v_f^2 - v_i^2)}{2a} \quad (2)$$

여기에서 $s_v = \text{sign}(\Delta v)$ 이다. 즉, 임계 프로파일은 $\Delta x = \Delta x^c$ 인 경우이다. 두 번째로 이동 거리가 임계 프로파일에서의 이동 거리보다 큰 경우($\Delta x > \Delta x^c$)를 상한 임계 프로파일로 정의하고, 마지막으로 임계 프로파일에서의 이동 거리보다 작은 경우($\Delta x < \Delta x^c$)를 하한 임계 프로파일로 정의하였으며 그 형태는 그림 2에 나타내었다[7].

그리고 상한/하한 임계 프로파일의 경우에서도 이동할 때 낼 수 있는 최대 속도의 크기에 따라서 속도 궤적이 삼각형 형태 또는 사다리꼴 형태의 궤적을 가질 수 있다. 이를 판별하기 위해 주어진 가감속도로 낼 수 있는 최대 속도값은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{Case } a = d: v_p = \sqrt{\frac{1}{2}(v_f^2 + v_i^2) + s_p a \Delta x} \quad (3)$$

$$\text{Case } a \neq d: v_p = \sqrt{\frac{1}{a+d}(a v_f^2 + d v_i^2) + 2 s_p a d \Delta x} \quad (4)$$

여기에서 $s_p = \text{sign}(\Delta x - \Delta x^c)$ 이다.

만약 식 (3), (4)의 피크 속도 v_p 가 설정된 최대 속도 v_{\max} 보다 작을 경우, 즉 $v_p \leq v_{\max}$ 일 때는 가속, 감속 등 2단계 삼각형 형태의 속도 궤적이 생성되며, 반대인 $v_p > v_{\max}$ 인 경우에는 그림 1과 같이 가속, 등속, 감속 등 3단계 사다리꼴 형태의 궤적이 생성된다. 이때 2단계 삼각형 형태의 속도 궤적의 전환 시간은 다음과 같이 계산된다.

$$T_1 = \frac{s_p v_p - v_i}{s_p a}, T_f = T_1 + \frac{v_f - s_p v_p}{-s_p d} \quad (5)$$

그리고 사다리꼴 형태 궤적의 전환 시간은 다음과 같이 계산된다.

$$T_1 = \frac{s_p v_{\max} - v_i}{s_p a} \quad (6)$$

$$T_2 = \frac{d(s_p v_{\max} - v_i)^2 - a(v_{\max}^2 - v_f^2) + 2 a d s_p \Delta x}{2 a d v_{\max}} \quad (7)$$

$$T_f = T_2 + \frac{v_f - s_p v_{\max}}{-s_p d} \quad (8)$$

주어진 $x_i, x_f, v_i, v_f = 0, a, d$ 등의 파라미터와 식 (6)~(8)에서 계산된 s_p, v_p, T_1, T_2, T_f 를 이용하여 그림 1과 같은 2차 다항식 기반의 궤적 생성이 가능하다.

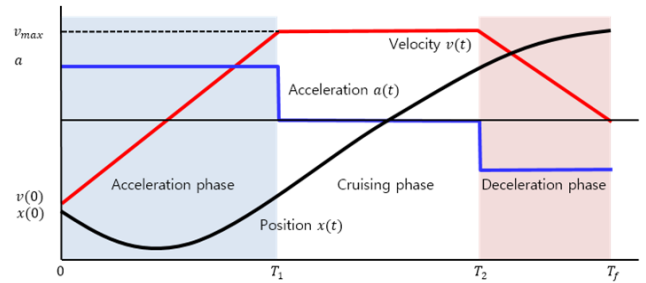
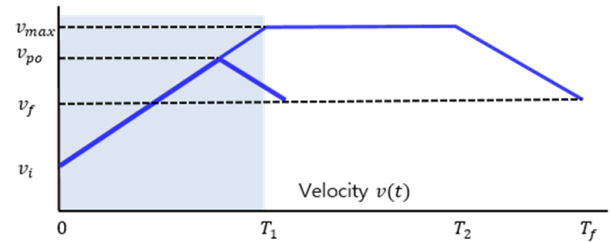
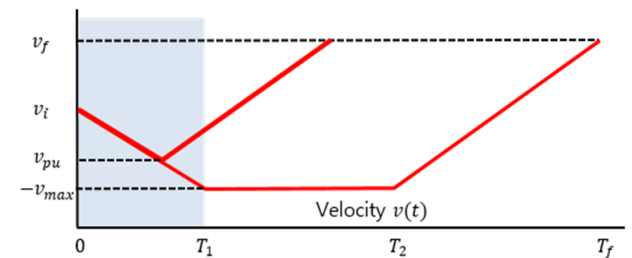


