

중력을 이용한 병렬형 머니플레이터 구동부의 마찰력 보상

Friction Force Compensation for Actuators of a Parallel Manipulator Using Gravitational Force

이 세 한, 송 재 복*

(Se-Han Lee and Jae-Bok Song)

Abstract : Parallel manipulators have been used for a variety of applications, including the motion simulators and mechanism for precise machining. Since the ball screws used for linear motion of legs of the Stewart-Gough type parallel manipulator provide wider contact areas than revolute joints, parallel manipulators are usually more affected by frictional forces than serial manipulators. In this research, the method for detecting the frictional forces arising in the parallel manipulator using the gravitational force is proposed. First, the reference trajectories are computed from the dynamic model of the parallel manipulator assuming that it is subject to only the gravitational force without friction. When the parallel manipulator is controlled so that the platform follows the computed reference trajectory, this control force for each leg is equal to the friction force arising in each leg. It is shown that control performance can be improved when the friction compensation based on this information is added to the controller for position control of the moving plate of a parallel manipulator.

Keywords : stewart-gough parallel manipulator, friction force detection, gravitational force, friction compensation

I. 서론

최근 병렬형 머니플레이터를 공작기계 등 다양한 분야에 응용하는 연구가 많이 시도되고 있다[1-3]. 특히, Stewart-Gough형 병렬형 머니플레이터(이하 스튜어트 플랫폼이라 칭함)는 직렬형 머니플레이터에서 주로 발생하는 굽힘 현상이 발생하지 않으며, 직선운동을 하는 구동장치를 사용하는 구조를 갖기 때문에 가벼운 중량에 비하여 높은 강성을 갖게 된다[4]. 또한, 병렬형 머니플레이터를 구성하는 링크들이 병렬로 배치되어 페루프를 형성하기 때문에, 각 링크에서 발생된 오차가 엔드 이펙터에 누적되지 않는 특징도 갖는다. 이러한 장점들 때문에 높은 강성 및 정밀도를 요구하는 공작기계에서 공구 및 공작물 이송 분야에 응용되고 있다.

이러한 병렬형 머니플레이터의 단점 중의 하나가 바로 선형구동장치에서 발생하는 마찰력이다. 첫째, 선형구동장치의 직선관절은 회전관절에 비하여 접촉부분이 많으므로 상대적으로 마찰력의 영향을 많이 받게 된다. 둘째, 회전모터의 회전운동을 직선운동으로 변환할 때 주로 사용하는 볼스크류의 경우에 백래시를 감소시키기 위하여 가해지는 예압으로 인하여 큰 마찰력이 발생하게 된다. 셋째, 스튜어트 플랫폼의 경우에 동일한 형태를 갖는 6개의 구동장치의 동작 특성이 균일해야 바람직하지만, 실제 조립시에 체결력 등의 차이로 인하여 각 구동장치에서의 마찰 특성이 서로 다르게 된다.

이와 같이 병렬형 머니플레이터에서는 직렬형 머니플레이터에 비하여 마찰의 영향이 크므로, 마찰력에 의한 각 구동장치의 영향을 미리 검출하여 이를 제어입력에 적절히 보상한다면 제어성능의 향상을 기대할 수 있다. 이러한 마찰을 검출하는 방식으로는 마찰력 추정기[6,7] 또는 별도의 가속도

센서[8]를 사용하는 방법 등이 있다. 이들 방법은 마찰력에 의한 가속도의 변화를 추정하거나 측정함으로써 마찰력을 추정하게 된다. 따라서 구동장치의 관성, 부하의 관성 등 제어대상의 정확한 파라미터를 알아야만 정확한 마찰력 검출이 가능하게 된다. 마찰력 검출의 또 다른 방법으로, 일정한 힘을 검출대상에 인가하여 준 다음에, 이에 따른 운동을 측정함으로써 검출대상의 마찰력을 검출할 수 있지만, 크기를 정확히 아는 힘을 인가하여 주어야 하므로 현실적으로 적용하기 어렵다. 그러나 중력은 일정한 크기와 방향의 힘을 제공하며, 특별한 장비 없이 쉽게 얻을 수 있으므로, 중력을 활용하여 마찰 특성을 얻을 수 있다면 바람직할 것이다.

