

# 유체운송을 위한 다관절 로봇 조작 성능 개선

\*박형순, 임성수(경희대 기계공학과)  
경희대학교 기계공학과

## Manipulation Skill Improvement for Fluid Transportation Using an Articulated Robot

\*Hyung Soon Park, Sungsoo Rhim  
(Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University)

Key words : Fluid Transportation, Co-Simulation, Adaptive Command Shaping

### 1. 서론

다관절 로봇에 의해 조작 또는 이송(transport)되는 대상(object)은 그 기하학적 형상 및 재질, 동역학적 특성이 매우 다양하며, 대상물체의 기하학적, 동역학적 특성에 따라 로봇의 움직임을 적절히 설계하는 것이 필요하다. 지금까지의 연구를 보면 로봇의 작업 대상으로 고려되어온 대상물체는 고체(강체 또는 탄성체)인 경우가 대부분이다. 반면 물이 든 컵과 같이 유체가 들어있는 용기를 이송 또는 조작하는 경우 용기 안의 유체가 흘러넘치지 않도록 하며 용기를 이송하는 것은 매우 중요한 작업 조건이 된다. 본 논문에서는 해석적 어려움이 있었던 유체의 움직임을 직관적인 관찰을 통해서 진자 모델로 간략화 하고, 이 모델에 잔류 진동 제거에 뛰어난 효과를 갖는 명령 성형(command shaping) 기법을 적용하였다. 범용 다물체 동역학 해석프로그램인 펑션베이(FunctionBay)사의 RecurDyn을 이용하여 다관절 로봇과 유체용기 및 유체의 동역학적 모델을 구축하였다. 이렇게 모델링되어진 동역학 모델은 Matlab/Simulink와 연동하여 적응형 명령 성형 필터(Adaptive Command Shaping Filter, ACS)를 적용하고 그 효용성을 검증하였다. 또한 다관절 매니플레이터의 제어시스템에 입력되는 궤적에 대한 비선형 보간(Interpolation)이 제어효과에 끼치는 영향을 살펴보기 위하여 주파수 분석을 실시하였다.

### 2. 동역학 모델

#### 2.1 다관절 로봇

본 논문에서는 독일 Kuka사에서 제작된 Kuka-kr3 6관절 매니플레이터를 모델로하여 RecurDyn상에서 모델링하였다. Kuka-kr3는 총 6개의 회전조인트를 가지고 있으며, 각 조인트의 입력과 출력은 제어힘(control force)과 각변위 값이다. RecurDyn에서 생성된 모델의 상태 정보들은 Matlab/Simulink로 전달되어지며, Matlab/Simulink에서는 명령성형 필터에 의해 수정된 궤적에 대해 생성되어진 제어힘을 RecurDyn으로 전달한다.

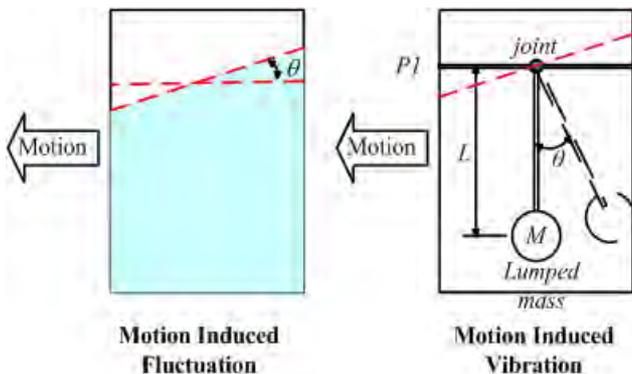


Fig.1 Alternative model of fluid contained in a cup.

### 2.2 물이 든 컵의 동역학 모델

본 연구에서는 용기 내 유체의 표면요동을 그림 1과 같이 진자의 움직임에 의해서 발생하는 회전각  $\theta$ 와 연관지어 표현하고자 한다. 평형 상태에 두 모델을 직선운동 시켰을 때 물의 요동과 진자의 회전량은 운동에 따라서 같은 양상을 가지게 된다. 이러한 해석적 방법은 자동주물 시스템 해석에서 사용된 바가 있다. [1]

### 3. 적응형 명령 성형 필터

FIR(Finite Impulse Response) 시간지연(time-delay) 필터인 명령 성형 필터는 탄성모드 운동을 하는 정밀한 시스템에서 잔류진동의 억제를 위한 방법으로 사용되며[2], 이 필터의 파라미터는 잔류진동을 억제하고자 하는 대상 시스템의 탄성모드의 공진주파수와 감쇠비에 의해서 결정된다. 그러나 시스템 변수의 불확실성이 있는 경우 post-filtering 직접 적응형 명령 성형 필터를 사용할 수 있다. 이러한 적응형 필터  $C(z)$ 는 식(1)과 같은 형태를 갖는다.