그림 1 2차 다항식 기반 궤적 생성 알고리즘의 위치, 속도, 가속도 프로파일

Fig. 1 Second-order polynomial based profile



(a) 상한 임계 속도 프로파일
(a) Over-critical profiles



(b) 하한 임계 속도 프로파일
(b) Under-critical profiles

그림 2 Δx 와 Δx^c 의 크기 비교 기반의 속도 프로파일 분류 [7].

Fig. 2 Velocity profiles classification depending on the comparison between Δx and Δx^c [7].

3. 동기 궤적 생성 알고리즘

일반적으로 산업현장에서는 로봇 팔과 같은 다축 서보 시스템이 반복되는 작업 수행을 위해서 end-effector단의 point-to-point 위치이동 운동이 주를 이룬다. 이때 각 축은 최대속도, 가속도 등 설정 값에 의해 앞 절에서 언급한 형태의 궤적 생성 알고리즘 또는 S-curve 등 다양한 궤적 생성 알고리즘을 통해 생성된 궤적으로 운동하게 된다. 이 방법들을 시간 최적화된 궤적이며, 각 축은 최대의 속도로 이동 후 개별 정지하게 된다. 그러나 end-effector 단에서의 point-to-point 위치이동은 여러 개의 축 모두가 목표위치에 도달해야 하며, 최종 도달 시간은 가장 늦게 목표 위치에 도달하는 축의 구동시간으로 결정된다. 즉, 특정 축이 빠른 시간 안에 목표위치에 도달하여도 가장 늦은 축의 구동이 끝나기 전까지 다음 구동을 시작하지 못하고 정지해 있게 된다. 또한, 모든 축이 최대 가속 및 최대 속도로 동시 운동되기 때문에 구동기의 수명이 줄어들게 된다.

본 논문에서는 이러한 시스템을 운용할 때 온라인상에서 가장 늦은 축의 구동 시간에 나머지 빠른 구동 시간을 가지는 축의 구동 시간을 낮은 축의 구동시간의 시작과 끝 시간을 동기화 구동하기 위한 궤적 생성 알고리즘에 대해 제안하고자 하며, 동기화 시간은 가장 늦은 축 뿐만 아니라 임의 특정 축의 구동 시간을 동기 시간으로 선택하고 나머지 축을 특정 축의 구동 시간에 맞춰 동기 궤적 생성이 가능하다.

동기화 궤적 생성을 위해서는 먼저 주어진 구속조건과 최종 목표 이동을 위한 2절의 시간 최적화 궤적 생성 알고리즘을 통해 각 축의 구동시간 T_f 계산이 선행되어야 한다. 이때 가장 긴 구동시간을 동기 구동시간 t_f^{sync} 로 결정한다. 그리고, 각 축의 초기 속도 v_i 와 감속도 d 로 목표 위치 x_f 까지 도달 하는데 걸리는 시간 t_f^{lim} 을 아래 식을 이용해 계산되며, 이 때 속도 궤적은 그림 3의 검정색 선과 같은 형태를 가진다.

$$t_f^{lim} = \frac{\Delta x}{v_i} + \frac{v_i}{2s_p d} \quad (9)$$

식 (9)에서 계산된 t_f^{lim} 과 t_f^{sync} 의 크기에 따라서 동기 축을 제외한 나머지 축의 궤적 형태가 사다리꼴 또는 2단 감속 경사 형태인지 결정된다. 이러한 판단을 위해 $s_t = \text{sign}(t_f^{lim} - t_f^{sync})$ 로 정의한다.

그림 3에서 보는 바와 같이 $s_t = 1, t_f^{lim} > t_f^{sync}$ 일 경우에는 동기 구동시간보다 해당 축의 구동시간이 크기 때문에 사다리꼴 형태로 가속하여 구동시간을 줄여야 한다.

