

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.3.283>ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)속도 영역에서의 컨볼루션을 이용한 효율적인 궤적 생성 방법[§]

이 건* · 김도익**†

* 한양대학교 공학기술연구소, ** 한국과학기술연구원

Trajectory Generation Method with Convolution Operation on Velocity Profile

Geon Lee* and Doik Kim**†

* Research Institute of Engineering and Technology, Hanyang Univ.,

** Korea Institute of Science and Technology

(Received August 27, 2013 ; Revised January 13, 2014 ; Accepted January 13, 2014)

Key Words: Trajectory Generation(궤적 생성), Convolution Operation(컨볼루션 연산), Real-time Computation(실시간 계산), Kinematic Constraints(운동학적 제약)

초록: 로봇에 대한 필요성이 더 이상 산업용 로봇에 국한되지 않고 서비스 로봇 혹은 의료 로봇으로 확대됨에 따라 사람과의 공존을 위해 외부 환경에 즉각적으로 대응이 가능한 궤적 생성 방법이 요구되고 있다. 이에 본 논문에서는 컨볼루션 연산을 이용한 실시간으로 변경 가능한 궤적 생성 방법을 제시한다. 본 논문에서 제시하는 방법은 기존의 컨볼루션 방법과 같이, 시스템의 운동학적 제약 조건 내에서의 궤적을 생성하며 기존 컨볼루션 방법의 모든 특성을 만족한다. 또한, 항상 사다리꼴 모양으로 궤적이 생성되는 특성으로 인한 특정 상황에서 비효율적으로 궤적이 생성될 수 있는 기존 컨볼루션 방법의 단점을 개선시키는 새로운 방법을 제시한다. 모의 실험을 통해 제안하는 방법의 유효성과 적합성을 보이며, 기존 컨볼루션 방법과의 비교를 통해 그 효율성을 보인다.

Abstract: The use of robots is no longer limited to the field of industrial robots and is now expanding into the fields of service and medical robots. In this light, a trajectory generation method that can respond instantaneously to the external environment is strongly required. Toward this end, this study proposes a method that enables a robot to change its trajectory in real-time using a convolution operation. The proposed method generates a trajectory in real time and satisfies the physical limits of the robot system such as acceleration and velocity limit. Moreover, a new way to improve the previous method (11), which generates inefficient trajectories in some cases owing to the characteristics of the trapezoidal shape of trajectories, is proposed by introducing a triangle shape. The validity and effectiveness of the proposed method is shown through a numerical simulation and a comparison with the previous convolution method.

1. 서 론

모든 로봇에 있어서 미분 가능한 부드러운 궤적은 추종 제어에 있어서 제어 시스템의 예상치 못한 떨림 현상으로 인한 손상을 줄일 수 있으며,^(1,2) 제어 시스템의 운동학적 한계치, 즉 제어 시스템의 최대 속도, 가속도, 저크 등이 반영된 궤적은 제어 시스템의 더 정확하고 빠른 추종을 가능하게

하고 좀 더 부드러운 동작 구현을 가능하게 한다.^(2~4) 이에 로봇을 포함한 각종 제어 시스템의 성능 향상을 위한 여러 궤적 생성 방법에 관한 연구가 진행되어 왔으며, 더욱 향상된 궤적 생성 방법에 대한 여러 가지 연구 결과를 내어왔다.^(2~8)

하지만 로봇에 대한 필요성이 더 이상 산업용 로봇에 국한되지 않고 서비스 로봇 혹은 의료 로봇으로 확대되어 감에 따라 사람과의 공존을 위해 로봇은 외부 환경 인식을 위한 여러 가지 센서로 복잡화 되고 있다. 정해진 궤적을 따라 움직이는 경제성과 효율성이 중요시 되는 산업용 로봇과는 달리 사람과의 공존을 위한 서비스 또는 의료 로

§ 이 논문은 대한기계학회 IT 융합부문 2013년도 춘계학술대회 (2013. 5. 9.-10., 대명리조트) 발표논문임.

