

유전 알고리즘을 이용한 매니플레이터 조인트의 마찰력 규명 및 실험적 검증

김 경 호* · 박 윤 식**
(1999년 8월 26일 접수)

Manipulator Joint Friction Identification using Genetic Algorithm and its Experimental Verification

Gyeong-Ho Kim and Youn-Sik Park

Key Words : Flexible Manipulator(유연한 매니플레이터), Friction Identification(마찰력 규명), Genetic Algorithm(유전 알고리즘), Optimization Problem(최적화 문제)

Abstract

Like many other mechanical dynamic systems, flexible manipulator systems experience stiction or sticking friction, which may cause input-dependent instabilities. Manipulator performance can be enhanced by identifying friction but it is hard and expensive to measure friction by direct and precise sensing of contact displacements and forces. This study addresses the problem of identifying flexible manipulator joint friction. A dynamic model of a two-link flexible manipulator based upon finite element and Lagrange's method is constructed. The dynamic model includes the effects of joint compliances and actuator dynamics. Friction is also incorporated in the dynamic model to account for stick-slip at the joints. Next, the friction parameters are to be determined. The identification problem is posed as an optimization problem to be solved using nonlinear programming methods. A genetic algorithm is used to increase the convergence rate and the chances of finding the global optimum. The identified friction parameters are experimentally verified and it is expected that the identification technique is applicable to a system parameter identification problem associated with a wide class of nonlinear systems.

1. 서 론

일반적인 산업용 로봇에 비해 운동부의 관성이 작은 가벼운 링크의 매니플레이터(manipulator)는 고속으로 운행할 수 있고 적은 에너지를 소모한다. 그러나, 링크의 유연성으로 인해 아주 복잡한 운동을 보이며, 잔류진동은 새로운 문제를 발생시킨다. 잔류진동을 줄이고 정확한 위치 제어를 위해서 동역학 모델에 기반을 둔 제어 알고리즘에 관한 연구가 많이 있었는데, 이와 같은 경우에는 사용하는 동역학 모델의 정확성은 매우 중요하다.

대부분의 연구에서는 링크의 유연성만으로도 발생되는 비선형적인 복잡한 운동 때문에 마찰력을 무시하거나, 또는 쿨롱마찰과 같은 단순한 마찰을 가정한 매니플레이터의 동역학 모델을 사용한다. 그러나, 이러한 모델은 스틱슬립, Stribeck 효과와 같은 실제로 일어나는 마찰력의 영향을 잘 반영하지 못하므로 정밀한 진동 및 위치 제어에 한계를 준다.

주로 실험에 기반을 둔 마찰학 분야의 많은 연구에 힘입어 실제 마찰력의 효과를 잘 반영하는 수학적 모델들이 많이 제안되었다. 이런 마찰 모델을 사용하기 위해서는 먼저 마찰 모델에 사용된 인자가 규명되어야 하는데, 대부분의 경우에는 모델 자체가 실험에 기반을 두었기 때문에 이런 인자에 물리적 의미를 부여하기 힘들며, 특히 매니플레이터와 같은 복잡한 시스템에 작용되는 마찰

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : yspark@sorak.kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3020 FAX : (042)869-8220

인자는 직접적으로 측정하기 어렵다. 물론, 시스템을 분리해서 각각의 간단한 구성요소에서 발생하는 마찰력을 측정함으로써 이들 인자를 결정할 수도 있으나, 시스템의 조립 상태에 따라 이들 인자가 바뀔 수 있으므로 직접 측정으로 이를 규명하는 것은 매우 어렵다.

김원진⁽¹⁾은 주파수 영역에서 쿨롱마찰계수와 같은 비선형 동특성 인자를 규명하는 방법을 제안하고 이를 실험적으로 검증하였다. 본 연구에서는 마찰 모델에 사용된 인자를 설계 변수로 하는 최적화 문제를 이용해, 이들 마찰 인자를 효과적으로 규명하고자 한다. 어떠한 입력에 대한 매니플레이터 시스템의 출력과 마찰 모델을 포함한 매니플레이터 동역학 모델로부터의 출력을 비교하여 이들 간의 오차가 최소화되게 설계 변수를 정함으로써, 직접적 측정에 의존하지 않고 마찰 인자를 규명하려는 것이다. 기본적인 가정은 동특성 인자가 정확히 규명되면 물리적 시스템의 응답과 동역학 모델로부터의 응답 간의 오차가 가장 작게 된다는 것이다. 본 연구에서는 전체 최소치로의 수렴 가능성이 높은 유전 알고리즘을 사용하였다. 규명된 인자를 이용해 다른 입력에 대한 매니플레이터 시스템과 동역학 모델간의 응답을 서로 비교함으로써, 사용한 모델의 타당성을 검증하였다. 이렇게 만들어진 동역학 모델은 유연한 매니플레이터의 동역학적 특성을 파악하는데 쓰여질 수 있을 것이며, 또 이러한 마찰력 규명 방법은 다른 복잡한 시스템에도 같이 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 유한요소법을 이용한 동역학 모델링

2.1 매니플레이터 시스템 개요

유연한 2 링크 매니플레이터는 Fig. 1 과 같이 2 개의 링크와 2 개의 회전 조인트 그리고 이를 지지하는 지지대(supporter)로 이루어져 있다. 조인트는 매니플레이터 구동을 위한 서보모터, 하모닉 드라이브 그리고 조인트 각변위 검출을 위한 인코더(encorder)로 구성된다. 조인트 1 과 2 의 인코더 각변위 분해능은 각각 0.0072°와 0.0144°로 가능한 높은 각변위 분해능을 갖도록 구성하였다. 하모닉 드라이브의 특징은 백래시가 거의 없고 조정축과 출력축의 감속비가 크며 큰 강성을 가진다는 것이다. 매니플레이터 구동은 속도 제어방식 서보드라이버를 통한 컴퓨터 운동지령에 의해 이루어진다. 링크의 유연성으로 운동 중 진동이 발생되는데, 스트레인게이지를 이용해서 링크의 변