$$C(z) = c_1 + c_2 z^{-\Delta} + c_3 z^{-2\Delta} \quad (1)$$

여기서  $\Delta = T_d / T_s$ ,  $T_d$ 값은 임의로 선택되고, 필터의 계수  $c_1, c_2, c_3$ 는 적응형 알고리즘에 의해 학습된다. 이 특별한 post-filtering 적응 알고리즘은 노이즈에 매우 강하고, 매우 빠른 수렴특성을 가지며, 주어진 임의의 시간지연 값에 대해 매우 정확한 최적의 계수를 찾는 것으로 입증되었다.[4] 시스템 응답(진동)을 최소화 하는 필터계수 벡터  $\theta$ 를 학습하는 반복학습 관련식(Iterative Algorithm)은 식(2)와 같다.

$$k(n) = \frac{P(n-1)\psi(n)}{\lambda_f + \psi^T(n)p(n-1)\psi(n)}$$

$$P(n) = \frac{1}{\lambda_f} [P(n-1) - k(n)\psi^T(n)P(n-1)] \quad (2)$$

$$\theta(n) = \frac{1}{h^T P(n)h} P(n)H$$

여기서  $\theta(n)$ 는 명령성형 필터의 계수 벡터,  $\psi(n)$ 은 엔드이펙터 끝에 달린 용기 내 유체 시스템 응답, DC게인 구속조건은  $h^T \theta(n) = 1$ ,  $h = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$  이다 [4].

### 4. 제어 시스템

#### 4.1 시뮬레이션 환경

본 논문에서는 동역학 해석을 위한 RecurDyn과 제어기 설계에 적합한 Matlab/Simulink의 Co-Simulation 환경에서 제어기의 효용성을 검증하였다. 두 프로그램은 이산 시간 영역에서 상태 정보를 공유하면서 제어성분은 Matlab통합기에 의해 통합되고 동역학 해석은 RecurDyn Solver에 의해 수행된다. 이러한 상호 연동 시뮬레이션은 더욱 정확한 레벨로 제어 시스템을 평가하고 설계할 수 있

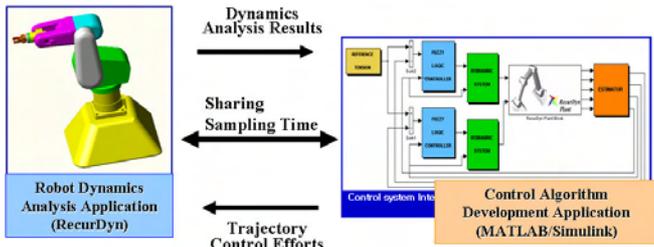


Fig.2 Co-simulation environment using Matlab/Simulink and RecurDyn.

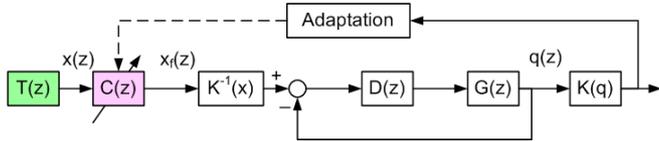


Fig.3 Control system block-diagram.

도록 한다. 그림 2에서는 이러한 상호 연동 시뮬레이션에 대해서 간단히 나타내었다.

4.2 제어 시스템 블록

전체 제어 시스템의 구성은 그림 3에 보이는 바와 같다. 입력 제적( $T(z)$ )으로 다관절 로봇의 엔드이펙터(end-effector)에 대한 사다리꼴 형태의 위치 프로파일을 인가하고, 이를 추종하기 위해서 각 관절별로 PD제어기( $D(z)$ )를 사용하였다. 시스템은 학습단계가 끝나면 명령 성형필터( $C(z)$ )의 필터 계수를 결정하고, 수정된 계수값으로 입력제적을 성형한 후에 물컵 모델과 다관절 매니플레이터를 포함하는 동역학 시스템으로 성형된 제적을 적용하게 된다. 여기서 입력제적을 사용되어지는  $T(z)$ 는 매니플레이터 작업공간상의 값으로 동역학 시스템에 인가되기 전에 역기구학( $K^{-1}(x)$ )을 통하여 관절공간의 값으로 변환되고, 동역학 시스템을 통하여 나오는 관절값은 정기구학( $K(q)$ )을 통하여 작업공간상의 값으로 변환된다. 명령 성형 필터는 동역학 시스템으로부터 나오는 유체 운동의 출력값을 학습하여 그에 상응하는 필터 계수를 결정하고, 매니플레이터 작업공간 상의 값으로 제적을 성형한다.

5. 시뮬레이션 결과

그림 4는 PD 제어기만을 사용하였을 때와 PD제어기와 ACS를 함께 사용하였을 때의 진자의 회전량을 나타낸다. 처음 학습단계의 4초 동안은 동일한 결과를 나타내는 반면 ACS가 적용되는 4초 이후에는 진자의 회전량이 급격하게 감소됨을 볼 수 있다.