† Corresponding Author, doikkim@kist.re.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

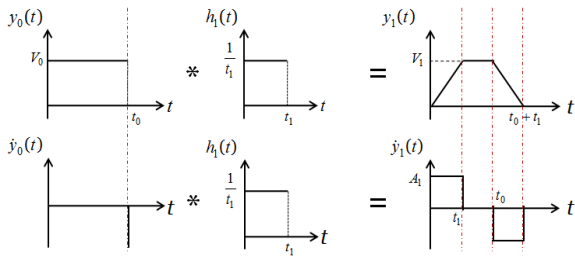


Fig. 1 The result performed once convolution

봇은 안전성이 매우 중요시 되며, 이러한 이유에서 예측할 수 없는 센서 이벤트에 즉각적으로 반응이 가능하여야 한다. 따라서, 센서 이벤트에 따라 실시간으로 변경 가능한 궤적 생성 방법 역시 요구되고 있다.^(9,10) 하지만, 기존의 궤적 생성 방법들은 산업용 로봇에 초점이 맞춰져 있기 때문에 시간 최적화 궤적 또는 에너지 최소화 궤적 등을 우선시 하며, 이는 센서 이벤트에 따라 실시간으로 그 궤적을 변경하기에 있어서 어려움이 있다.

본 논문에서는 여러 센서 이벤트에 실시간으로 반응하여 기존 궤적을 실시간으로 변경할 수 있는 컨볼루션 연산을 이용한 궤적 생성 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 기존에 제안되었던 단일 시간 구간에 대한 궤적 생성 방법⁽¹¹⁾을 기본으로 하며, 실시간 연산, 제어 시스템의 운동학적 한계치 제한 등의 기존 컨볼루션 방법의 특성을 동일하게 만족한다. 더 나아가, 기존 컨볼루션 방법을 이용할 시 생기는 단점, 즉 한번의 컨볼루션 결과가 항상 사다리꼴 모양으로 생성되는 특징으로 인해 특정 상황에서 비효율적으로 궤적이 생성되는 단점을 개선할 수 있는 컨볼루션의 변형 방법을 제안한다. 변형된 방법은 한번의 컨볼루션 결과가 사다리꼴이 아닌 삼각형 모양의 결과를 생성하며, 이러한 특징으로 상황에 따라 컨볼루션의 특징으로 발생하는 시간 지연을 개선한다. 마지막으로 모의 실험 결과를 통해 제안하는 방법의 결과를 검증하며, 기존 컨볼루션을 이용한 방법과 개선을 위해 변형된 방법의 비교를 통해 개선된 방법의 효용성을 보인다.

2. 컨볼루션을 이용한 궤적 생성 방법

2.1 컨볼루션의 특성

속도 영역에서의 컨볼루션을 이용한 궤적 생성 방법은 기본적으로 속도와 시간으로 구성되는 속

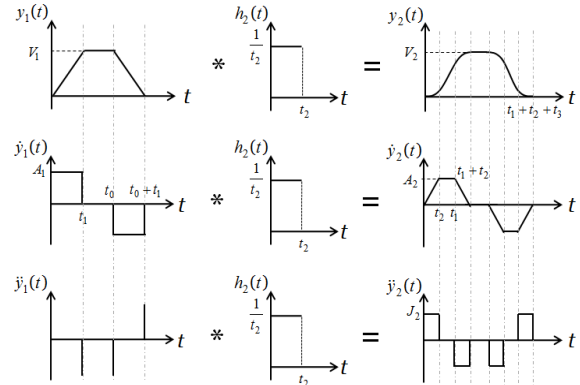


Fig. 2 The result performed twice convolution

도 함수와 단일 면적의 사각파형 함수와의 컨볼루션을 통해 이루어진다. 단일 면적의 사각파형 함수와 컨볼루션 결과는 몇 가지 특성을 가지며, 이 몇 가지 특성은 궤적 생성을 위해 이용된다.⁽¹¹⁾

시간 구간 $0 \leq t \leq t_0$ 에서 정의 되는 임의의 함수를 $y_0(t)$, 컨볼루션 횟수 n 에 따른 시간 구간 $0 \leq t \leq t_k$ 에서 정의되는 단일 면적의 사각파형 함수를 $h_n(t)$, 단일 면적의 사각파형 함수 $h_n(t)$ 으로 n 번 컨볼루션 된 결과 함수를 $y_n(t)$ 라고 하면, 결과 함수 $y_n(t)$ 는 다음과 같은 몇 가지 특성을 갖는다.