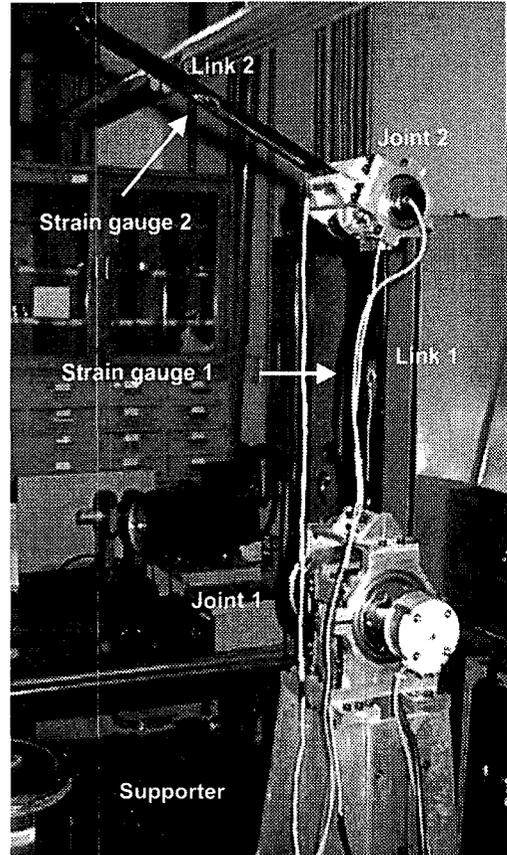


Fig. 1 The two-link flexible manipulator

형량을 측정할 수 있다. 스트레인게이지는 변형량과 절점(nodal point)을 고려해서 링크 중간부위에 양면으로 설치했다. 마찰이 발생하는 부분은 주로 모터, 베어링 그리고 하모닉 드라이브를 포함하는 조인트 부분이다. 복잡한 조인트 구조로 직접 측정에 의해 마찰력 검출 방법에는 많은 어려움이 있다. 이러한 마찰력은 매니플레이터의 운동과 링크의 진동에 영향을 미치게 되므로 측정된 조인트 각변위와 링크의 변형량을 이용해서 마찰력을 간접적으로 규명한다.

2.2 운동방정식

매니플레이터 시스템과 동역학 모델의 입력에 대한 응답오차를 이용해서 마찰력을 규명하므로 동역학 모델은 매니플레이터 시스템의 특성을 잘 반영할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 동역학 모델을 세우고 조인트 유연성, 로터의 관성 및 구동부의 동역학적 특성을 모두 고려하였다.

링크의 유연성을 고려한 매니플레이터 운동방정식을 유도하기 위해 각 링크를 2 개의 요소로

나누어 강체운동뿐만 아니라 탄성운동도 표시할 수 있도록 일반화좌표를 설정하였다. 본 연구에 사용된 매니플레이터는 비틀림 운동이 발생되지 않도록 각 링크의 중심선이 일치되도록 설계되었으며, 운동평면을 중력방향과 일치시켰다. 따라서, 운동방정식을 유도할 때, 모든 운동이 평면 내에서 발생된다고 가정할 수 있다. 또한, 링크는 굽힘에 의한 변형이 가장 크게 나타나도록 설계되었으므로 운동방정식에는 굽힘에 의한 영향만 고려하고 그 외 인장, 전단, 비틀림에 의한 효과는 무시하였다.

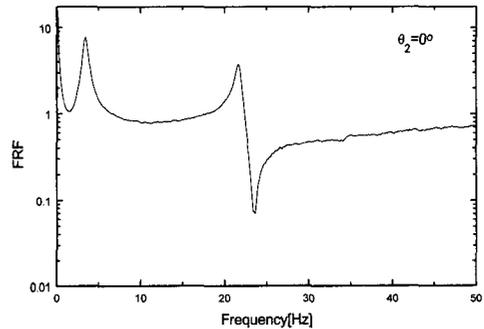
동역학 모델의 정확성을 높이기 위해서 매니플레이터 조인트의 유연성과 구동부의 동역학적 특성을 고려하였다. 조인트의 유연성은 토크를 전달하는 모터와 기어 연결축의 비틀림에 의해서 발생되는데, Fig. 2 와 같이 모델링 할 수 있다. 본 연구에 사용된 매니플레이터는 동력전달 장치로 하모닉 드라이브를 사용하였기에, 기어 백래쉬에 의한 비선형적인 영향은 고려되지 않는다. 저속으로 운동하는 매니플레이터의 경우, 로터의 운동 에너지는 로터 자체의 회전 운동에 의한 것이고 매니플레이터 링크의 회전에 의해 발생하는 로터의 운동에너지 효과는 무시될 수 있다. 따라서, 코리올리 가속도에 의한 로터의 운동에너지는 무시하고 자체의 회전에 의한 운동에너지만 고려하는 것은 타당하다고 할 수 있다.⁽²⁾

앞에서 정의한 좌표계와 일반화좌표를 사용해서 매니플레이터의 운동 및 위치에너지를 구하고 일반화외력을 정의한 다음, 라그랑지 방정식을 적용해서 동역학 모델을 구하였다.⁽³⁾ 운동방정식에 포함되는 일반화외력은 제어 시스템에 의한 입력 토크와 조인트 부위에서의 마찰력이다. 매니플레이터를 구동시키는 제어 시스템은 조인트 각속도를 제어하기 위한 아날로그 PID 회로로 이루어져 있으며, 페루프를 통하여 모터에 구동 전류를 공급한다.⁽⁴⁾

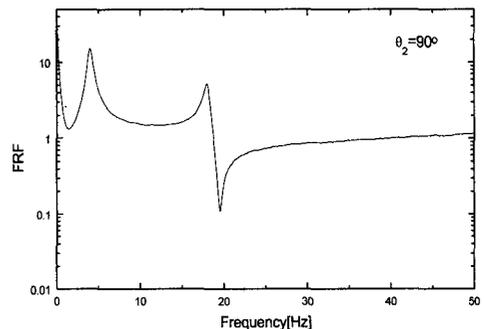
2.3 동역학 모델의 타당성 검토와 마찰력 영향
매니플레이터 시스템에 마찰력이 작용하지 않는다면, 조인트의 유연성, 로터의 관성과 구동부의

동역학적 특성을 모두 고려한 동역학 모델은 매니플레이터 시스템의 특성을 잘 반영하는 모델이다. Cho⁽⁴⁾는 실험을 통해서 이들을 고려한 동역학 모델은 개선된 동역학 모델이라는 것을 보였다.