마찰이 없는 이상적인 기구에 중력이 작용한다고 가정하면 그 기구는 자연스럽게 기구학적 구속조건을 만족하는 궤적을 따라서 자유낙하하게 된다. 그러나 실제로는 마찰력이 관절 또는 구동장치에 존재하여 기구를 자유낙하 속도보다 느리게 움직이게 하거나 정지시켜 버리게 된다. 그러므로 스튜어트 플랫폼의 움직임은 플랫폼이 주어진 자유낙하 운동의 궤적을 추종하도록 각 구동장치를 구동할 때의 제어입력은 마찰을 극복하는 데 필요한 힘과 같다고 해석할 수 있다. 이 때, 마찰력에 상응하는 제어입력을 구동장치의 변위에 따른 프로파일로 저장하였다가 실제 임의 궤적의 추종제어시에 활용할 경우 마찰력에 대한 보상이 수행되어 전체적인 제어성능이 개선될 수 있다[9]. 또한, 본 연구에서 제안하는 방식은 초기운전뿐만 아니라, 필요한 경우 매번 마찰력 프로파일을 검출할 수 있으므로 마찰력의 변화에 신속하게 대응하는 것이 가능하다.

본 연구는 2장에서 스튜어트 플랫폼의 기구학적 특성과 구동장치에 존재하는 마찰력 발생 특성을 언급하고, 3장에서는 중력을 사용한 마찰력 검출 원리를 상세히 기술한다. 4장에서는 실험을 통하여 본 연구에서 제안된 검출 기법을 이용하여 마찰력을 검출하고, 그 타당성을 논한 후에, 5장에서 결론을 도출한다.

* 책임저자 (Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 7. 8., 채택확정 : 2005. 4. 7.

이세한 : 경남대학교 기계자동화공학부(leesehan@kyungnam.ac.kr)

송재복 : 고려대학교 기계공학부(jbsong@korea.ac.kr)

※ 본 연구는 경남대학교 학술연구비지원에 의해 수행되었음.

II. 스튜어트 플랫폼

대표적인 형태의 병렬형 머니플레이터인 스튜어트 플랫폼(Stewart-Gough parallel manipulator)은 상단의 움직이는 플랫폼과 하단의 고정된 베이스 사이를 6개의 직선형 구동장치로 연결하여 상단 플랫폼이 위치 3자유도와 자세 3자유도의 총 6자유도를 구현할 수 있는 구조를 갖는다[3]. 스튜어트 플랫폼은 일반적인 직렬형 머니플레이터와 서로 상반된 특징을 갖고 있다. 직렬형 머니플레이터의 경우에 순기구학 해가 역기구학 해보다 쉽게 얻어지는 반면에, 병렬형 머니플레이터에서는 역기구학 해가 순기구학 해에 비해 쉽게 얻어질 뿐만 아니라, 순기구학의 경우에 많은 수의 해가 존재하는 경우가 많아서 순기구학 해를 구하기가 매우 어렵다.

스튜어트 플랫폼은 페루프 구조를 가지므로 각각의 구동장치에서 발생한 제어오차는 플랫폼에 분산되어 나타나게 되어 정밀도 향상에 유리하고, 구동장치에 굽힘 작용이 거의 없이 압축과 인장력만이 작용하므로 가벼운 중량에 비하여 높은 강성을 얻을 수 있다(직렬형 머니플레이터의 경우 필요한 강성을 확보하기 위하여 기구부의 체적을 증가시켜 중량을 증가시키기도 한다).