반대인 $s_t = -1, t_f^{lim} < t_f^{sync}$ 인 경우에는 동기 구동시간보다 해당 축의 구동시간이 작기 때문에 감속하여 구동시간을 키워 동기 구동시간과 같게 만들어야 한다. 이때 동기 기준 축을 제외한 나머지 축의 구동시간이 동기 구동시간과 동일하게 하기 위한 최

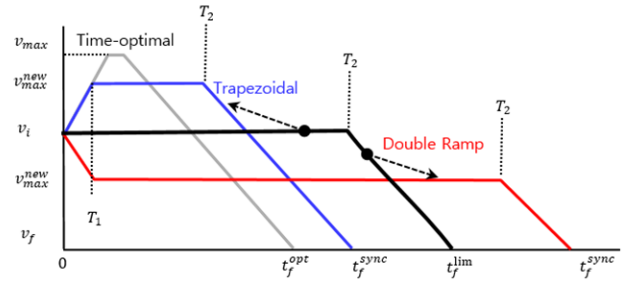


그림 3 동기 시간 t_f^{sync} 와 t_f^{lim} 크기 비교에 따른 속도 프로파일
Fig. 3 Velocity profiles depending on the synchronization time t_f^{sync} vs. t_f^{lim}

대 속도 v_{max} 를 다시 계산하여야 하며 이때 각 축의 새로운 최대 속도를 v_{max}^{new} 로 정의 하였고, 각 경우에 따른 최대 속도 v_{max}^{new} 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

1. Case $s_t = 1$: 사다리꼴 프로파일

$$v_{max}^{new} = \frac{(adt_f^{sync} + s_p dv_i)}{a + d} - \frac{\sqrt{(adt_f^{sync} + s_p dv_i)^2 - (a+d)(dv_i^2 + 2s_p ad \Delta x)}}{a + d} \quad (10)$$

2. Case $s_t = -1$: 2단 감속 경사 프로파일

2-1. case $a \neq d$:

$$v_{max}^{new} = \frac{(adt_f^{sync} - s_p dv_i)}{a - d} - \frac{\sqrt{(adt_f^{sync} - s_p dv_i)^2 - (a-d)(dv_i^2 + 2s_p ad \Delta x)}}{a - d} \quad (11)$$

2-2. case $a = d$:

$$v_{max}^{new} = \frac{2s_p a \Delta x - v_i^2}{2at_f^{sync} - 2s_p v_i} \quad (12)$$

앞 2절에서 언급한 각 축의 $x_i, x_f, v_i, v_f = 0, a, d$ 등의 파라미터와 식 (10)~(12)에서 계산된 s_t, v_{max}^{new} , 그리고, 아래의 3단계 별 궤적 생성 식에 의해 동기화된 궤적 생성이 가능하다.

$$1) \text{ 가속구간: } 0 \leq t < T_1$$

$$x_1(t) = \frac{1}{2} s_p s_t a t^2 + v_i t + x_i \quad (13)$$

$$v_1(t) = s_p s_t a t + v_i \quad (14)$$

$$a_1(t) = s_p s_t a \quad (15)$$

표 1 동기 궤적 생성 알고리즘

Table 1 Algorithm. Trajectory Synchronization

1. Input: $x_i^k, x_f^k, v_i^k, v_f^k = 0, v_{\max}^k, a^k, d^k, k=1, \dots, n$
2. Calculate:
 - $\Delta x^k, \Delta v^k, \Delta x_c^k, s_p^k = \text{sign}(\Delta x^k - \Delta x_c^k)$
3. Calculate:
 - T_1^k : acceleration time
 - T_2^k : cruising time
 - T_3^k : deceleration time
 - $T_f^k = T_1^k + T_2^k + T_3^k$: duration
4. Find synchronizing time t_f^{sync}
 - $t_f^{sync} = \max T_f^k, k=1, \dots, n$
5. Calculate: $t_{f_k}^{lim} = \frac{\Delta x^k}{v_i^k} + \frac{v_i^k}{2s_p^k a^k}$
6. If $t_{f_k}^{lim} > t_f^{sync} (s_i = 1)$ then trapezoidal profile, else if $t_{f_k}^{lim} < t_f^{sync} (s_i = -1)$ then double ramp profile
7. Calculate: v_{\max}^{new}
8. Calculate:
 - T_{1s}^k : Sync. acceleration time
 - T_{2s}^k : Sync. cruising time
 - T_{3s}^k : Sync. deceleration time
 - $T_f^{sync} = T_{1s}^k + T_{2s}^k + T_{3s}^k$: Sync. duration
9. Trajectory Generation:
 - Acceleration phase: $0 \leq t < T_{1s}^k$
 - Position: $x_1^k(t) = \frac{1}{2} s_p^k s_t^k a^k t^2 + v_i^k t + x_i^k$
 - Velocity: $v_1^k(t) = s_p^k s_t^k a^k t + v_i^k$
 - Acceleration: $a_1^k(t) = s_p^k s_t^k a^k$
 - Cruising phase: $T_{1s}^k \leq t < T_{2s}^k$
 - Position: $x_{2s}^k(t) = s_p^k v_{\max}^{new} (t - T_{1s}^k) + x^k(T_{1s}^k)$
 - Velocity: $v_{2s}^k(t) = s_p^k v_{\max}^{new}$
 - Acceleration: $a_{2s}^k(t) = 0$
 - Deceleration phase: $T_{2s}^k \leq t < T_f = t_f^{sync}$
 - Position: $x_3^k(t) = -\frac{1}{2} s_p^k d^k (t - T_{2s}^k)^2 + s_p^k v_{\max}^{new} (t - T_{2s}^k) + x^k(T_{2s}^k)$
 - Velocity: $v_3^k(t) = -s_p^k d^k (t - T_{2s}^k) + s_p^k v_{\max}^{new}$
 - Deceleration: $a_3^k(t) = -s_p^k d^k$