동역학 모델의 타당성을 검토하기 위해서 매니플레이터 시스템과 동역학 모델의 고유진동수 및 운동 중 조인트 각변위와 링크 변형률을 비교하였다. 마찰력이 규명되지 않은 상태이므로 동역학 모델에서 마찰력 항은 제거하고 모의실험을 수행하였다.



(a) $\theta_2 = 0^\circ$



(b) $\theta_2 = 90^\circ$

Fig. 3 Frequency response functions

Table 1 Comparisons of natural frequencies ($\theta_1 = 90^\circ$)

(a) $\theta_2 = 0^\circ$		
	1 st Nat. Frequency	2 nd Nat. Frequency.
Manipulator	3.5Hz	21.6Hz
Model	3.52Hz	21.9Hz
(b) $\theta_2 = 90^\circ$		
	1 st Nat. Frequency	2 nd Nat. Frequency.
Manipulator	4.3Hz	18Hz
Model	4.28Hz	17.96Hz

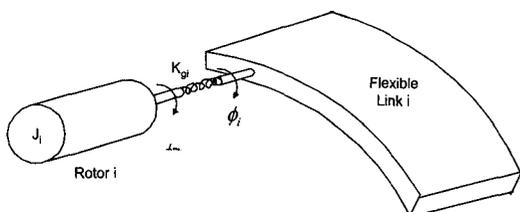


Fig. 2 Elastic joint modelling

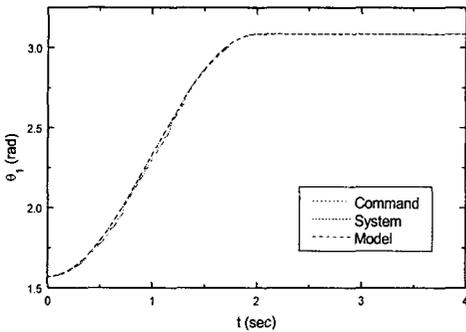
Fig. 3 은 $\theta_1 = 90^\circ$ 로 고정된 경우, $\theta_2 = 0^\circ$ 와 $\theta_2 = 90^\circ$ 일 때, 매니플레이터가 정지한 상태에서의 주파수 응답 함수이며, Table 1 은 매니플레이터 시스템과 동역학 모델간의 고유진동수를 비교한 것이다. 측정은 저주파 영역에서 효과적인 스트레인게이지를 이용했으며 주파수 분해능은 0.125Hz 이다. 고유진동수의 비교 실험은 매니플레이터가 정지된 상태에서 수행되어 조인트 부위에서 상대 운동이 일어나지 않으므로 마찰력의 영향이 포함되지 않는다. 이 실험 결과, 조인트의 유연성과 구동부의 동역학적 특성을 고려한 동역학 모델은 타당하다는 것을 알 수 있다.

운동 중 동역학 모델의 타당성을 검토하기 위해서 아래와 같은 조인트 각변위 입력 명령에 대해, 매니플레이터 시스템과 동역학 모델의 출력 각변위와 링크 변형률을 비교하였다.

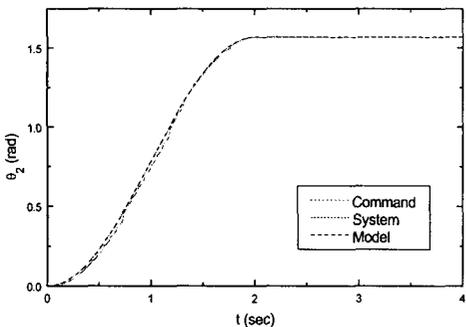
$$\theta_1(t) = \frac{\pi}{4} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right) \right) + \frac{\pi}{2}, \quad \theta_2(t) = \frac{\pi}{4} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right) \right) \text{ for } 0 \leq t \leq 2$$

$$\theta_1(t) = \pi, \quad \theta_2(t) = \frac{\pi}{2} \text{ for } 2 \leq t \leq 4$$

Fig. 4 와 Fig. 5 는 매니플레이터 시스템과 동역학 모델의 조인트 각변위를 비교한 것인데, 동역



(a) Joint 1

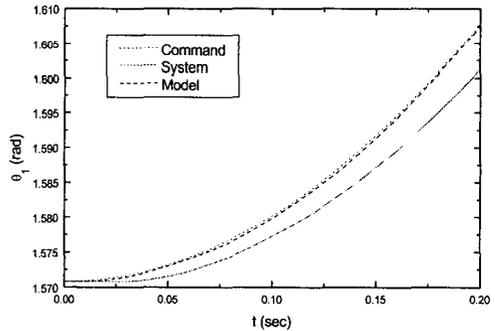


(b) Joint 2

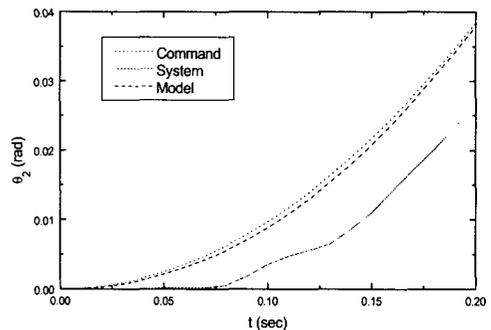
Fig. 4 Comparisons of joint angular displacements

학 모델에서 마찰력을 고려하지 않았기 때문에 오차가 발생하였다. 특히, 운동이 시작되는 부분만 확대한 Fig. 5 에서 볼 수 있듯이, 매니플레이터 시스템은 마찰력을 고려하지 않은 동역학 모델과는 달리 일정 시간 정지한 후 갑자기 운동을 시작함을 알 수 있다. 이는 저속영역에서 발생하는 전형적인 스틱슬립 현상에 기인한다. 링크 중간 부위에서 링크 변형률을 비교한 Fig. 6 은 이러한 스틱슬립에 의한 영향을 잘 나타내고 있다. 마찰력에 의해 일정 시간 정지한 후, 운동이 시작되는 매니플레이터 시스템에서 측정된 링크 변형률은 모의 실험에서 얻은 링크 변형률과 위상차를 보이고 있다.