그러나 스튜어트 플랫폼은 페루프 구조를 갖고 선형구동장치의 작동범위가 제한되는 한계를 갖기 때문에 플랫폼의 동작 범위가 제한되는 단점을 갖고 있다. 또한, 스튜어트 플랫폼은 직선형 구동장치를 사용함에 따라 회전형 구동장치에 비해서 구조상 접촉면적이 증가하여 그 만큼 마찰력 영향을 민감하게 받게 될 뿐만 아니라, 사용된 회전-직선 변환장치인 볼스크류 기구에 백래시 제거용의 의도적인 예압까지 추가되어 있어서 더욱 마찰력의 영향을 많이 받는다. 그 결과 스튜어트 플랫폼은 구동장치에 구동력이 가해지지 않은 상태에서, 부하중량에 의해서 매우 천천히 하강하거나 마찰력에 의해서 지지되어 고정되어 버리기도 한다. 심지어 본 연구실에서 제작한 병렬형 머니플레이터의 경우 높은 예압(75kgf)이 작용된 고정밀도의 볼스크류 부품을 사용한 결과, 상당한 외력이 가해지더라도 병렬형 머니플레이터는 마찰력에 의해서 지지되어 고정되어 있는 현상이 발생하였다. 이러한 마찰력은 널리 알려진 바와 같이 비선형성이 매우 강하여 제어성능에 부정적인 영향을 미치게 된다. 다음의 Fig. 1은 본 연구실에서 제작한 전형적인 스튜어트 플랫폼을 나타낸다.

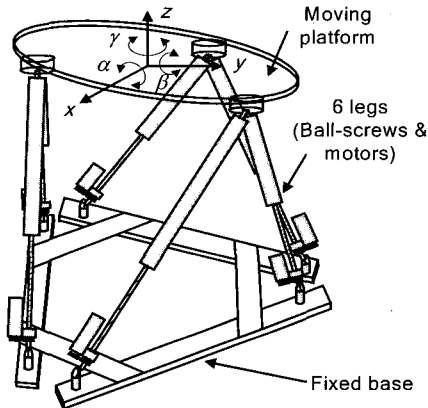


그림 1. 스튜어트 플랫폼.
Fig. 1. Stewart-gough type parallel manipulator.

III. 중력을 이용한 플랫폼의 마찰력 검출

기구의 마찰력을 검출하는 일반적인 방법의 한가지로, 기구가 움직이기 직전까지 외력을 천천히 증가시키다가, 기구가 움직이기 시작하면 외력의 증가를 멈추고 그 때까지 작용된 외력을 시간의 함수로 나타내면 정지마찰력이나 운동마찰력 등을 구할 수 있다. 그러나 이 방법은 개념적으로는 매우 단순하지만, 별도의 외력 발생 장치를 사용하여 외력을 정확하게 발생시키고 기구의 움직임을 검출하여야 하는 어려움이 있다. 본 연구에서는 이러한 외력 대신에 별도 장치가 필요 없이 쉽게 활용할 수 있는 중력을 이용하여 마찰력을 검출하는 기법을 제시하고자 한다.

스튜어트 플랫폼의 운동방정식은 일반적인 다자유도 기구와 마찬가지로 다음의 비선형 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau + F_f(\dot{q}) \tag{1}$$

여기서 $M(q)$ 는 관성질량, q 는 관절변수, $C(q, \dot{q})$ 는 원심력 및 코리올리력에 해당하는 비선형항, $G(q)$ 는 중력항, τ 는 선형구동장치에서 발생하는 제어력(control force), F_f 는 선형구동장치를 포함한 레그(leg) 및 관절 등에 존재하는 마찰력을 각각 나타낸다.

(1)에서 중력항 $G(q)$ 는 속도 및 가속도에 영향을 받지 않고 단순히 기구의 형상(configuration)과 관련되는 관절변수 q 에 의해서 영향을 받는다. 만약, 스튜어트 플랫폼의 선형구동장치가 제어력을 발생하지 않고, 마찰력도 존재하지 않는다면, 기구는 오직 중력에 의해서만 운동을 하게 된다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) = -G(q) \tag{2}$$

(2)의 중력항 $G(q)$ 는 기구가 완전히 기준면에 닿아서(스튜어트 플랫폼에서 6개의 레그가 길이가 최소가 되어 플랫폼이 가장 낮은 위치에 있는 경우) 위치에너지가 0이 되지 않는 한 계속 존재하게 된다. (2)의 해를 구하면 중력에 의해서 플랫폼이 자유낙하 운동을 할 때의 관절변수의 변화를 시간의 함수 $q_d(t)$ 로 나타낼 수 있다. 이 때, 사용한 동역학 모델은 정밀도 향상을 위해서 선형화하지 않고 구동장치의 동역학까지 포함한 동역학 모델을 이용하였다.