특성 1: n 번 컨볼루션을 적용하여 얻어진 결과 함수 $y_n(t)$ 는 초기 함수 $y_0(t)$ 가 0 이 아닌 값으로 정의되는 구간 t_0 부터 $h_n(t)$ 의 구간 t_n 까지의 합인 구간 $0 \leq t \leq \sum_{k=0}^n t_k$ 에서 정의된다.

특성 2: 적용되는 컨볼루션 횟수와는 무관하게, 초기의 함수 $y_0(t)$ 이 x 축과 이루는 넓이는 n 번 컨볼루션을 적용하여 얻어진 결과 함수 $y_n(t)$ 이 x 축과 이루는 넓이와 항상 같다.

특성 3: 초기의 함수 $y_0(t)$ 의 최대값 v_0 은 n 번 컨볼루션을 적용하여 얻어진 결과 함수 $y_n(t)$ 의 최대값 v_n 보다 항상 크거나 같다.

특성 4: 컨볼루션 적용 후 얻어진 결과 함수가 임의의 속도 변화 후 그 값이 유지 될 경우, 변속 시 가속도 및 감속도 특성은 대칭으로 형성된다.

2.2 기본적인 궤적 생성

모든 움직이는 물체는 속도와 시간으로 구성된 사각파형 함수로 표현이 가능하다. Fig. 1 은 이러한 사각파형 함수로 표현되는 속도 그래프를 단일 면적의 사각파형 함수로 컨볼루션 된 결과를 나타낸다. 가속도가 임펄스 함수로 나타나는 초기의 속도 함수는 컨볼루션을 통해 가속도의 최대값이

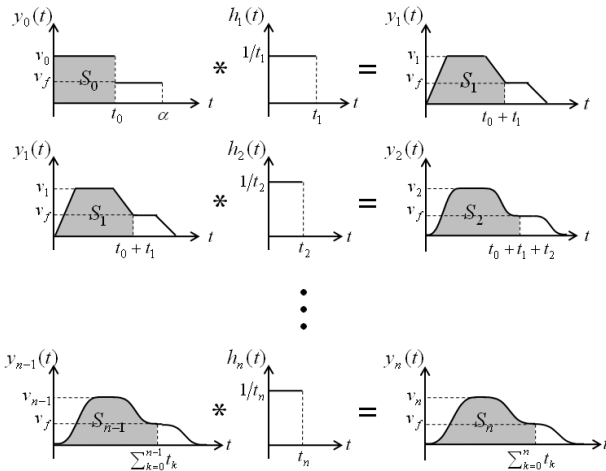


Fig. 3 The convolution method in the case of non-zero final velocity

일정 값에 제한되는 사다리꼴 함수로 변형된다. 같은 방법으로 한번의 컨볼루션 결과에 또 다른 단일 면적의 사각파형 함수를 컨볼루션 하면, 그 결과는 Fig. 2 에서처럼 속도함수의 두 번 미분, 즉 저크의 값이 임펄스 함수에서 일정 값에 제한 되는 사각파형의 결과를 생성한다. 다시 말해 두 번째 컨볼루션은 사각파형의 모양이었던 가속도 그래프를 사다리꼴 모양의 그래프로 변화 시킨다. 반복적으로 단일 면적의 사각파형 함수로의 컨볼루션은 임펄스 함수로 나타나는 상위 미분 함수를 사각파형의 함수로 변화시키며 그 최대값은 일정 값에 제한시킨다는 특성을 생성한다.