조인트 유연성, 로터의 관성 및 구동부의 동역학적 특성을 모두 포함시켰지만, 고려되지 않은 마찰력의 영향으로 동역학 모델의 응답은 매니플레이터 시스템의 응답과 차이가 난다. 본 연구에서는 매니플레이터 시스템과 동역학 모델의 조인트 각변위 오차를 최소화하는 기준에서 마찰력을 규명하였다.

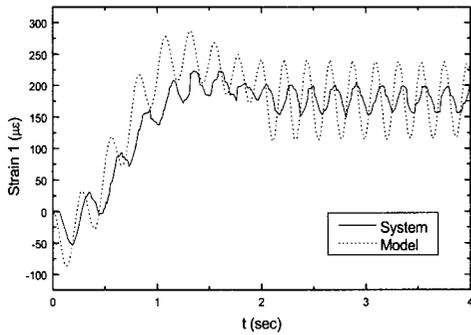


(a) Joint 1

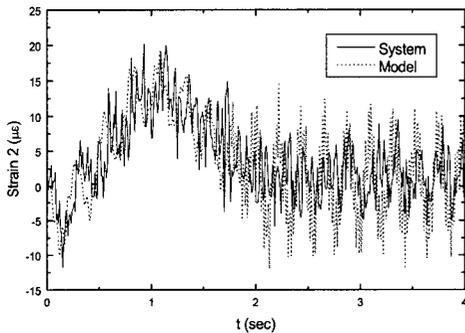


(b) Joint 2

Fig. 5 Comparisons of joint angular displacements : low velocity regime



(a) Link 1



(b) Link 2

Fig. 6 Comparisons of link strains

3. 최적화 문제를 통한 마찰력 규명

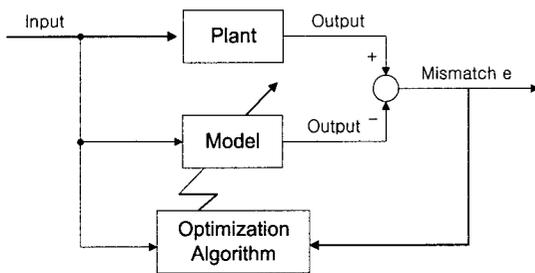


Fig. 7 System parameter identification model⁽⁵⁾

3.1 매개변수 규명 방법

Fig. 7 은 Check⁽⁵⁾가 제안한 물리적 시스템과 수학적 모델 간의 출력 오차를 최소화하여 시스템 매개변수를 구하는 방법을 나타낸다. 매개변수를 규명하기 위한 기본적인 가정은 만일 물리적 시스템과 수학적 모델의 거동이 거의 같다면, 시스템을 올바르게 묘사할 수 있는 수학적 모델을 얻었다는 것이다. 만일 시스템과 모델의 거동이 다르다면, 모델 또는 모델에 사용된 매개변수를 변경

함으로써 이러한 오차를 줄일 수 있고, 따라서 시스템을 올바르게 묘사할 수 있는 수학적 모델을 얻을 수 있다는 것이다. 정확한 모델의 규명 방법은 Fig. 7 에서와 같이, 출력 오차를 최소화하는 최적화 문제로 볼 수 있다.

추정 또는 규명해야 할 시스템 매개변수 또는 매개변수의 집합을 \tilde{z} 라고 하고 \tilde{z} 를 실제 \tilde{z} 의 추정값이라고 하면, 시스템과 모델의 출력 오차는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\tilde{e}(\tilde{z}, t_i) = \tilde{y}_p(t_i) - \tilde{y}_m(\tilde{z}, t_i) \quad (1)$$

여기서,

$\tilde{z} \in \tilde{R}^p$, p : 매개변수의 총 개수

\tilde{e} , \tilde{y}_p and $\tilde{y}_m \in \tilde{R}^n$, n : 출력의 총 개수

$\tilde{y}_p(t_i)$ 는 샘플링 시간 t_i 에서 시스템의 출력을 나타내고, $\tilde{y}_m(\tilde{z}, t_i)$ 는 샘플링 시간 t_i 에서 추정된 매개변수 \tilde{z} 에 의존하는 모델의 출력을 나타낸다. 전체 샘플의 개수를 N 이라 하면, 식 (1)을 이용한 최적화 문제의 목적함수를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J_e(\tilde{z}) = \sum_{i=1}^N q_i \tilde{e}^T(\tilde{z}, t_i) \tilde{e}(\tilde{z}, t_i) \quad (2)$$

q_i 는 시간 t_i 에 따라 변할 수 있는 가중치이다. 따라서, 여기서 사용된 목적함수는 가중치가 주어진 시스템과 모델 간의 응답오차 제곱의 합이다.

식 (2)와 같이 목적함수가 정의되면, 매개변수 또는 설계변수를 규명하는 문제는 다음과 같은 최적화 문제로 바꿀 수 있다.

$$\begin{aligned} & \underset{\tilde{z}}{\text{Minimize}} J_e \\ & \text{subject to } \tilde{y}_m = \tilde{G}(\tilde{z}, t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$J_e: \tilde{R}^n \rightarrow R$$

$$\tilde{G}: \tilde{R}^p \rightarrow \tilde{R}^n, \tilde{y}_m \in \tilde{R}^n, \tilde{z} \in \tilde{R}^p$$

구속 방정식은 모델의 출력 \tilde{y}_m 이 추정된 설계변수 \tilde{z} 에 의존하는 시스템의 동역학 모델을 만족해야 한다는 것을 의미한다.

매개변수가 완전히 규명되면, 이론적인 목적함수 J_e 값은 0 이된다. 최적화 알고리즘을 이용해서 최적화된 설계변수 \tilde{z}^* 에서 목적함수 J_e 의 값이 0 으로 가까워지면, \tilde{z}^* 는 실제 시스템의 알려지지 않은 매개변수 \tilde{z} 를 근사적으로 나타낸다고 할 수 있고, 따라서 실제 시스템이 규명되었다고 할 수 있다.

실제 이런 방법을 적용하기 위해서 고려되어야

할 사항은 다음과 같다.