Fig. 2는 근사적인 마찰력 모델을 나타낸 것이다. 마찰력을 근사적으로 모델링 할 때, 마찰력은 크게 속도와 상관 없이 일정한 크기를 갖는 쿨롱마찰력(Coulomb friction force) f_c 와 이 동속도에 비례하는 점성마찰력(viscous friction) $f_v(v)$ 로 나눌 수 있다. 점성마찰력의 경우 선형적인 반면에, 쿨롱마찰력은 비선형적이다. 그러므로 쿨롱마찰력 성분이 주된 보상의 대상이 된다.

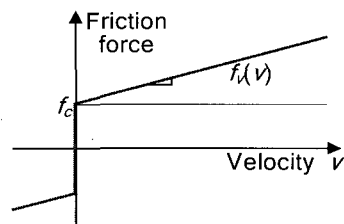


그림 2. 근사적인 마찰력 모델.
Fig. 2. Approximate friction force model.

(1)의 $F_f(\dot{q})$ 는 운동방향에 대하여 반대로 작용하는 마찰력을 나타내며, 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$F_f(\dot{q}) = \{-F_{f1} \operatorname{sgn}(\dot{q}_1), \dots, -F_{f6} \operatorname{sgn}(\dot{q}_6)\}^T \quad (3)$$

여기서, F_{fi} 는 관절 i 에 존재하는 마찰력을 나타내며, sgn 은 부호함수를 나타낸다.

만약, 스튜어트 플랫폼의 선형구동장치에 작용하는 마찰력을 상쇄시키는 제어력을 선형구동장치가 발생시킨다면, 기구는 중력에 의하여 자유낙하 운동을 하게 될 것이다. 즉, 식 (1)에서 관절변수 q 가 (2)의 자유낙하 운동에서 구한 q_g 를 추종하도록 제어를 수행하면, 이 때의 제어력 τ 가 바로 마찰력에 해당하게 된다.

$$M(q_g)\ddot{q}_g + C(q_g, \dot{q}_g)\dot{q}_g = -G(q_g) + F_f(\dot{q}) + \tau \quad (4)$$

한편, 스튜어트 플랫폼을 원하는 궤적으로 제어하기 위해서는 각 선형구동장치에 다음과 같은 PID 제어를 적용한다.

$$\tau_{PID} = K_P(q_{ref} - q) + K_I \int (q_{ref} - q)dt + K_D(\dot{q}_{ref} - \dot{q}) \quad (5)$$

이때, K_P, K_I, K_D, q_{ref} 는 각각 제어기의 비례, 적분, 미분 이득 및 목표궤적을 나타낸다. 만약, 실험을 통하여 미리 검출한 마찰력을 피드포워드 제어방식으로 보상한다면 제어신호는 다음과 같다.

$$\tau = \tau_{PID} - F_f(\dot{q}) \quad (6)$$

즉, 기구부에 존재하는 마찰력을 (6)의 제어신호에 의해서 제거한 다음에, PID 제어를 통하여 원하는 궤적을 추종하도록 제어를 수행하게 된다. 만약, 피드포워드 제어 방식에 의한 마찰력 보상이 없이 PID 제어만으로 수행한다면 제어신호는 다음과 같다.

$$\tau = \tau_{PID} \quad (7)$$

이 경우에 기구부에 존재하는 마찰력은 PID 제어에 의해서 일부 보상이 된다.

IV. 실험 및 고찰

본 연구에서 실험을 수행하기 위하여 스튜어트 플랫폼 형태의 병렬형 기구를 제작하였다. 6개의 레그(즉, 선형구동장치)는 각각 400W BLDC 모터와 볼-스크류로 구성되어 있다. 가반중량은 200kg이며, X, Y축 병진운동은 $\pm 0.2m$, Z축 병진운동은 $\pm 0.1m$, 롤과 피치는 $\pm 25^\circ$, 요는 $\pm 30^\circ$ 이다. Fig. 2는 구성도를 보여주고 있다. 제어기는 크게 두 부분으로 나누어져 있는데, 상위제어기는 기구학 등의 연산을 담당하는 PC이며, 하위제어기는 구동장치용 모터제어 관련 연산을 담당하는 TMS320C31 DSP로 구성되어 있다.