3) 감속구간: $T_2 \leq t < T_f$

$$x_3(t) = -\frac{s_p d (t - T_2)^2}{2} + s_p v_{\max}^{new} (t - T_2) + x(T_2) \quad (19)$$

$$v_3(t) = -s_p d (t - T_2) + s_p v_{\max}^{new} \quad (20)$$

$$a_3(t) = -s_p d \quad (21)$$

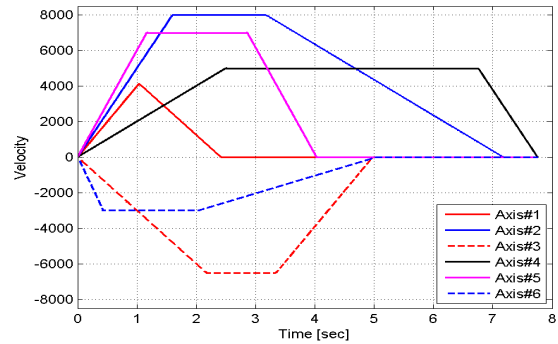
여기에서 각 구간별 전환 시간 T_1, T_2, T_f 는 다음과 같다.

$$T_1 = \frac{s_p v_{\max}^{new} - v_i}{s_p s_t a} \quad (22)$$

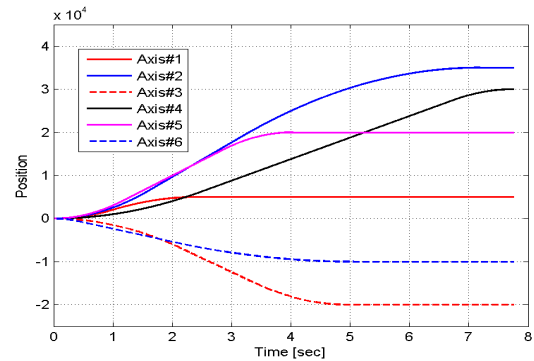
$$T_2 = t_f^{sync} - \frac{v_{\max}^{new}}{d} \quad (23)$$

$$T_f = t_f^{sync} \quad (24)$$

위에서 언급한 동기화 궤적 생성 알고리즘을 n개 축의 경우로 확장하면 표 1과 같이 정리할 수 있다.



(a) 속도 프로파일
(a) Velocity profile



(b) 위치 프로파일
(b) Position profile

그림 4 6자유도 시스템을 위한 2차 다항식 기반 시간 최적화 알고리즘을 이용한 위치, 속도 프로파일

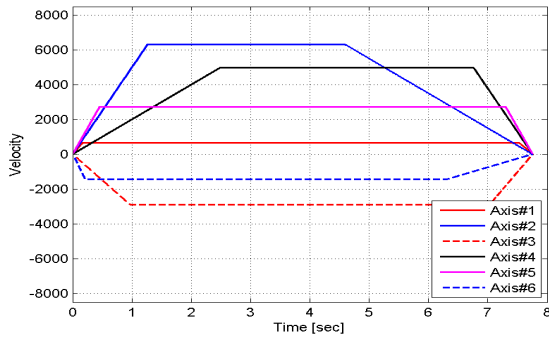
Fig. 4 Time optimal velocity and position profile of 2nd-order trajectories for six DOFs