첫째, 입력의 특성에 따라 규명해야 하는 매개 변수의 민감도가 달라지기 때문에 매개변수를 정확히 규명할 수 있는 입력을 선택하여야 한다. 주로 진폭이 작은 저주파 신호의 경우에는 스틱슬립과 같은 마찰력의 비선형적 특성을, 진폭이 적당히 큰 고주파 신호의 경우에는 마찰력의 선형적 특성을 가진하게 될 것이다. 시스템 매개변수에 따라 타당한 입력을 선택해야 성공적으로 시스템을 규명할 수 있게 된다. 이러한 입력 선택의 어려움을 해결할 수 있는 방법은 여러 종류의 입력에 대해 출력력을 조사하고 이를 최소화하는 방법이다.

둘째, 적절한 최적화 알고리즘을 사용해야 한다. 유연한 매니플레이터와 같은 비선형적 시스템의 경우에는 모의실험에 많은 시간이 소모된다. 최적화 문제를 이용해 매개변수를 추출하는 이와 같은 경우, 달라지는 매개변수에 따라 모의 실험을 반복적으로 수행해야 하기 때문에 수렴 속도가 빠른 최적화 알고리즘을 선정해야 한다. 또, 일반적으로 위와 같은 목적함수에는 여러개의 국부 최소값이 존재하게 된다. 최적화 문제를 통해 찾은 목적함수값이 전체 최소값일 때 시스템이 정확히 규명되었다고 할 수 있기 때문에, 전체 최소치를 찾을 가능성이 높은 알고리즘을 사용해야 할 것이다.

3.2 마찰모델

Armstrong-Helouvry 등⁽⁶⁾은 실험적으로 밝혀진 마찰의 여러가지 현상에 대해 언급하고 이를 반영하는 마찰 모델이 대해 설명하였다. 그리고, 마찰력 분석 및 규명 방법에 대해 광범위하게 설명하였으며, 성공적인 마찰력 규명과 보상은 적절한 모델의 사용과 분석에 있다고 하였다. Haessig⁽⁷⁾는 스틱슬립 현상을 나타낼 수 있는 강선모(bristle)모델과 Reset Integrator 모델을 사용하여 이를 실제 시스템에 적용하였다. Canudas de Wit⁽⁸⁾는 마찰력의 비대칭성과 위치 의존적 특징 등을 나타낼 수 있는 선형적 마찰 모델을 이용하여 마찰력을 보상하는 방법을 제시했으며, 실제 로봇 매니플레이터에 적용하였다. Canudas de Wit 등⁽⁹⁾은 실험적으로 밝혀진 많은 마찰 현상을 묘사할 수 있는 비선형적 마찰 모델을 제안하고 모의실험을 통해 이의 특성을 고찰하였다.

Fig. 5 에서 볼 수 있듯이, 저속영역에서 매니플레이터 시스템의 운동은 마찰력에 의해 스틱슬립이 발생되고 이의 영향으로 Fig. 6 에서와 같이 마찰력을 고려하지 않은 동역학 모델과 매니플레이

터 시스템의 링크 변형률에 위상오차가 발생됨을 알 수 있었다. 따라서, 선정되는 마찰 모델은 스틱슬립 현상을 나타낼 수 있어야 한다.

본 연구에서는 스틱슬립의 효과를 나타낼 수 있는 Reset Integrator 모델을 사용하였다.⁽⁷⁾ 마찰면 내부의 변형률을 대표하는 p 라는 양을 정의하고 이 값이 한계 변형률 p_0 보다 작으면 스틱이 발생되고 p_0 보다 크면 슬립이 발생한다는 모델이다. 마찰면의 상대속도를 V_r 이라 하면, p 는 아래와 같은 식에 의해 결정된다.

$$\dot{p} = 0 \begin{cases} V_r > 0 \text{ and } p \geq p_0 \\ \text{or} \\ V_r < 0 \text{ and } p \leq -p_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\dot{p} = V_r, \text{ otherwise}$$

식 (4)에 의해 스틱이 발생할 때의 마찰력은

$$F_f = K_r(1+a)p + B\dot{p} \quad (5)$$

이고, 슬립이 발생한 때의 마찰력은 다음과 같다.

$$F_f = K_r p \quad (6)$$

여기서 K_r 은 스프링 상수, $K_r a p$ 항은 스틱이 발생할 때 생기는 부가적인 마찰력 효과 그리고 $B\dot{p}$ 은 감쇠효과를 나타낸다.

3.3 마찰인자 규명

매니플레이터 조인트에 Reset Integrator 모델로 표현될 수 있는 마찰력이 작용한다면, 각 조인트마다 규명해야 하는 마찰인자는 K_r , B , p_0 , a 이다. 본 연구에 사용된 매니플레이터는 조인트가 2 개이므로, 최적화 문제의 설계 변수 \bar{z} 는 다음과 같다.

$$\bar{z} = [K_{r1} \quad B_1 \quad p_{01} \quad a_1 \quad K_{r2} \quad B_2 \quad p_{02} \quad a_2]^T$$

이들 인자를 규명하기 위해 매니플레이터 시스템과 마찰력을 고려한 동역학 모델에 아래와 같은 입력 명령을 주고 조인트 각변위를 출력으로 해서 최적화 문제를 만들 수 있다.

$$\theta_1(t) = \frac{\pi}{4} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right) \right) + \frac{\pi}{2}, \quad \theta_2(t) = \frac{\pi}{4} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right) \right) \text{ for } 0 \leq t \leq 2$$

$$\theta_1(t) = \pi, \quad \theta_2(t) = \frac{\pi}{2} \text{ for } 2 \leq t \leq 4$$

운동이 시작되는 영역에서 발생하는 스틱슬립 현상을 규명할 수 있도록 목적함수에 시간 t_i 에 따라 변할 수 있는 가중치를 준 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\underset{\bar{z}}{\text{Minimize}} J_e \quad (7)$$

$$J_c = \sum_{i=1}^N (q_1 (\theta_{p1}(t_i) - \theta_{m1}(\tilde{z}, t_i))^2 + q_2 (\theta_{p2}(t_i) - \theta_{m2}(\tilde{z}, t_i))^2)$$

여기서,

q_1, q_2 : 시간에 따라 변하는 조인트 1, 2의 가중치

$\theta_{p1}(t_i), \theta_{p2}(t_i)$: 시간 t_i 에서 매니플레이터의 조인트 1, 2의 각변위

$\theta_{m1}(\tilde{z}, t_i), \theta_{m2}(\tilde{z}, t_i)$: 동특성 인자가 \tilde{z} 일때, 시간 t_i 에서 동역학 모델의 조인트 1, 2의 각변위

일반적으로 위와 같은 목적함수에는 많은 국부 최소값이 존재하기 때문에, 목적함수의 구배(gradient)를 이용하는 최적화 알고리즘은 부적합하다. 여기서 사용된 최적화 알고리즘은 유전 알고리즘(genetic algorithm)으로, 많은 국부 최소값을 갖는 목적함수에 사용될 수 있으며, 전체최소치를 찾을 가능성이 높다고 검증되어 있다⁽¹⁰⁾.