1. 마찰력 검출

실험을 수행하기 전에, 필요한 자유낙하 궤적을 얻기 위해서 중력을 외력으로 설정한 다음, 스튜어트 플랫폼의 모델식 (2)을 사용하여 동역학 문제의 해를 시뮬레이션을 통하여 계산하였다. 외력에 해당하는 중력이 수직으로만 작용하고 실험 대상인 스튜어트 플랫폼의 외형이 대칭이므로 6개의 레

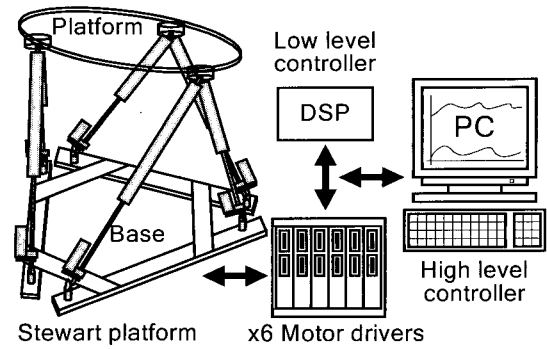


그림 3. 실험장치의 구성도.
Fig. 3. Schematic of experimental setup.

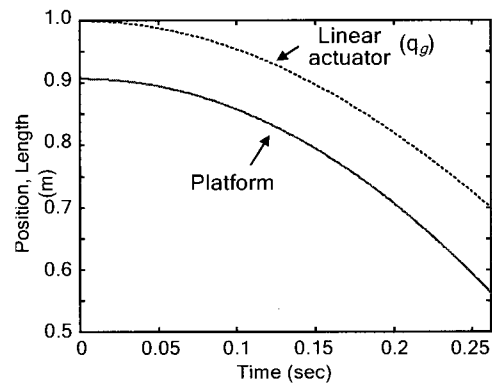


그림 4. 중력만 작용할 때의 선형구동장치의 궤적.
Fig. 4. Trajectory of linear actuator subject to gravitational force alone.

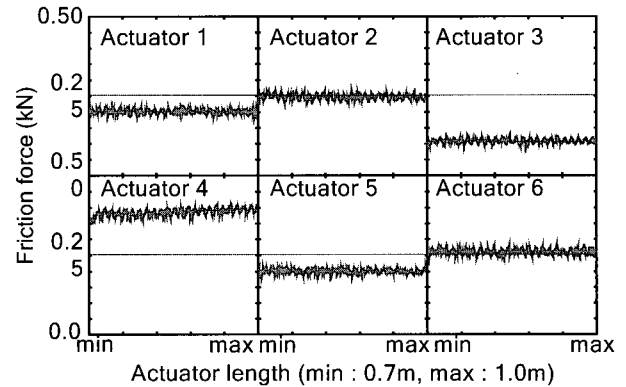


그림 5. 자유낙하 궤적의 추종시에 6개 선형구동장치에 존재하는 마찰력.
Fig. 5. Friction forces of six linear actuators when each leg follows free fall trajectory.

그의 궤적은 모두 동일하게 된다. 따라서 Fig. 4에는 1개의 레그의 궤적과 플랫폼 중심의 수직위치 궤적의 시뮬레이션 결과만을 표시하였다.

중력에 의한 자유낙하 궤적을 목표궤적으로 설정하여 실제의 스튜어트 플랫폼의 6개의 선형구동장치가 주어진 목표 궤적을 추종하도록 제어기를 작동시켰을 때의 각 제어기에서 출력되는 제어력이 바로 선형구동장치에 존재하는 마찰

력과 동일하게 된다. 이때, 마찰력을 극복하기 위해서 각 구동장치에서 출력되는 제어력이 구동장치의 조립 상태와 사용된 부품의 상태 등 개별적인 특성에 따라서 서로 다르게 나타날 것이다. Fig. 5는 실제 실험을 통해서 얻은 각 구동장치의 제어력을 나타낸다. 평균적으로 약 250N 정도의 마찰력이 존재한다. 마찰력 크기를 기준으로 평가한다면, 구동장치 3에 가장 작은 마찰력이, 구동장치 4에 비교적 큰 마찰력이 작용하고 있음을 알 수 있다.