여기서, 물체의 이동거리를 뜻하는 속도 함수의 넓이는 특성 2 에 의해 컨볼루션 횟수와는 무관하게 항상 일정하며, 특성 1 에 의해 속도 함수가 정의 되는 구간은 $0 \leq t \leq \sum_{k=0}^{n-1} t_k$ 으로 알 수 있다. 또한, 컨볼루션에 의해 생성되는 속도 함수의 최대값은 특성 3 에 의해 항상 v_0 값에 제한된다. Fig. 1 과 Fig. 2 를 보면 알 수 있듯이, 컨볼루션으로 생성되는 사다리꼴 함수에서의 증가량 및 감소량은 컨볼루션 되는 단일 면적의 사각파형 함수와 관련이 있으며 제한하려는 속도 함수의 k 차 미분 함수의 최대값 $v_{max}^{(k)}$ 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$t_k = v_{max}^{(k-1)} / v_{max}^{(k)}, \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

최종 속도가 '0'이 아닌 궤적은 사각파형이 아닌 계단파형의 속도함수를 컨볼루션 함으로서 얻어진다. Fig. 3 은 계단파형의 컨볼루션 횟수에 따른 결과를 보여주며, 결과 함수는 컨볼루션 횟수 n 에 따라 시간 $\sum_{k=0}^{n-1} t_k$ 에서 주어진 최종 속도 v_f

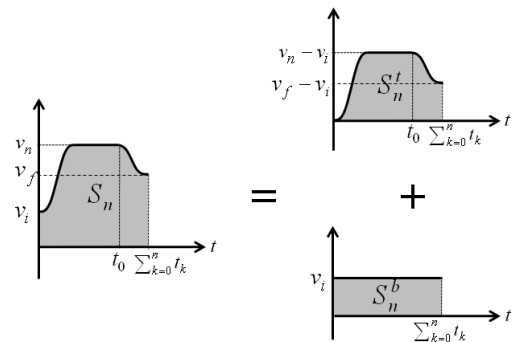


Fig. 4 The composition in the case of non-zero initial and final velocities

를 지나게 된다. 다시 말해서, 최종속도가 '0'이 아닌 궤적은 계단파형 함수를 시간 $\sum_{k=0}^{n-1} t_k$ 까지 컨볼루션 함으로서 얻을 수 있다. 또한, 특성 2 에 의해 함수가 정의되는 구간에서의 총 넓이는 모두 같으며 특성 4 를 고려하여 계산하면 어두운 부분으로 표시된 실제 이동거리 S_n 은 다음과 같이 표현된다.

$$S_n = v_0 t_0 + \frac{v_f}{2} \sum_{k=1}^{n-1} t_k \quad (2)$$

초기 속도가 '0'이 아닌 궤적의 경우, Fig. 4 에서와 같이 계단파형을 컨볼루션 하여 얻어진 최종속도가 '0'이 아닌 궤적을 초기 속도 v_i 로 평행이동 함으로써 가능하다. 이때 최종 궤적의 최대값에 초기 속도 v_i 가 영향을 주기 때문에 최종속도가 '0'이 아닌 궤적 생성시에 이를 감안하여야 한다. 또한, 초기 및 최종 속도가 '0'이 아닌 궤적의 실제 이동거리 S_n 은 다음과 같이 변경된다.

$$S_n = S_n^t + S_n^b = (v_0 + v_i)t_0 + \frac{v_f + v_i}{2} \sum_{k=1}^{n-1} t_k \quad (3)$$

2.3 외부 입력에 대한 즉각적인 궤적 생성

외부 입력에 따라 즉각적으로 궤적을 재생성하기 위한 방법은 다음과 같은 절차에 의해 진행된다. 먼저, 목표 궤적이 들어오는 각 시간 구간별로 개별적으로 한번의 컨볼루션을 통해 구간 별 사다리꼴 모양의 속도 함수를 생성한다. 만약 궤적이 이전 목표 궤적에 도달하지 못한 상태에서 새로운 목표 궤적이 입력될 경우, 새로운 궤적이 입력되는 시점의 현재 궤적을 기점으로 새로운 궤적을 생성하게 된다. 그 후, 각 시간 구간별 각각의 궤적을 서로 이은 전체 궤적을 나머지 컨볼루션을 진행하여 최종 궤적을 얻는다. Fig. 5 는 즉각적인 궤적 재생성을 위해 제안하는 방법의 한번의 컨볼루션 결과의 예를 도식화 한 것이다. 총 세 번의

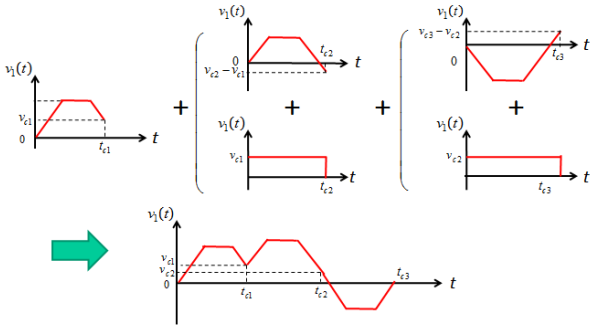


Fig. 5 Schematic diagram of the convolution processing for immediate reaction

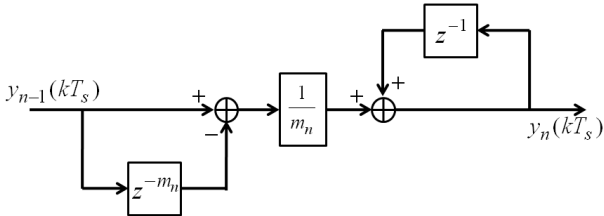


Fig. 6 Block diagram of the digital convolution

목표 궤적의 변화가 있었으며, 처음 생성되는 궤적이 목표 값에 도달하지 못하고 시간 t_{c1} , 속도 v_{c1} 에서 새로운 목표 궤적이 입력되었을 시 초기 속도를 v_{c1} 으로 하는 초기 및 최종 속도가 '0'이 아닌 궤적을 생성한다. 동일한 방법으로 두 번째 입력에 대한 궤적이 목표 값에 도달하지 못하고 시간 t_{c2} , 속도 v_{c2} 에서 또 다른 새로운 궤적 입력 시 초기 속도를 v_{c2} 으로 하는 궤적을 생성한다. 결론적으로 이 세 개의 목표 궤적에 대한 한번의 컨볼루션 결과는 마지막 그래프와 같이 서로 접합되어 사다리꼴로 이루어지는 궤적을 이루게 되며, 마지막 그래프에 나머지 컨볼루션을 진행함으로써 운동학적 한계치가 반영된 최종 궤적을 얻게 된다. 특성 2에 의해 사다리꼴의 함수의 넓이는 컨볼루션 후의 넓이와 변함이 없기 때문에 이동하는 총 거리는 물론 변화가 없게 된다.

알고리즘적으로 컨볼루션의 각 시간대별 개별적 적용은 디지털 컨볼루션이라는 불연속 시간영역에서의 컨볼루션식의 변형을 통해 가능하다. 불연속 시간영역에서의 컨볼루션은 다음과 같이 디지털 컨볼루션의 식으로 재표현될 수 있으며, 그 블록 다이어그램은 Fig. 6와 같다.

$$y_n[k] = \frac{y_{n-1}[k] - y_{n-1}[k - m_n]}{m_n} + y_n[k - 1] \quad (4)$$

식 (4)에서 $k = [t/T_s]$, $m_n = [t_n/T_s]$ 이며, T_s 는

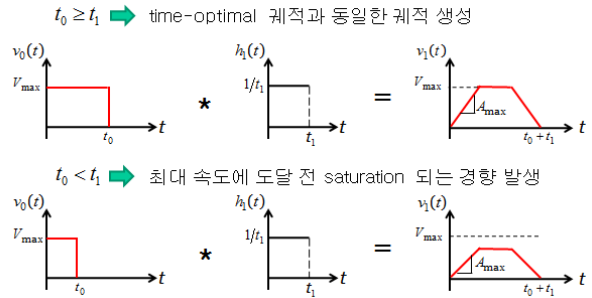


Fig. 7 Convolution results in two cases

샘플링 시간을 의미한다. 또한, $[x]$ 는 x 를 넘지 않는 최대 정수를 의미하는 가우시안 기호를 나타내는 것이며, 항상 양의 정수만 가능하다. Fig. 5의 블록 다이어그램에서 볼 수 있듯이, 디지털 컨볼루션은 과거의 값만을 이용하기 때문에 실시간 컨볼루션이 가능하며, 메모리 역할을 하는 z^{-m_n} 블록을 초기화 시킴으로써 새로운 목표 궤적 입력 시 시간 구간별로 새로운 컨볼루션을 개별적으로 실행 가능하게 된다. 즉, 첫 번째 컨볼루션에 해당하는 z^{-m_n} 블록은 매 목표 궤적 입력 시마다 초기화 시키고, 나머지 컨볼루션에 해당하는 z^{-m_n} 블록은 그 값을 유지함으로써 궤적 생성이 가능하다.

2.4 효율적인 궤적 생성을 위한 변형

컨볼루션을 이용한 궤적 생성 방법의 특징 중 하나는 한번의 컨볼루션을 진행한 결과가 항상 사다리꼴 형태로 나타난다는 것이다. 이는 최대값 제한을 줄 수 있다는 장점을 갖는 동시에 경우에 따라서는 비효율적인 궤적을 생성할 수 있다는 단점 또한 갖는다. 예를 들어, 속도로 구성된 사각파형 함수가 정의된 시간보다 첫 번째로 컨볼루션되는 사각파형 함수가 정의된 시간 구간이 클 경우, 그 컨볼루션 결과는 최대값에 미치지 못하는 사다리꼴 함수를 생성한다. Fig. 7는 이러한 경우를 나타내는 그림이다. 첫 번째 그림은 한번의 컨볼루션 결과가 시간 최적화 궤적과 동일한 결과를 나타내는 장점을 보여주며, 두 번째 그림은 속도 함수가 최대 속도에 도달하기 전에 평행 상태에 도달하는 컨볼루션의 단점을 보여준다. 이러한 단점은 빠르게 동작하는 시스템의 경우 컨볼루션의 방법이 때에 따라서 궤적 생성 시간이 길어지는 비효율적인 결과를 낳을 수 있다. 하지만 첫 번째 컨볼루션이 각 시간 구간별로 개별적으로 진행된다는 특징을 이용하여 이러한 단점을 보완하기 위한 변형이 가능하다. 같은 이동거리를 움직이는

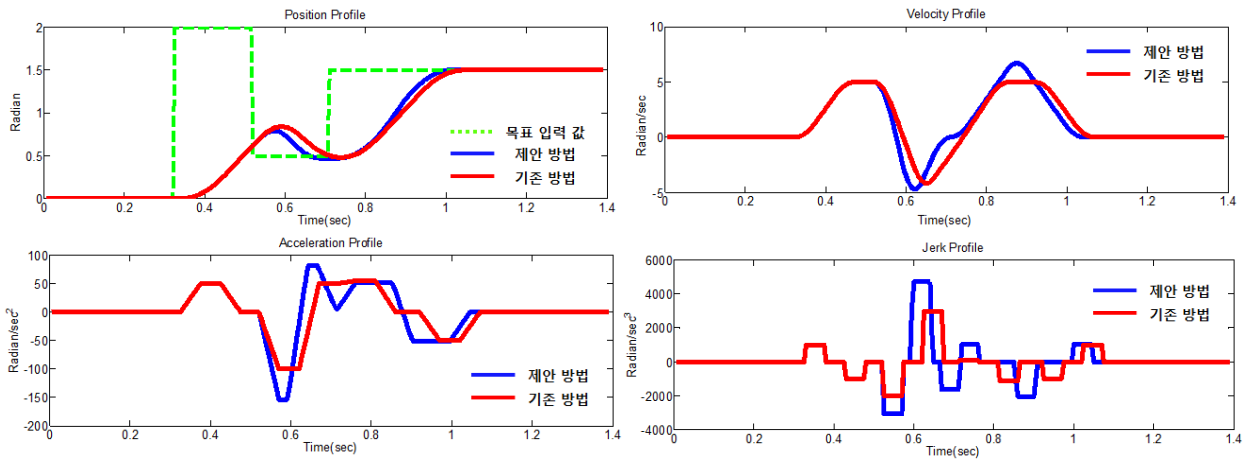


Fig. 8 Simulation results of established method and modified method

속도 함수의 경우, 사다리꼴 모양의 함수 보다는 삼각형 모양의 함수가 더 효율적이다. 또한, 컨볼루션을 이용한 궤적 생성에 있어서 t_0 와 t_1 이 같을 경우 한번의 컨볼루션 결과는 사다리꼴 모양이 아닌 삼각형 모양이 된다. 이를 이용하여, $t_0 < t_1$ 인 경우 t_0 와 t_1 을 식 (3)을 만족하는 동일한 값으로 변경하여 컨볼루션을 수행하면 Fig. 7의 아래 그림과 같은 결과를 얻을 수 있으며, 그 결과의 궤적 생성 시간은 기존 사다리꼴 모양의 궤적 생성 시간 t_f 보다 짧아지고 최대 속도에 더 가까운 속도까지 도달하게 된다.

3. 모의 실험

모의 실험을 위해 C++을 이용하여 알고리즘을 구성하였으며, 제안한 방법을 KIST 내의 MAHRU 로봇 제어를 위해 자체 개발된 프레임웍을 이용하여 모의 실험을 수행하였다.⁽¹²⁾ 목표 궤적은 랜덤 함수를 이용하여 100ms~500ms로 설정하여 예상할 수 없는 시간에 입력되게 구성하였으며, 궤적 생성 시 제한 될 운동학적 제한 값은 임의로 각각 10rad/sec, 200rad/sec², 5000rad/sec³으로 설정하였다. 또한, 저크 함수의 바운드를 위해 총 세 번의 컨볼루션을 진행하였으며, 편의를 위해 단축상의 점과 점 사이의 운동을 통하여 실험 결과를 보였다. 궤적 생성을 위한 주어진 시간은 다음과 같이 한 개의 목표 입력이 들어오고 다음 목표 입력이 들어오는 시간 간격을 받아 결정하였으며, 이를 위해 처음 들어오는 목표 입력 값은 버려지게 설정하였다.

Fig. 8은 기존의 컨볼루션 방법을 이용한 궤적 생성과 효율적 궤적 생성을 위한 변형된 방법의

모의 실험 결과이다. 두 방법 모두 동일한 값의 목표 입력과 동일한 시간의 궤적 생성 시간이 적용되었으며 총 세 번의 새로운 목표 입력이 있었다. Fig. 8에서 왼쪽 상단의 그림 중 녹색 점선은 목표 입력 값을, 붉은색 실선은 기존의 컨볼루션을 이용한 결과를, 그리고 파란색 실선은 변형된 컨볼루션을 이용한 결과를 나타낸다. 첫 번째 목표 궤적 입력 시간 구간은 $t_0 \geq t_1$ 를 만족하여 두 방법의 결과가 같게 나타나지만 그 외의 시간 구간에서 기존 컨볼루션을 이용한 방법은 사다리꼴 모양의 결과, 변형된 컨볼루션을 이용한 방법은 삼각형 모양의 결과를 생성한다. 모의 실험 결과에서 볼 수 있듯이, 변형된 방법이 최대 속도에 더 가까운 속도를 이용하기 때문에 궤적 생성을 위해 소요되는 시간이 기존 컨볼루션을 이용한 방법에 비해 짧으며, 가속도와 저크 값 역시 더 큰 값을 사용하여 더 효율적인 궤적을 생성한다. 또한, 또한 모의 실험 결과에서 나타나진 않지만 물리적으로 궤적 생성이 불가능한 시간이 주어졌을 경우 변형된 방법이 기존의 방법보다 시간 지연이 적게 일어나게 된다.

4. 결론

본 논문에서는 실시간으로 센터 이벤트 등에 대응하기 위한 즉각적 변경 가능한 궤적 생성 방법을 제안 하였다. 제안된 방법은 기존에 제안하였던 컨볼루션의 기본적 특성을 이용하여 임의의 예상치 못하는 시간에 들어오는 목표 궤적에 대해 궤적 재생성을 가능하게 하며, 기존의 컨볼루션 방법이 가지고 있는 운동학적 제한 반영, 실시간 연산 등의 장점을 유지한다. 또한, 상황에 따라 발생할 수 있는 기존 컨볼루션 방법의 단점을 보완할 수 있는 컨볼루션

변형을 제안하였다. 제안된 방법은 항상 사다리꼴로 생성되는 컨볼루션의 결과를 삼각형 형태로 생성 가능하게 하며, 이로 인해 생성되는 궤적의 효율성을 증대하였다. 또한, 모의 실험을 통해 빠르게 동작하는 제어 시스템에서도 운동학적 한계치 반영이 가능한 궤적 생성이 가능하다는 것을 보였으며, 더 나아가 컨볼루션의 특성 1 을 이용하여 다자유도 궤적 생성에 있어서, 궤적 생성에 소요되는 시간, 각 자유도의 컨볼루션 되는 단일 면적의 사각과형 함수간의 관계 설정을 통해 시간이 동기화된 궤적(Time-synchronized trajectory)⁽⁹⁾ 또는 위상이 동기화된 궤적(Phase-synchronized trajectory)⁽¹⁰⁾ 생성이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2012 년 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 <실감교류 인체감응 솔루션> 글로벌프론티어사업으로 수행된 연구임(2010-0029746).

참고문헌 (References)

- (1) Craig, J. J., 1989, *Introduction to Robotics*, Addison-Wesley, New York.
- (2) Constantinescu, D. and Croft, E. A., 2000, "Smooth and Time-Optimal Trajectory Planning for Industrial Manipulators Along Specified Paths," *Journal of Robotic System*, Vol. 17, pp. 233~249.
- (3) Mizoshita, Y., Hasegawa, S. and Takaishi, K., 1996, "Vibration Minimized Access Control for Disk Drives," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 32, pp.1793~1798.
- (4) Tsuji, T., Tanaka, Y., Morasso, P. G., Sanguincti, V. and Kaneko, M., 2002, "Bio-Mimetic Trajectory Generation of Robots via Artificial Potential Field with Time Base Generator," *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, Vol. 32, No. 4, pp. 426~439.
- (5) Nam, S. -H. and Yang, M. -Y., 2004, "A Study on a Generalized Parametric Interpolator with Real-Time Jerk-Limited Acceleration," *Computer-Aided Design*, Vol. 36, No. 1, pp. 27~36.
- (6) Jeon, J. W. and Ha, Y. Y., 2000, "A Generalized Approach for the Acceleration and Deceleration of Industrial Robots and CNC Machine Tools," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 2, pp. 133~139.
- (7) Ahn, K. T., Cho, J. S., and Chung, W. K., 2006, "Discrete Trajectory Formation in Comparison with the Analytical Method for Smooth Movements," *Proc. Of IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics Control and Instrumentation*, pp. 4462~4467.
- (8) Macfarlane, M. and Croft, E. A., 2003, "Jerk-Bounded Manipulator Trajectory Planning: Design for RealTime Application," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 1, pp. 42~52.
- (9) Kroger, T. and Wahl, F. M., 2010, "Online Trajectory Generation: Basic Concepts for Instantaneous Reactions to Unforeseen Events," *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 26, No. 1, pp. 94~111.
- (10) Kroger, T., 2011, "Online Trajectory Generation: Straight-Line Trajectories," *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 27, No. 5, pp. 1010~1016.
- (11) Lee, G., Kim, J., and Choi, Y., 2012, "Convolution-Based Trajectory Generation Methods Using Physical System Limits," *Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, Vol. 135, No. 1, article no. 011001, 8pages.
- (12) Kim, D., 2007, "Manual for dIHC(Interface for Humanoid Control)," Technical Report, KIST.