스틱슬립 현상이 발생하는 운동 초기에 많은 가중치를 주고 유전 알고리즘을 이용해 최적화 문제를 푼 결과, 세대(generation)에 따른 목적함수값의 변화 추이는 Fig. 8에 나타나 있다. 유전 알고리즘을 사용하면 전체최소치로의 수렴 가능성이 높다는 것은 검증되어 있지만, 수렴한 해가 항상 전체 최소치라는 것을 보장하지는 않는다. 본 연구에서는 여러 가지 초기 개체군에 대해 반복적으로 유전 알고리즘을 적용하여 최적화 문제를 풀어서 동일한 해로 수렴함을 확인하였다. 또, 유전 알고리즘은 설계변수 영역을 이산화하기 때문에 수렴된 해가 준최적해일 수 있으므로 목적함수의 구배를 이용하는 최적화 알고리즘을 수렴된 해에 최종적으로 적용하여 전체 최소치로의 수렴 가능성을 높였다. Table 2는 이렇게 규명된 설계변수값을 정리한 것이며, 규명된 설계변수가 물리적으로 타당하다는 것 또는 전체 최소치라는 것을 검증하기 위해 추가적인 실험을 수행하였다.

Fig. 9는 규명된 마찰력에 의한 조인트의 각변

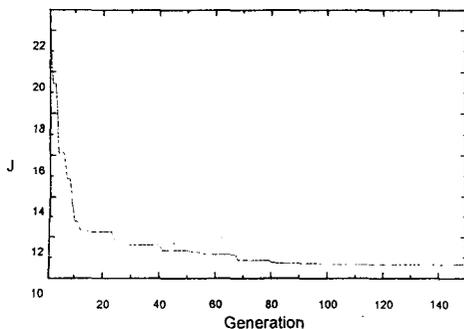


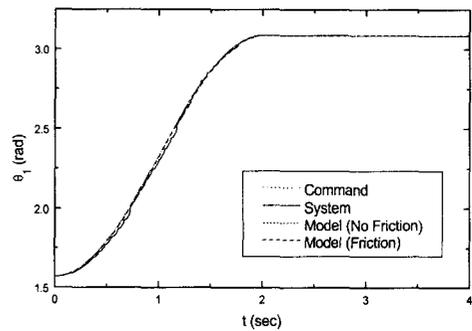
Fig. 8 Optimization result

위와 실험에서 구한 조인트의 각변위를 비교한 것이고 Fig. 10은 스틱슬립이 발생하는 영역을 확대하여 보여주고 있고 여기서, 마찰력을 고려한 동역학 모델은 스틱슬립 현상을 나타낸다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11은 동역학 모델과 매니플레이터 시스템의 링크의 중간 부분에서의 링크 변형률을 비교한 것이다. 마찰력을 고려하지 않은 동역학 모델의 변형률은 매니플레이터 시스템의 변형률과 위상오차가 생기고 마찰력을 고려한 동역학 모델의 변형률은 이러한 위상오차가 없음을 확인할 수 있다.

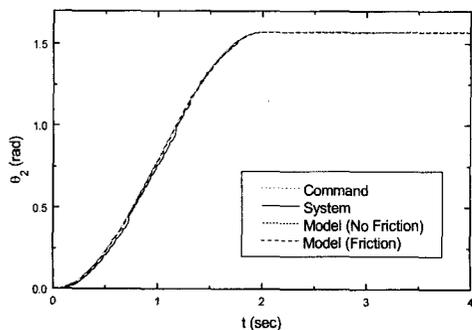
Fig. 12는 제어입력에 의한 모터 토크와 매니플레이터 시스템의 최대정지 마찰력을 나타낸다. 매니플레이터 시스템의 마찰력은 측정하기 힘들기 때문에, Fig. 12에 나타난 최대정지 마찰력은 최적

Table 2 Estimated friction parameters of joint 1 and 2

	Kr	B	P ₀	A
Joint 1	6.67×10^7	17.3	1.4×10^{-7}	0.58
Joint 2	3.0×10^7	7.5	2.0×10^{-7}	0.7



(a) Joint 1



(b) Joint 2

Fig. 9 Comparison of joint angular displacements

화 문제를 통해 규명된 마찰인자를 이용해 추정하는 것이다. 일반적으로 윤활된 표면에 작용하는 마찰력은 마찰면 사이의 상대속도가 증가함에 따라 감소한다고 알려져 있다.⁽⁶⁾ 따라서, 실제 운동 중에 발생하는 마찰력은 그림에 나타난 최대정지 마찰력보다 작을 것이다. 조인트 유연성과 구동부의 동역학적 특성을 고려하였지만, 매니플레이터 시스템의 복잡성으로 인해 동역학 모델에 오차가 포함되어 있기 때문에, 최적화 문제를 통해 규명한 마찰 인자는 실제 마찰력의 영향 뿐 아니라, 모델링되지 않은 시스템의 영향이 포함될 수 있다. 그러나, 그림에서 볼 수 있듯이, 스틱슬립이 발생하는 운동초반 영역에서는 제어입력에 의한 토크의 영향에 비해 스틱슬립에 의한 마찰효과가 크게 나타난다. 운동초반에 많은 가중치를 준 목적함수를 이용해서 마찰력을 규명하는 것은 모델링되지 않은 시스템의 영향이 가장 적게 나타나고 따라서 이렇게 규명된 마찰인자는 타당하다고 할 수 있다.