2. 마찰력에 의한 영향

비선형성이 강한 마찰력은 제어기의 성능을 저하시킬 뿐만 아니라, 구동장치의 운동이 전환되는 지점에서는 마찰에 의해서 운동이 잠시 정지하는 문제도 발생하게 된다. 마찰력의 영향을 구체적으로 확인하기 위해서 왕복운동시 선형구동장치의 속도를 실험을 통하여 검출하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 운동방향이 전환되는 영역인 속도가 0인 부근에서 마찰력 때문에 잠시 정지하는 현상이 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 정도의 차이는 있지만, 모든 구동장치에서 공통으로 관찰되고 있다.

스튜어트 플랫폼의 마찰력을 간접적으로 검출한 결과, 플랫폼은 외형적으로는 대칭적인 구조를 갖지만, 각 구동장치에 존재하는 마찰력은 서로 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 스튜어트 플랫폼이 균일하게 조립되지 않았고, 사용된 부품들이 이상적으로 동일하지 않기 때문에 당연한 결과이다. 따라서 각 구동장치의 특성을 고려하지 않고 모든 구동장치에 동일한 제어기 이득을 적용하는 경우에 원하는 제어 성능을 얻기가 어렵다는 점을 알 수 있다.

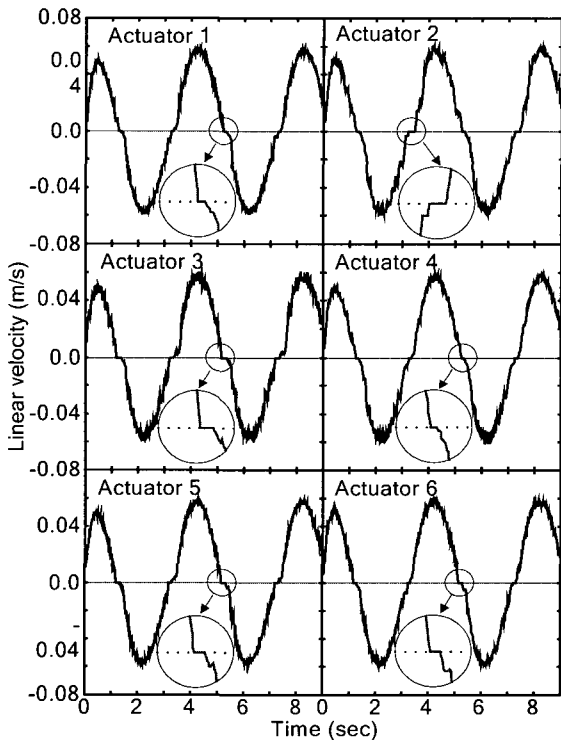


그림 6. 마찰보상 미수행시의 각 구동장치의 선속도.
Fig. 6. Linear velocity of each linear actuator with no friction compensation.

3. 마찰력 보상

검출된 마찰력이 유효한지를 확인하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 마찰보상을 수행하지 않은 Fig. 6에서와 같은 조건에서, 이번에는 4.1절에서 검출한 마찰력 프로파일을 피드포워드 제어방식으로 반영한 제어법칙 (6)을 구현한 실험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이, Fig. 6에서 관찰되었던 마찰력에 의한 구동장치의 정지현상이 개선되어 구동장치가 정지하지 않고 방향이 부드럽게 전환됨을 알 수 있다. 이러한 부드러운 운동은 정밀기구의 제어에서는 매우 중요한 제어성능으로 취급된다.

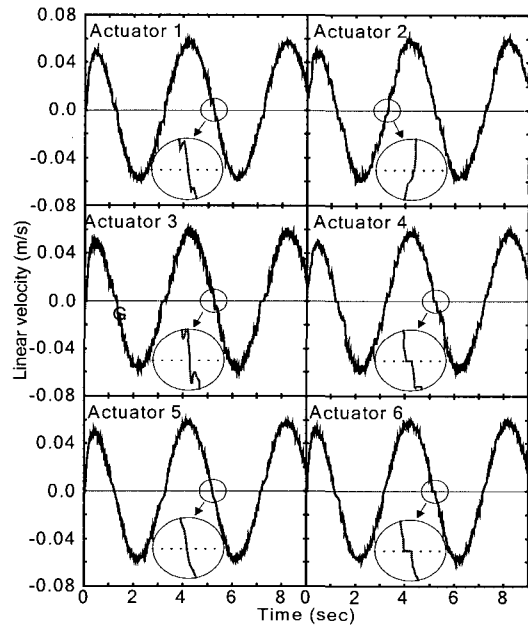


그림 7. 마찰보상 수행시의 각 구동장치의 선속도.
Fig. 7. Linear velocity of each linear actuator with friction compensation.