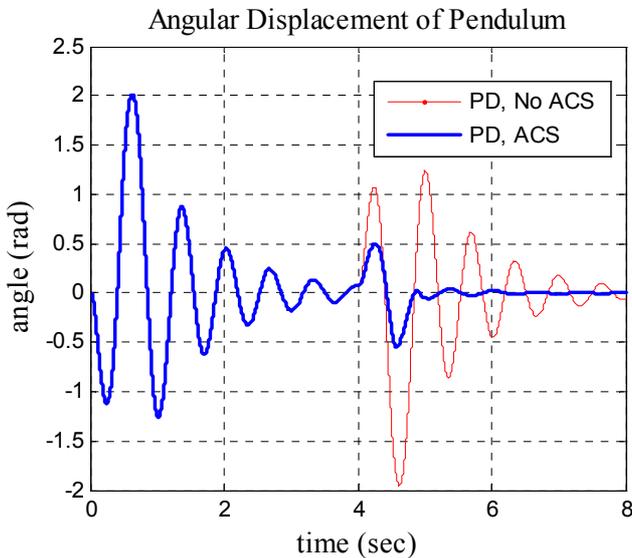


Fig.4 Calculated angular displacement of pendulum.

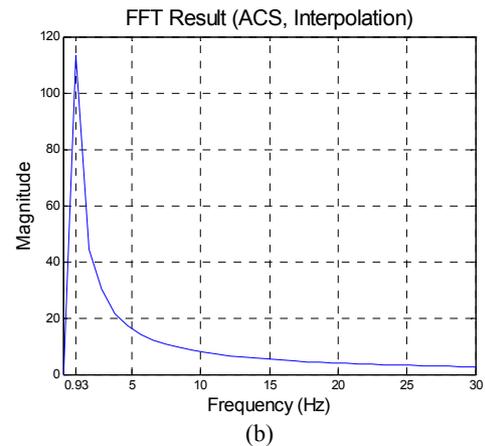
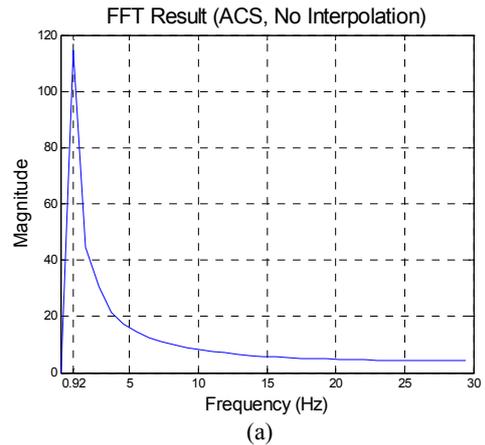


Fig. 5 FFT of end-effector trajectory.

그림 5에서는 관절공간에서 비선형 Cubic-spline을 이용하여 제적을 보간함에 따른 영향을 살펴보기 위하여 주파수 분석한 결과이다. 최초 10ms의 입력제적의 데이터를 인가하였을 때의 결과는 (a)와 같고, 1ms로 보간한 후의 결과는 (b)와 같다. 주파수 분석 결과 보간이 시스템에 주는 영향은 거의 없음을 확인 할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 Co-Simulation을 이용하여 유체 이송을 위한 다관절 로봇의 동역학적 모델링을 수행하고, 유체 거동을 진자 모델로 간략화하여 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 동역학적 해석을 위하여 RecurDyn을 사용하였고, 제어기 설계에 적합한 Matlab/Simulink와 상호 연동하여 시뮬레이션의 정확도를 높였다. 간략화된 유체 모델을 대상으로 유체의 출력임을 줄여주기 위한 이송제어법으로 ACS기법을 사용하고, 시뮬레이션을 통하여 그 효과를 검증하였다. 또한 관절공간에서의 비선형 보간이 시스템에 끼치는 영향을 살펴보기 위하여 제적의 주파수 분석을 실시하였다. 주파수 분석을 통하여 명령 제적의 비선형 보간에도 불구하고 시스템에 적용할 수 있는 근거를 제시하였다.

참고문헌

1. K. Terashima, M. Hamaguchi and K. Yamaura, "Modeling and input shaping control of liquid vibration for an automatic pouring system" The 35th Conf. on Decision and Control Kobe, Japan, December 1996, pp. 4844-4850.
2. B.R. Murphy and I. Watanabe, "Digital Shaping Filters for Reducing Machine Vibration", IEEE Trans. on Robotics and Automation. Vol. 8. No. 2, April 1992, pp. 285-289.
3. F.M. Aldebrez and M.O. Tokhi, "Vibration Control Of Pitch Movement Using Command Shaping Techniques" IEEE, 2003, 447-452.
4. S. Rhim, "Adaptive Time-Delay Command Shaping Filter for Flexible Manipulator Control" Kyung Hee University Press