3.4 규명된 마찰인자의 실험적 검증
 규명된 마찰인자가 타당하다는 것을 검증하기

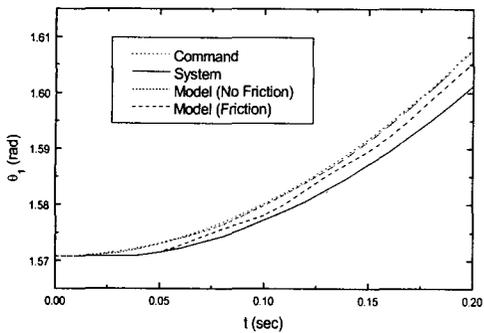
위해 아래와 같은 입력 명령에 대해 매니플레이터 시스템과 동역학 모델의 출력을 비교하였다.

$$\theta_1(t) = \frac{\pi}{8}(1 - \cos(\pi t)) + \frac{\pi}{2}, \theta_2(t) = \frac{\pi}{8}(1 - \cos(\pi t)) \text{ for } 0 \leq t \leq 2$$

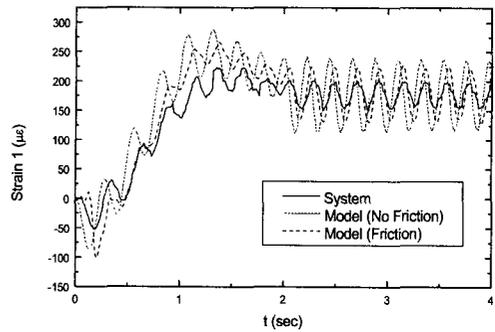
$$\theta_1(t) = \frac{\pi}{2}, \theta_2(t) = 0 \text{ for } 2 \leq t \leq 4$$

동역학 모델에 사용된 마찰인자는 Table 2 와 동일하고 온도에 의한 마찰력의 영향을 최소화 하기 위해 충분한 시간동안 시운전후 정상상태에서 측정을 하였다. Fig. 13 은 매니플레이터 시스템과 동역학 모델의 조인트 각변위를 비교한 것이며, Fig. 14 는 스틱슬립이 발생하는 저속 영역을 확대한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 규명된 마찰 인자를 사용한 동역학 모델은 실제 발생하는 스틱슬립 현상을 비교적 정확히 예측한다. Fig. 15 는 매니플레이터와 동역학 모델의 링크 중간 부분에서의 링크 변형률을 비교한 것이다. 마찰력을 고려한 동역학 모델의 변형률은 매니플레이터 시스템의 변형률과 위상차가 발생되지 않는다.

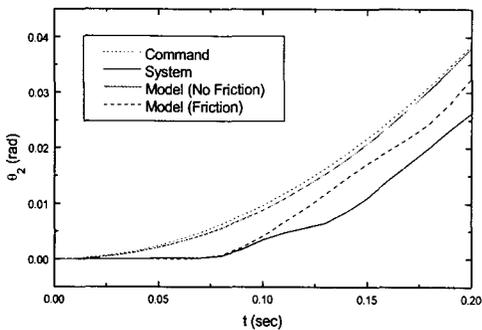
이상에서 매니플레이터 시스템의 출력과 동역학 모델의 출력을 비교함으로써 규명된 마찰인자가 타당하다는 것을 검증하였다. 따라서, 유전 알