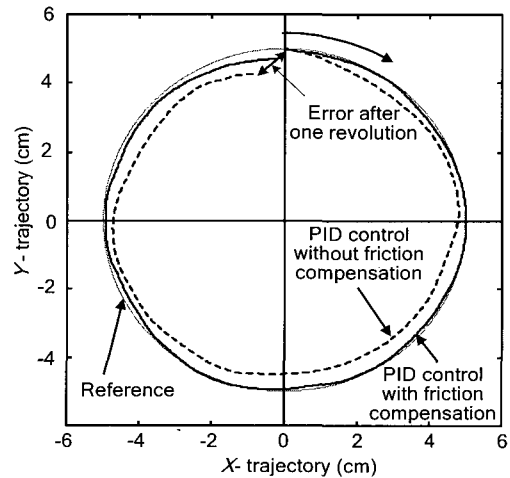


그림 8. 원궤적 추종시 마찰 보상의 포함 여부에 따른 플랫폼의 추적성능 비교.
Fig. 8. Tracking performance of moving platform following circular trajectory using PID control with and without friction compensation.

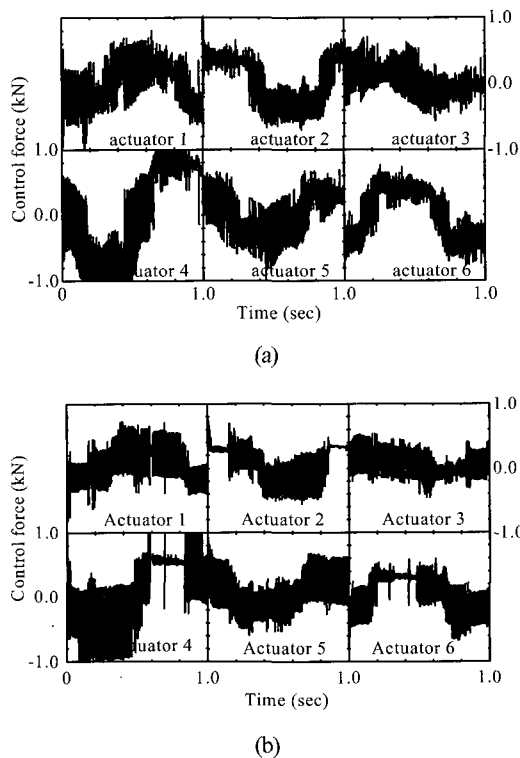


그림 9. 제어입력의 비교. (a) 마찰보상이 없는 PID 제어기, (b) 마찰보상을 하는 PID 제어기.

Fig. 9. Control inputs. (a) PID control without friction compensation, and (b) PID control with friction compensation.

이번에는 6개 선형구동장치가 복합적으로 동작하도록 하기 위하여 플랫폼의 중심이 반경 5cm인 원궤적을 추종하도록 제어를 수행하였다. 이 실험에서는 제어법칙 (7)과 같이 마찰보상 없이 PID 제어만을 수행한 경우와 (6)과 같이 마찰보상과 동시에 PID 제어를 수행한 경우로 나누어 실험을 수행하였으며, 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 예상한 바와 같이, 마찰보상을 한 경우가 보상을 하지 않은 경우에 비하여 기준 원궤적을 훨씬 정확하게 추종함을 알 수 있다. 또한, 마찰보상을 하지 않은 경우에는 원궤적을 한 바퀴 추종한 후에 상당한 오차가 발생하였음을 관찰할 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8의 원궤적의 추적 제어시에 제어입력을 비교한 것이다. 마찰보상을 하지 않는 Fig. 9(a)와 마찰보상을 하는 Fig. 9(b)를 비교하여 보면, 전체적으로 제어입력의 형태에 큰 차이가 있지는 않지만, 마찰보상을 하는 경우에 각 구동장치의 제어입력의 최대값과 최소값의 차이가 마찰보상을 하지 않은 경우에 비하여 다소 감소되었음을 관찰할 수 있다. 이는 피드포워드 마찰보상기가 존재하지 않는 Fig. 9(a) 경우에는 마찰력을 PID 제어기의 적분기가 거의 대부분 부담하여 제어입력의 오버슈트를 유발하기 때문으로 해석된다. 반면에

피드포워드 방식의 마찰보상 기법은 마찰력을 미리 보상하여 시간 지연 없이 제어를 수행할 수 있으므로 상대적으로 제어입력의 변화가 작게 된다.

V. 결론

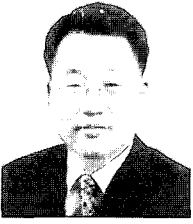
본 연구에서는 중력을 이용하여 스튜어트 플랫폼의 기구부에 존재하는 마찰력을 검출하고, 검출된 마찰력의 보상을 통하여 플랫폼의 제어 성능을 개선하는 방안을 제안하였다.

마찰력 검출에는 여러 기법이 존재하지만, 본 연구에서 제안한 방식은 중력을 이용하므로 별도의 특별한 장비가 필요하지 않으며, 제어기 알고리즘의 일부로 포함되어 제어 대상이 변경되거나 초기화 동작 때마다 수시로 온라인상으로 실행될 수 있다는 장점이 있다. 구동장치에 존재하는 마찰력이 항상 주변의 온도, 습도 같은 환경에 영향 받기 쉬우므로 초기화 시마다 마찰력 검출을 온라인으로 수행할 수 있다는 점은 상당한 장점이 될 수 있다.

이렇게 검출된 각 구동장치의 마찰력 정보를 플랫폼 제어시에 피드포워드 제어 방식으로 구현하는 마찰력 보상을 수행하면, 각 구동장치의 위치제어에 큰 도움이 되어 궁극적으로 플랫폼의 위치제어의 정확성을 향상시킬 수 있게 된다.

참고문헌

- [1] G. Leuret, K. Liu, and F. L. Lewis, "Dynamic analysis and control of a stewart platform manipulator," *Journal of Robotic Systems*, vol. 10, no. 5, pp. 629-655, 1993.
- [2] S. Chae, C. Chung, H. Yang, Y. Choi, S. Lee, "Adaptive control of a 6 DOF stewart platform based machine tool," *Proc. of MOVIC '98*, vol. 2, pp. 461-466, 1998.
- [3] L. W. Tsai, *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [4] D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom," *Proc. of Inst. Mech. Engr.*, 180(1), pp. 371-386, 1965.
- [5] M. W. Spong, M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, 1989.
- [6] M. Iwasaki and N. Matsui, "Observer-based nonlinear friction compensation in servo drive system," *Proc. of Int. Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 344-348, 1996.
- [7] M. Iwasaki, T. Shibata, N. Matsui, "Disturbance-observer-based nonlinear friction compensation in table drive system," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 4, pp. 3-8, 1999.
- [8] J. Ishikawa, M. Tomizuka, "Pivot friction compensation using an accelerometer and a disturbance observer for hard disk drives," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 3, pp. 194-201, 1998.
- [9] S.-H. Lee, J.-B. Song, W.-C. Choi, and D. Hong, "Position control of a stewart platform using inverse dynamics control with approximate dynamics," *Mechatronics*, vol. 13, no. 6, pp. 605-619, July, 2003.



이 세 한

1968년 4월 22일생. 1989년 고려대학교 기계공학과(공학사). 1991년 고려대학교 기계공학과(공학석사). 2002년 고려대학교 기계공학과(공학박사). 2004년~현재 경남대학교 기계자동화공학부 전임강사. 관심분야는 병렬로봇 시스템의 설계 및 제어, 모터제어 시스템, 생산자동화, 메카트로닉스.

계 및 제어, 모터제어 시스템, 생산자동화, 메카트로닉스.



송 재 복

1960년 8월 5일생. 1983년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1985년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1992년 MIT 기계공학과(공학박사). 1993년~현재 고려대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 이동로봇의 주행, 햅틱스, 지능로봇 시스템의 설계 및 제어.

시스템의 설계 및 제어.