2) 등속구간: $T_1 \leq t < T_2$

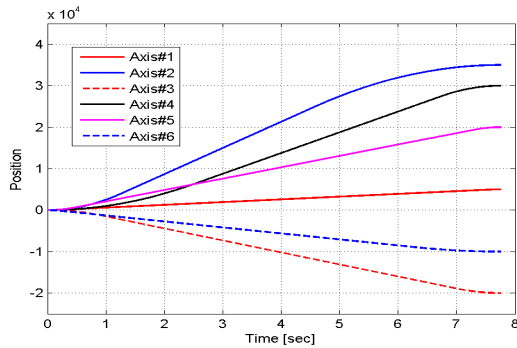
$$x_2(t) = s_p v_{\max}^{new} (t - T_1) + x(T_1) \quad (16)$$

$$v_2(t) = s_p v_{\max}^{new} \quad (17)$$

$$a_2(t) = 0 \quad (18)$$



(a) 속도 프로파일
(a) Velocity profile



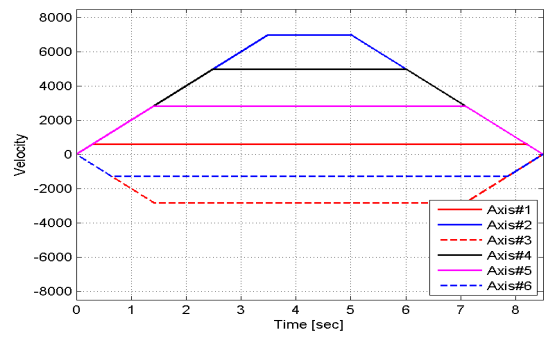
(b) 위치 프로파일
(b) Position profile

그림 5 6자유도 시스템을 위한 2차 다항식 기반 동기 궤적 생성 알고리즘을 이용한 위치, 속도 프로파일
Fig. 5 Synchronized velocity and position profile of 2nd-order trajectories for six DOFs

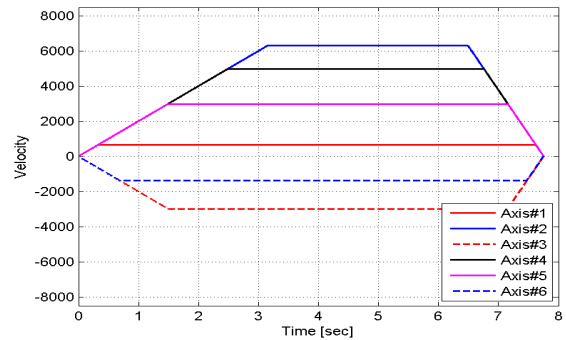
표 1의 동기 궤적 생성 알고리즘에서 보는 바와 같이 다축 시스템의 궤적을 온라인상에서 생성하기 위해서는 먼저 주어진 초기위치, 속도, 가감속도 등을 이용하여 시간 최적화된 궤적을 먼저 생성하고, 그중 임의의 축 구동시간을 동기 구동시간으로 선택하고, 기준 축을 제외한 나머지 축이 동기 구동시간에 각 축이 목표위치에 도달하기 위한 등속 구간의 최대 속도를 계산하고, 여기에서 계산된 최대 속도와 동기 구동시간을 이용하여 각 축의 시간 최적화된 궤적을 샘플링 주기마다 다시 생성하는 단계를 거친다. 온라인상에서 구동 중에 목표 위치가 변경될 경우에는 그 순간에 다시 위 과정을 반복하여 궤적을 생성한다.

4. 모의 실험

제안된 동기화 궤적 생성 알고리즘을 이용하여 6축에 대한 궤적을 생성하여 비교하였다. 먼저 각 축 별 최대속도 및 가감속도가 다르게 설정되어 있을 경우 시간 최적화된 궤적 생성 결과는 그림 4와 같다. 그림 4에서 보면 이동 거리가 가장 짧은 1번 축의 구동이 가장 먼저 종료되고 그와 반대인 4번 축의 구동이 가



(a) 속도 프로파일 (case: $a^k = d^k$)
(a) Velocity profile (case: $a^k = d^k$)

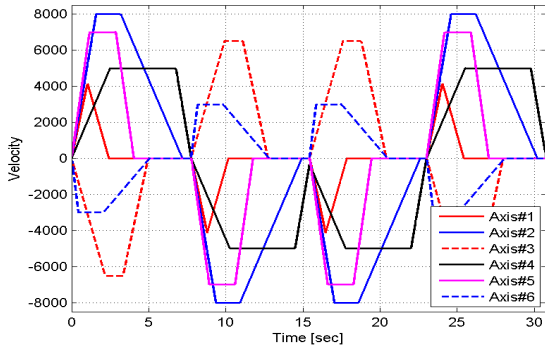


(b) 속도 프로파일 (case: $a^k \neq d^k$)
(b) Velocity profile (case: $a^k \neq d^k$)

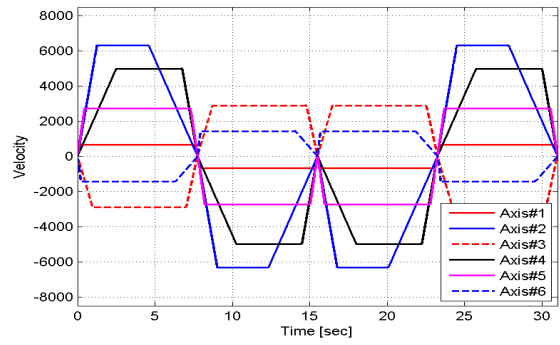
그림 6 6자유도 시스템을 위한 다양한 경우의 속도 동기 결과
Fig. 6 Synchronized velocity profile in various case for six DOFs

장 늦게 구동됨을 볼 수 있다. 그림 5는 제안된 동기화 궤적 생성 알고리즘을 이용하여 6축에 대한 궤적 생성 결과를 보여주고 있다. 그림 4-a에서 보는 바와 같이 가장 구동시간이 큰 4번 축의 구동시간이 동기 시간이 되며, 다른 축이 그 시간에 동기 되어 구동하기 위해 각 축 별 최대 속도가 변경됨을 볼 수 있다. 그러나, 이때 각 축의 가감속도는 서로 다르게 설정된 값으로 적용 되었으며, 6개의 축이 같은 시간에 구동이 시작되고 종료는 동기화 궤적이 생성됨을 확인할 수 있었다.

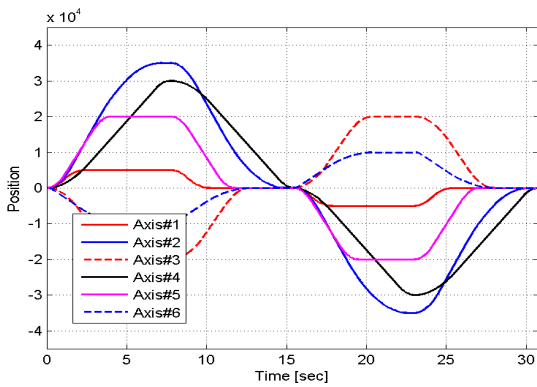
또한, 그림 6과 같이 다양한 각 축 별 가감속도를 갖게 구동이 가능하다. 그림 6-a는 가감속도가 같은 경우이며, 그림 6-b는 가감속도가 서로 다르게 설정되어 있어도 동기 축의 구동시간에 맞춰 6개의 축이 동일한 가감속도로 구동되는 궤적이 생성됨을 확인할 수 있었다. 그림 7과 8은 point-to-point 연속 구동시 시간 최적화된 궤적 생성 결과와 동기화된 궤적 생성 결과를 보여주고 있다. 그림 7-a에서 보는 바와 같이 시간 최적화된 궤적은 각축이 최대 속도로 구동하여 6개 축으로 이루어진 시스템의 모터 구동에 필요한 피크 파워가 크게 나타나며, 반면, 그림 8-a에서 보는 바와 같이 동기화된 궤적 생성 결과에서는 최대 속도가 구동시간이 가장 큰 동기 축에 일치하게 다시 계산되고 작아지는 현



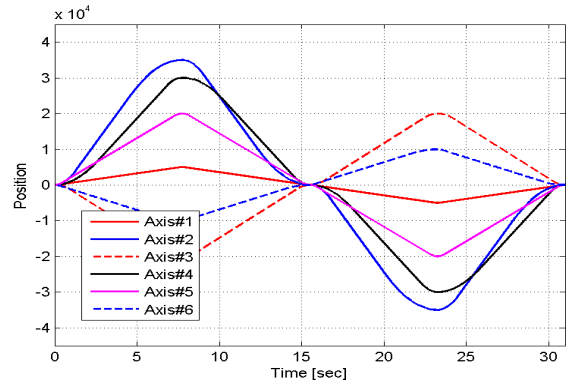
(a) 속도 프로파일
(a) Velocity profile



(a) 속도 프로파일
(a) Velocity profile



(b) 위치 프로파일
(b) Position profile



(b) 위치 프로파일
(b) Position profile

그림 7 6자유도 시스템의 시간 최적화 궤적의 연속 구동 결과
Fig. 7 Continuous motion of time optimal trajectories of six DOFs

그림 8 6자유도 시스템의 동기 궤적 생성 알고리즘을 이용한 궤적의 연속 구동 결과
Fig. 8 Continuous motion of synchronized trajectories of six DOFs

과가 있어 상대적으로 피크 파워가 작음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 다자유도를 가지는 기계 시스템의 모션 제어를 위한 동기된 온라인 궤적 생성 방법에 대해 제안하였다. 제안된 알고리즘은 설정된 최대속도 및 가속도와 초기 속도가 0이 아닌 구속조건하에서 시간 최적화된 궤적 생성과 다자유도 구동시 기준 축에 시간 동기된 궤적 생성이 가능하도록 설계하였다. 또한 구조가 매우 간단하여 연산시간이 작기 때문에 실시간 적용이 가능하고, 산업 현장에서 시스템을 운용할 때 어떠한 이벤트가 발생하여도 온라인상에서 궤적 생성 및 수정이 용이함을 보였고, 다양한 형태의 궤적 생성 모의실험을 통해 그 적용 가능성을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 2017년도 산업핵심기술개발사업 “작업자 공간공유 및 스마트공장 적용을 위한 차세대 제조용 로봇” 과제로 수행된 연구 결과임

References

- [1] M. E. Kahn and B. Roth, “The near-minimum-time control of open-loop articulated kinematic chains,” *ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control*, vol.93, pp. 164 – 172, Sep. 1971.

[2] D. Simon and C. Isik, "A trigonometric trajectory generator for robotic arms," *International Journal of Control*, 57(3), 1993, 505–517.

[3] A. Piazzoli and A. Visioli, "Global minimum-jerk trajectory planning of robot manipulators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47, 2000, 140–149.

[4] P. Lambrechts, M. Boerlage, and M. Steinbuch, "Trajectory planning and feedforward design for high performance motion systems," in *Proc. Amer. Control Conf., Boston, MA, Jun. 2004*, vol. 5, pp. 4637–4642.

[5] T. Kröger, A. Tomiczek, and F. M. Wahl, "Towards on-line trajectory computation," in *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, Oct 2006, pp. 736–741.

[6] T. Kröger and F. M. Wahl, "On-line trajectory generation: Basic concepts for instantaneous reactions to unforeseen events," *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 26, no. 1, pp. 94–111, Feb 2010.

[7] Ramos F, Gajamohan M, Heubel N., "Time-optimal online trajectory generation for robotic manipulators," *Zürich: Institute for Dynamic Systems and Control*, 2013.

[8] M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, Wiley, New York, 2006.

[9] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, "*Robotics: Modelling, Planning and Control*," 3rd Ed. Springer, 2009.



신 은 철 (Eunchol Shin)

2003년 선문대학교 전자/제어계측공학과(복수전공) 졸업. 2005년 선문대학교 제어계측공학과 석사. 2015년 한양대학교 대학원 전자공학과 박사수료. 2005년~현재 한국생산기술연구원 로봇그룹 선임연구원. 관심분야는 실시간 시스템, 실시간 모션 네트워크, 머니플레이터 제어, 서보 모터 제어

저 자 소 개



원 대 희 (Daehee Won)

2000년 고려대학교 제어계측공학과 졸업. 2002년 한양대학교 정밀기계공학과 석사. 2015년 동 대학원 전기공학과 박사. 2005년~2006년 산업자원부 로봇산업팀 민간전문가. 2003년~현재 한국생산기술연구원 로봇그룹 수석연구원. 관심분야는 비선형 제어, 로봇 제어, 유압 응용시스템, 실시간 모션 네트워크, 임베디드 시스템 등.