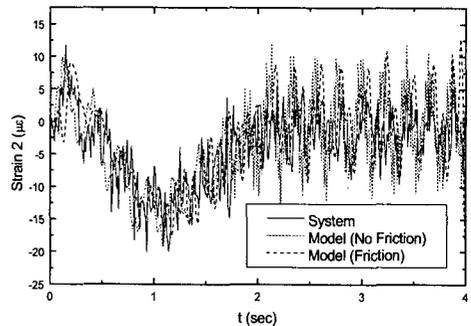
(a) Joint 1



(a) Link 1



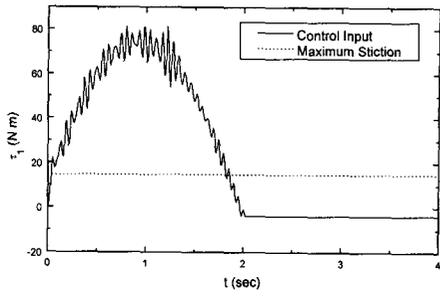
(b) Joint 2



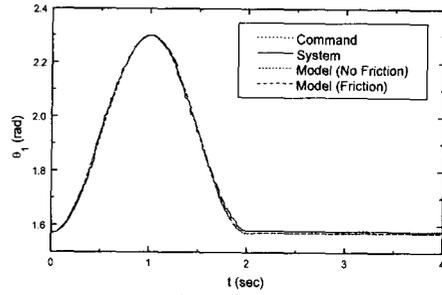
(b) Link 2

Fig. 10 Comparisons of joint angular displacements : stick-slip regime

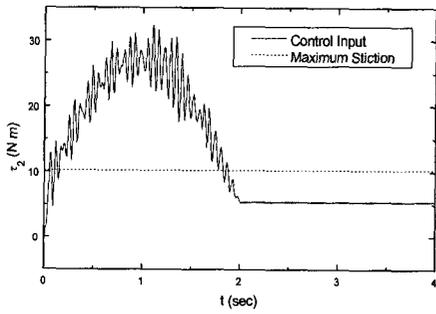
Fig. 11 Comparisons of link strains



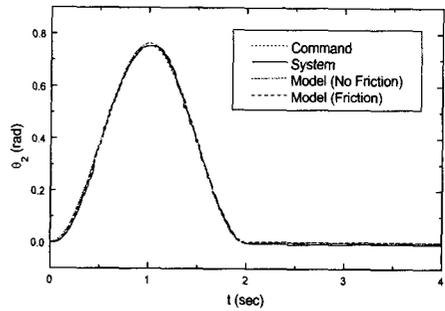
(a) Joint 1



(a) Joint 1



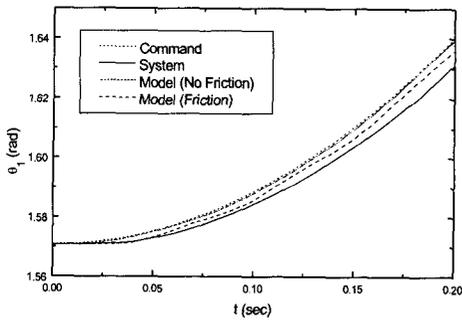
(b) Joint 2



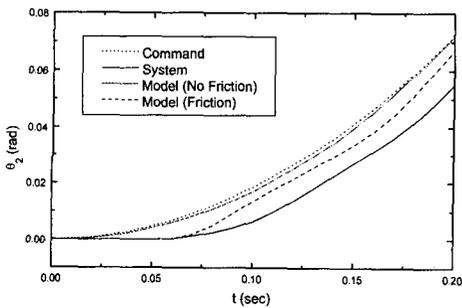
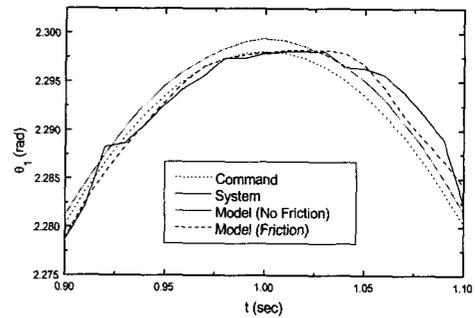
(b) Joint 2

Fig. 12 Comparison between motor torques and maximum stiction

Fig. 13 Comparisons of joint angular displacements



(a) Joint 1



(b) Joint 2

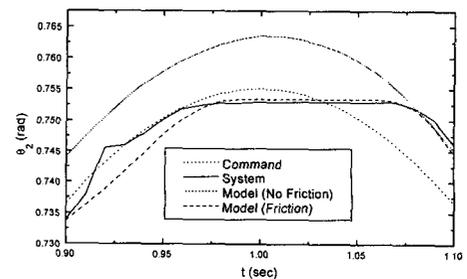
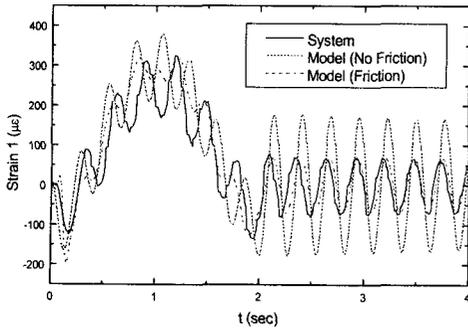
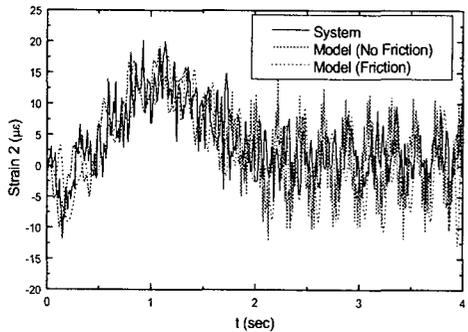


Fig. 14 Comparisons of joint angular displacements : stick-slip regimes



(a) Link 1



(b) Link 2

Fig. 15 Comparisons of link strains

고리들을 이용해서 규명한 마찰인자는 전체 최소이며 물리적으로 타당하다고 볼 수 있다.

4. 결 론

마찰력을 고려한 개선된 동역학 모델을 세우기 위해 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 매니플레이터 시스템의 운동에 가장 큰 영향을 미치는 마찰현상은 스틱슬립이고, 이는 Reset Integrator Model 을 이용해서 모형화 될 수 있다.

(2) 매니플레이터 시스템과 마찰력을 고려한 동역학 모델의 응답오차를 최소화하는 최적화 문제를 통해서 마찰인자를 규명할 수 있다. 스틱슬립 현상이 응답에 가장 큰 영향을 미치므로, 저속영역에서 큰 가중치를 준 목적함수를 사용해서 규명할 수 있었다. 또, 많은 국부최소가 존재하는 이와 같은 목적함수에는 전체 최소치로의 수렴 가능성이 높은 유전 알고리즘이 적합한 것으로 판단된다.

(3) 다른 입력에 동역학 모델과 매니플레이터 시스템의 응답을 비교한 결과, 마찰력이 비교적 정확히 규명되었다는 것을 검증할 수 있었다. 이는 유전 알고리즘을 이용하여 간접적으로 규명한 마찰인자는 물리적으로 타당하며 전체 최소치라는 것을 의미한다.

후 기

본 연구는 목적기초연구사업(1995-1998)의 일환으로 수행되었으며 본 연구에 대한 재정적 지원을 해주신 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 김원진, 1998, “주파수영역방법에 의한 비선형 모델변수의 실험적 규명,” 대한기계학회지논문집 A, Vol. 22, No. 2, pp. 458-466.
- (2) Spong, M. W., 1987, “Modeling and Control of Elastic Joint Robots,” *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 109, pp. 310-319.
- (3) 김경호, 1998, “최적화 기법을 이용한 매니플레이터 조인트 마찰력 규명 및 실험적 검증,” 한국과학기술원 기계공학과 석사학위 논문.
- (4) Cho, J. K., 1995, “Input Shaping to Reduce Vibration of a Time-Varying System,” Ph D Thesis, Department of Mechanical Engineering, KAIST.
- (5) Cheok, K. C., Hu, H. and Loh, N. K., 1988, “Modeling and Identification of a Class of Servomechanism Systems with Stick-Slip Friction,” *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 110, pp. 324-328.
- (6) Armstrong-Helouvry, B., Dupont, P. and Wit, C.C.D., 1994, “A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction,” *Automatica*, Vol. 30, No. 7, pp.1083-1138.
- (7) Haessig, D. A. and Friedland, Jr. B., 1991, “On the Modeling and Simulation of Friction,” *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 113, pp. 354-362.
- (8) Canudas de Wit, C., 1991, “Adaptive Friction Compensation in Robot Manipulators: Low Velocities,” *International Journal of Robotics Research*, Vol. 10, No. 3, pp. 189-199.
- (9) Canudas de Wit, C. and Olsson, H., 1995, “A New Model for Control of Systems with Friction,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 40, No. 3, pp 419-425.
- (10) David E. Goldberg, 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley.