



### 저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

가변 강성 길항관절을 위한  
적응 제어 알고리즘

An adaptive control algorithm for  
variable stiffness antagonistic joints

2014년 2월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

박 규 현

가변 강성 길항관절을 위한  
적응 제어 알고리즘

An adaptive control algorithm for variable  
stiffness antagonistic joints

지도교수 박 종 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2014년 2월

서울대학교 대학원  
기계항공공학부  
박 규 현

박규현의 공학석사 학위논문을 인준함

2014년 2월

위 원 장 : \_\_\_\_\_(인)

부 위 원 장 : \_\_\_\_\_(인)

위 원 : \_\_\_\_\_(인)

# ABSTRACT

## An adaptive control algorithm for variable stiffness antagonistic joints

by

Gyuhyun Park

School of Mechanical and Aerospace Engineering

Seoul National University

In this thesis, we consider the problem of estimating nonlinear stiffness of flexible transmissions in single link robots with antagonistic variable stiffness actuation. Joint stiffness estimation is obtained using an adaptive control algorithm. For the joint stiffness estimation, we assume that all rigid body dynamic parameters of robot except stiffness are known value. The motor position, velocity, link angle position, velocity and flexibility torque are assumed to be measurable for the state-feedback. An adaptive control algorithm with input-output linearization state feedback is used in our problem on the basis that this algorithm is optimal for our problem. Joint

stiffness value is assumed to be intrinsically a nonlinear polynomial function of the deformation. Simulation results from performed of single link arm robots are reported, showing a good performance in trajectory tracking of link angle position and in estimating a nonlinear polynomial function of the joint stiffness.

**Keywords:** Adaptive control algorithm, Variable stiffness actuation, antagonistic joint, Flexible dynamic model

**Student Number:** 2012-20665

# Contents

<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>List of Figures</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 Dynamic modeling</b>	<b>5</b>
<b>3 Adaptive variable stiffness control algorithm</b>	<b>9</b>
3.1 Review of linearized techniques . . . . .	11
3.2 Adaptive control of the SISO system . . . . .	12
<b>4 Simulation</b>	<b>15</b>
4.1 Simulation Setup . . . . .	15
4.2 Simulation Results . . . . .	16
<b>5 Conclusion</b>	<b>22</b>
<b>Bibliography</b>	<b>23</b>

*CONTENTS*

vi

국문초록

26

감사의 글

27

# List of Figures

2.1	Antagonistic VSA schematic . . . . .	5
2.2	Definition of variables in a single joint robot with VSA . . . . .	6
3.1	Block diagram of adaptive control scheme . . . . .	10
4.1	Trajectory tracking results . . . . .	18
4.2	Actual and estimated stiffness w.r.t time $t$ . . . . .	19
4.3	Actual and estimated stiffness w.r.t $\phi$ . . . . .	20
4.4	Stiffness estimation . . . . .	21

# 1

## Introduction

최근 인간과 로봇간의 interaction에 있어서 로봇 구동이 안전하고 부드러운 compliant elements 갖기 위하여 end-effector tools, joints, transmissions, actuators 등 많은 device 분야에서 연구가 시도 되고 있다. 특히 최근에 많이 연구되는 분야가 VSA(Variable Stiffness Actuation) [7], [9], [13], [14] 를 기반으로 하는 로봇 디자인이다. 로봇 joint stiffness란 transmission의 link 축에서 일어나는 displacement와 reaction에 의해 발생하는 flexibility torque 사이의 관계라고 정의할 수 있다. 일반적인 산업용 로봇의 joint에서는 linear elastic 성질을 갖는 spring을 가정하여 constant한 stiffness값을 갖는다고 modeling한다. 하지만 실제로는 로봇이 동작하는 동안 joint stiffness의 variation이 있기 때문에 flexible transmission이 nonlinear한 특성을 지닌다고 가정할 필요가 있다. VSA를 기반으로 하는 로봇은 일반적으로 로봇 동작에 따라 stiffness값이 변하는 성질을 갖고 있다. 즉 stiffness 값이 deformation에 따라 nonlinear한 특성을 지니게 된다. 우리의 연구에서 이용하려는 VSA device는 VSA-II [12]와 같은 antagonistic한 성질을 갖는 VSA device이다. Antagonistic한 VSA는 linear한 elastic 성질을 갖는 두 개의 actuator가 parallel하게 링크에 연결되어 작동하며, agonistic-antagonistic한 성질을 갖는다[8]. Parallel하게 연결된 두 개

의 actuator에 의해 joint의 stiffness 값이 motion에 따라 바뀌며, link의 motion이 제어된다. link의 이동 속도가 빠를 때는 small stiffness값을 갖고, link의 이동 속도가 느릴 때는 large stiffness값을 갖도록 하여 로봇이 좀 더 부드럽고 안전한 형태의 motion을 생성한다.

문제는 이 stiffness 값을 직접 측정할 sensor가 없다는 점이다. 일반적으로 position정보와 joint torque sensor 정보를 이용해서 이 값을 계산하는데, 이는 VSA를 기반으로 하는 로봇과 같이 stiffness값이 deformation에 대한 nonlinear function을 갖고 기구의 dynamic 성질 또한 nonlinear하고 복잡한 경우에는 적용이 힘들다. 따라서 위와 같은 VSA를 기반으로 한 로봇에서의 stiffness estimation 방법이 필요하다. 몇몇 연구자들이 이와 관련된 연구를 진행하고 있다. Griolo and Bicchi [6]는 센서를 이용해 flexibility torque 정보를 측정하는 것을 기반으로 하는 stiffness estimator를 제안하였다. 이 연구는 측정된 flexibility torque의 time derivative를 얻는 과정에서 noise에 의한 문제가 생길 수 있다. Flacco and De Luca [4]는 dynamic residual approach를 통해 flexibility torque를 estimation하고 그 flexibility torque 정보를 RLS(Recursive least squares)를 이용해 polynomial model에 fitting시킴으로써 stiffness 값을 estimation한다. 하지만 제시한 방법을 오직 simulation으로만 검증했을 뿐, 실험을 통한 검증이 이뤄지지 않아 결과에 대한 신뢰도가 높지 않다는 문제가 있다. 또 VSA-II라는 특정한 VSA에 국한되어 연구가 진행되었으며, deformation이 큰 경우에는 estimation 오차가 커지는 문제가 있다.

본 연구에서는 adaptive control algorithm을 이용하여 VSA를 기반으로 하는 로봇의 joint stiffness estimation를 수행한다. 본 연구는 agonistic-antagonistic 한 actuator를 지닌 중력 방향으로 구동되는 1 자유도 링크 로봇에 대하여 이뤄진다. Stiffness estimation을 위해서는 link, motor inertia 같은 dynamic parameter는 이미 알고 있다고 가정하며, motor position and velocity, link position and velocity, flexibility torque 값은 측정 가능하다고 가정한다. Adaptive control algorithm을 통한 parameter estimation의 경우 parameter가 일정한 경우에는 비교적 잘 찾는 반면 시간에 따라

parameter 값이 변하는 경우에는 완벽하게 update 시키는 것이 쉽지 않다. 본 연구에서는 단지 adaptive control algorithm을 통해서 variable stiffness값을 update시킨 결과에는 한계가 있다고 여겼기에, 먼저 로봇 구동에 따라 변하는 stiffness값을 adaptive control algorithm으로 update 시켜 data를 얻는다. 이를 data를 바탕으로 stiffness가 deformation에 대한 polynomial이라고 가정하고, esimtaion된 data를 polynomial curve fitting하여 deformation에 대한 stiffness nonlinear function을 찾는 방법을 제안한다.

본 연구에서 이용하려는 adaptive control algorithm은 sastry의 [11]를 기반으로 한다. 이 방법은 linearizable system에 대하여 input-output linearization을 통한 state-feedback형태의 controller를 설계한다. Varying parameter에 대한 adaptive control strategies는 이 외에도 다양하다. 예를 들어 radial basis function neural networks를 이용해 on-line approximator를 제안한 Diao[3]의 방법과 빠른 adaptation과 input, output signal 모두 동시에 tracking하는 Cao의  $\mathcal{L}_1$  adaptive controller [1]와 adaptive backstepping control algorithm을 이용한 Shuzhi [5]의 방법 등이 있다. 하지만 sastry의 algorithm을 택한 이유는 Diao의 방법은 parameter의 rate of change가 bounded된 상황을 가정하여 parameter가 굉장히 천천히 부드럽게 변하는 상황에만 한정되어 본 문제에 적용하기에는 한계가 있었고, Cao의 방법은 우리의 연구에서는 input signal의 tracking이 필요없기에 적합하지 않았다. Shuzhi의 연구는 time-varying parameter에 대한 bounds를 알아야 하고, control coefficient가 unknown time-varying이라고 가정하는데 이는 본 연구의 문제에 맞지 않다. 반면 sastry의 연구는 본 연구에서 이용하는 robot system의 nonlinear한 성질에 최적화되어 문제 정의가 되어있고, nonlinear term을 cancellation시킴으로써 시스템을 robust하게 하는 장점이 있어 본 연구의 adaptive control algorithm으로 이용하였다.

이 paper는 다음과 같이 진행된다. 2절에서는 본 연구에서 이용하는 기구의 dynamic modeling이 제시된다. 3절에서는 trajectory tracking과 parameter estimation을 위한 adaptive control algorithm에 대한 설명이 수록되어 있다. 4절에서는 VSA를 기

반으로 하는 1자유도 링크 로봇에 대한 numerical simulation 과정과 결과가 수록되어 있다. 마지막으로 5절에서는 결론이 수록되어 있다.

# 2

## Dynamic modeling

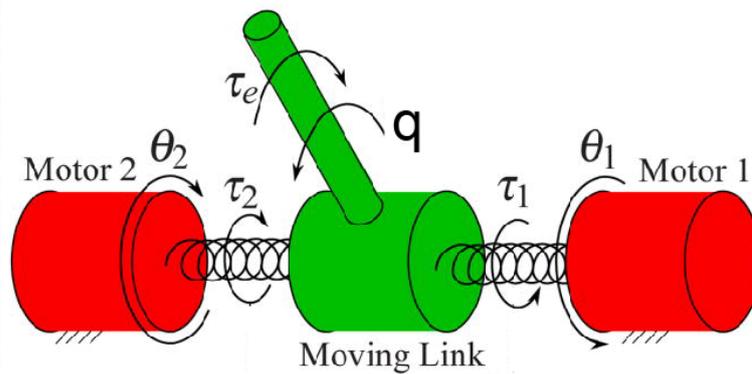


Figure 2.1: Antagonistic VSA schematic

VSA(variable Stiffness Actuation)를 기반으로 하는 1 자유도 링크 로봇을 고려하자. 로봇에 이용되는 VSA는 VSA-II [12]와 같은 antagonistic 형태의 VSA 라고 가정하며 그에 대한 dynamic modeling은 [4]에서 사용한 model을 이용한다. VSA-II는 Figure 2.1과 같은 형태를 지니며 VSA 종류 중에 PVSA(Parallel Variable Stiffness

Actuation)로 분류된다. 이는 두 개의 actuator가 antagonistically하게 연결되어 position과 stiffness를 동시에 컨트롤 할 수 있도록 한다. Antagonistic한 VSA의 구동 방식을 보면 Figure 2.1와 같이 agonistic-antagonistic하게 구동되는 actuator로서 링크 좌우에 linear한 stiffness를 가진 motor 두 개가 4-bar linkage mechanism의 형태로 구동되어 nonlinear 특성을 지닌 joint stiffness 값을 발생시킨다. 자세한 구동 방식은 [12]를 참조한다.

이제 Figure 2.2와 같은 형태를 갖는 Antagonistic VSA 기반 1 자유도 링크 로봇

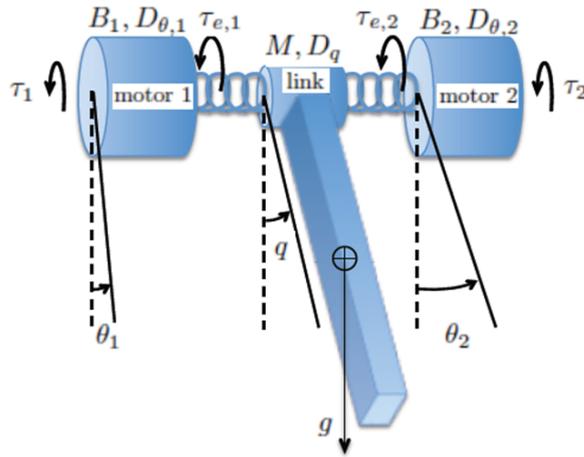


Figure 2.2: Definition of variables in a single joint robot with VSA

의 dynamic modeling equation을 고려해보자. 먼저 transmission의 deformation  $\phi$ 는  $\phi = q - \theta$ 라고 정의하며, link angle  $q$ 와 motor angle  $\theta$ 의 차이이다. 또 deformation  $\phi$ 에 의해 발생하는 potential function을  $U_e(\phi) \geq 0$ 이라고 하자. Transmission에 걸리는 Flexibility torque는  $\tau_e(\phi) = \partial U_e(\phi) / \partial \phi$ 라고 하자. 그럼 transmission의 stiffness  $K(\phi)$ 은 link displacement에 대한 flexibility torque의 variation으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$K(\phi) = \frac{\partial \tau_e(\phi)}{\partial q} = \frac{\partial \tau_e(\phi)}{\partial \phi} \quad (2.0.1)$$

Nonlinear stiffness actuator를 기반으로 하는 중력 방향으로 구동되는 1 자유도 링크 로봇의 dynamic equation은 다음과 같다.

$$M\ddot{q} + mgL \sin q + \tau_e(\phi) = 0 \quad (2.0.2)$$

$$B\ddot{\theta} - \tau_e(\phi) = \tau \quad (2.0.3)$$

여기서  $M > 0$  이고  $B > 0$ 이며, 각각 link와 motor의 inertia이다. 본 연구에서는 viscous friction coefficient는 크게 영향을 주지 않는다고 판단하여 무시한다.  $\tau$ 는 모터에 의해 구동되는 torque값이며  $mgL \sin q$  term은 link에 걸리는 gravity torque 값이다. 본 연구에서 이용하려는 VSA는 antagonistic한 VSA로써 두 개의 motor가 link에 parallel하게 연결되어 nonlinear한 flexible transmission을 발생시킨다. 기구의 형태와 각 parameter의 notation이 Figure 2.2와 같을 때, dynamic model은 다음과 같아진다.

$$M\ddot{q} + mgL \sin q + \tau_{e,t}(\phi) = 0 \quad (2.0.4)$$

$$B_i\ddot{\theta}_i - \tau_{e,i}(\phi_i) = \tau_i \quad i = 1, 2 \quad (2.0.5)$$

그에 따라 두 개의 transmission에 대한 stiffness의 정의는 다음과 같아진다.

$$K_i(\phi_i) = \frac{\partial \tau_{e,i}(\phi_i)}{\partial q} = \frac{\partial \tau_{e,i}(\phi_i)}{\partial \phi_i} > 0, \quad i = 1, 2 \quad (2.0.6)$$

여기서  $\tau_{e,t}(\phi) = \tau_{e,1}(\phi_1) + \tau_{e,2}(\phi_2)$  라고 정의한다. 이제 total device stiffness는 다음과 같다.

$$K_t(\phi) = \frac{\partial \tau_{e,t}(\phi)}{\partial \phi} = K_1(\phi_1) + K_2(\phi_2) > 0 \quad (2.0.7)$$

본 연구에서는 이 total device stiffness를 adaptive control algorithm을 이용해 estimation하는 것을 목적으로 한다.

다음 절에서 설명될 adaptive control algorithm의 적용을 위해서는 위의 dynamic equations를 standard state-space form으로 변형할 필요가 있다. state는  $x \in \mathbb{R}^5$  이며,  $x = [q \quad \dot{q} \quad \theta \quad \dot{\theta} \quad \tau_e]$ 이다. Scalar input  $u$ 는  $u = \tau$ 로 정의하며, scalar output  $y$ 는  $y = q$ 로 정의 한다. 이제 dynamic equations는 다음과 같은 state equation으로 표현된다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.0.8)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{mgL}{M} \sin x_1 - \frac{x_5}{M} \quad (2.0.9)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (2.0.10)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{x_5}{B} + \frac{u}{B} \quad (2.0.11)$$

$$\dot{x}_5 = K_t(\phi)(x_2 - x_4) \quad (2.0.12)$$

위의 state equations에서 estimation하려는 값은 Eq. (2.0.12)의  $K_t(\phi)$ 로서 이를 제외한 나머지 값은 이미 알고 있는 값이라고 가정한다.

# 3

## Adaptive variable stiffness control algorithm

본 연구에서는 VSA를 기반으로 한 1 자유도 링크 로봇의 total device stiffness를 adaptive control algorithm을 이용하여 estimation 하려고 한다. Adaptive control algorithm을 적용하기에 앞서 먼저 control problem에 대하여 정의가 필요하다. Link angle에 대한 given desired trajectory  $q_d(t)$ 가 있다고 가정하고, 이 desired trajectory  $q_d(t)$ 를 가능한 한 정확하게 tracking할 수 있는 control law  $u$ 를 찾는다. 동시에 stiffness value  $\hat{K}_t(\phi)$ 를 실제 값에 수렴할 수 있도록 값을 update시키는 것을 목적으로 한다.

Estimation 방법론으로 이용하려는 Adaptive control이란 제어 시스템의 수학적 모델에 모르는 값이나 불확실한 값이 존재하는 경우에 이 parameter값을 적절하게 update하면서 원하는 performance를 유지할 수 있도록 하는 제어 방법이다. Figure 3.1은 adaptive control의 block diagram으로 adaptive control algorithm의 흐름을 보여준다. Adaptive control의 주된 목적은 control performance에 있지만 이를 이용해 시스템 모델에서 모르는 parameter값을 추정하는 방법으로도 이용 가능하

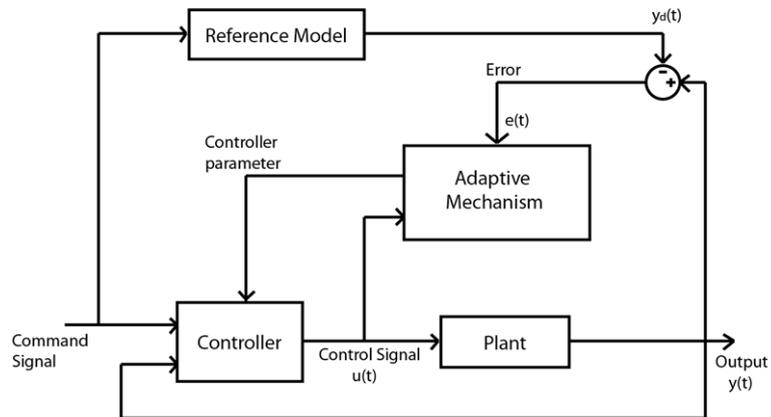


Figure 3.1: Block diagram of adaptive control scheme

다. 본 연구에서는 joint stiffness 값을 모르는 parameter라고 가정하고 이를 추정하는 문제로 적용 가능하다. 본 연구에서 다루는 시스템 모델이 nonlinear system이므로 본 연구에서 이용한 nonlinear system에 대한 adaptive control 방법론에 대해 간단히 살펴보겠다. 이 방법론은 [10], [11]에도 자세히 설명되어 있다.

### 3.1 Review of linearized techniques

Nonlinear system은 nonlinear state feedback control laws를 이용해 input-output linearization 을 수행할 수 있다. 다음과 같은 single-input, single-output system을 고려해보자.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (3.1.1)$$

$$y = h(x) \quad (3.1.2)$$

여기서  $x \in \mathbb{R}^n$  이고,  $f, g, h$ 는 smooth function이다.

이제 relative degree  $\gamma$  에 대한 정의가 필요한데,  $\gamma$  는  $L_g L_f^i h = 0$  for  $i = 0, \dots, \gamma - 2$  이고,  $L_g L_f^{\gamma-1} h \neq 0, \forall x \in \mathbb{R}^n$ 을 만족하는 가장 작은 값이다. 여기서  $L_f h$  는  $f$ 에 대한 Lie derivative.으로서 다음과 같이 정의한다.

$$L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f(x) \quad (3.1.3)$$

여기서  $L_f h(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  이다. 이제 control law는  $\alpha(x) + \beta(x)v$  꼴로 쓸 수 있으며 다음과 같아진다.

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{\gamma-1} h} (-L_f^{\gamma} h + v) \quad (3.1.4)$$

이는 다음과 같은 linear system을 유도한다.

$$y^{(\gamma)} = v \quad (3.1.5)$$

### 3.2 Adaptive control of the SISO system

Adaptive control algorithm에 대한 설명에 앞서 adaptive control이 수립하기 위해서는 어떤 가정들이 만족해야 하는지 알아야 할 필요가 있다. 첫째로, adaptive control law가 all state feedback이 가능해야 한다. 즉 모든 state에 대한 measure가 가능하다는 가정이 필요하다. VSA를 기반으로 한 1 자유도 링크 로봇의 수준에서는 모든 state가 on-line으로 측정 가능하다는 가정에는 무리가 없다. 두 번째로는 우리가 update시키고자 하는 parameter에 대해 state equation이 linearly parameterized 가능해야 한다는 가정이 필요하다. 이는 아래의 Eq. (3.2.6),(3.2.7)식처럼 linear하게 표현 가능해야 하기에 필요한 가정이다. 본 연구의 state equation인 Eq. (2.0.8)-(2.0.12)을 보면 unknown parameter  $K_i(\phi)$ 에 대해 linearly parameterized 된 것을 확인할 수 있다.

이제 adaptive control algorithm을 적용하기 위해 Eq. (3.1.1),(3.1.2)의 SISO system 식을 고려하자.  $f(x)$ 와  $g(x)$ 에 값을 모르는 parameter가 존재 하므로 다음과 같이 식을 쓸 수 있다.

$$f(x) = f_s(x) + \sum_{i=1}^{n_1} \theta_i^1 f_i(x) \quad (3.2.6)$$

$$g(x) = g_s(x) + \sum_{j=1}^{n_2} \theta_j^2 g_j(x) \quad (3.2.7)$$

$\theta_i^1, i = 1, \dots, n_1; \theta_j^2, j = 1, \dots, n_2$  는 unknown parameters 이고,  $f_i(x), g_j(x)$  는 known functions이다. 시간이 t일 때,  $f, g$  에 대한 estimates 는 다음과 같이 정의한다.

$$\hat{f}(x) = f_s(x) + \sum_{i=1}^{n_1} \hat{\theta}_i^1(t) f_i(x) \quad (3.2.8)$$

$$\hat{g}(x) = g_s(x) + \sum_{j=1}^{n_2} \hat{\theta}_j^2(t) g_j(x) \quad (3.2.9)$$

이제  $L_f^\gamma h$  와  $L_g L_f^{\gamma-1} h$  에 대한 estimates를 다음과 같이 정의하자.

$$\widehat{L_f^\gamma h} = L_{\hat{f}}^\gamma h \quad (3.2.10)$$

$$L_g \widehat{L_f^{\gamma-1} h} = L_{\hat{g}} L_{\hat{f}}^{\gamma-1} h \quad (3.2.11)$$

3.1 절의 non-adaptive case에서와 같이 유사한 방법을 적용하면 adaptive control law는 다음과 같아진다.

$$u = \frac{1}{L_g \widehat{L_f^{\gamma-1} h}} (-\widehat{L_f^\gamma h} + \hat{v}) \quad (3.2.12)$$

Trajectory tracking을 목적으로 하기 때문에 control law에서  $\hat{v}$  는 다음을 이용한다.

$$\hat{v} = y_d^{(\gamma)} + \alpha_1 (y_d^{(\gamma-1)} - \widehat{L_f^{\gamma-1} h}) + \dots + \alpha_\gamma (y_d - y) \quad (3.2.13)$$

$y_d$ 는 output의 원하는 trajectory이다.

이제 control law  $u$  를 넣고 식을 전개하면 다음과 같은 error equation이 나타난다.

$$e^{(\gamma)} + \alpha_1 e^{(\gamma-1)} + \dots + \alpha_\gamma e = \Phi W \quad (3.2.14)$$

여기서  $\Phi = \Theta - \hat{\Theta}$  로 parameter error이고  $W$  는 parameter vector와 linear하게 곱해지는 regressor vector이다. Error항에 붙은 계수  $\alpha_i$  는 수렴을 위해 Hurwitz polynomial로 정한다.

이제 parameter update law는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\hat{\Theta}} = -\dot{\Phi} = \frac{-\gamma e W}{1 + W^T W} \quad (3.2.15)$$

$\gamma$ 는 adaptation gain으로 이 값이 수렴 속도와 수렴 정도에 중요한 영향을 끼친다. Eq. (3.2.15)는 normalized gradient-type algorithm으로서 이 외에도 다른 parameter update law들도 존재한다. 가장 기본적인 형태로 unnormalized update law는 다음과 같다.

$$\dot{\hat{\Theta}} = -\gamma e W \quad (3.2.16)$$

이 unnormalized update law는 신호 값이 작을 때는 nomalized update law에 비하여 안정적인 update 성능을 보여주지 못한다. VSA를 기반으로 한 로봇의 parameter estimation 문제에는 Eq.(3.2.15)가 더 좋은 수렴성을 보여주었다. Adaptive control의 수렴성에 대한 증명은 [10],[11] 등에 자세히 설명되어 있으므로 본 논문에서는 생략한다.

# 4

## Simulation

VSA(Variable Stiffness Actuation)를 기반으로 하는 1 자유도 링크 로봇에 대해 adaptive control algorithm을 이용해 stiffness estimation하는 시뮬레이션을 시행하였다. VSA를 지닌 1 자유도 링크 로봇에 대한 dynamic modeling과 state equations는 2 장을 참고하면 된다. Simulation은 Mathworks사의 Matlab을 프로그램을 통해 시행하였고 ode45 function을 기반으로 미분 방정식을 풀이하였다.

### 4.1 Simulation Setup

시뮬레이션 환경은 다음과 같이 설정하였다. 일단 stiffness값을 제외한 나머지 dynamic parameter들은 이미 알고 있다고 가정한 값으로 다음 논문 [4], [12] 에서 이용한 값과 동일한 값들을 이용하였다.

로봇의 link angle 값이 따라가고자 하는 desired trajectory 식은 다음과 같다.

$$y_d(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{1 + e^{10-4t}} \quad (4.1.1)$$

실제 total device stiffness  $K_t(\phi)$ 값은  $\phi$ 에 대해 nonlinear한 polynomial 식의 형태를 갖는다고 가정하였으며, 실제 stiffness의 참값  $K_t(\phi)$ 의 식은  $K_t(\phi) = 2200\phi^4 + 30$ 라고 가정하였다. 각 state와 stiffness값의 Initial condition은 state는  $x(0) = [0 \ 0 \ 0.1 \ 0 \ 0]$ , stiffness 값은  $K_t(0) = 30$ 라고 가정하였다. Adaptation gain  $\gamma$ 의 조정에 따라 결과가 크게 달라지는데 trial and error과정을 거쳐 gain 값은  $\gamma = 15000$ 을 이용되었다.

Total device stiffness의 estimation 방법은 먼저 adaptive control algorithm을 이용해 시간에 따라 변하는  $K_t(t)$ 값을 update시키며 추정하여  $K_t(t)$ 의 data를 얻고,  $K_t$ 를  $\phi$ 에 대한 식으로 polynomial curve fitting 하여  $K_t(\phi)$ 식을 추정하였다. Polynomial curve fitting은 matlab에서 지원되는 함수를 이용하였고, 이는 least square method를 기반으로 한 함수이다.

## 4.2 Simulation Results

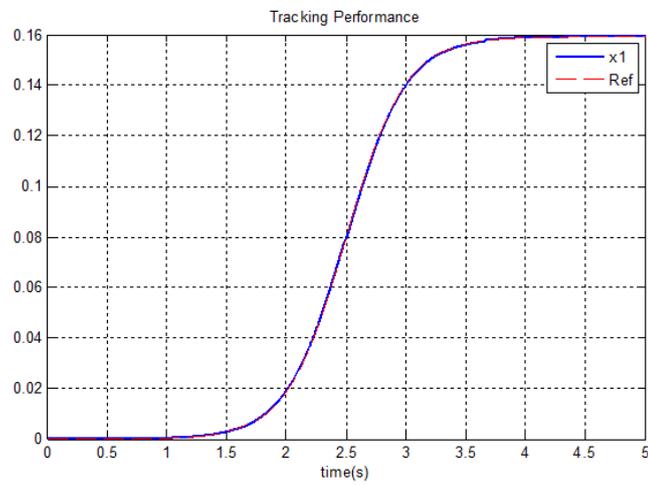
Figure 4.1 (a)는 1 자유도 링크 로봇의 링크 각도 값이 원하는 reference trajectory  $y_d(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{1+e^{10-4t}}$ 를 따라 제어되는 결과로 trajectory tracking performance를 보여준다. 그래프 상으로는 거의 완벽히 수렴하여 reference trajectory를 따라가는 모습이다. Figure 4.1 (b)는 trajectory tracking error 그래프로서  $1e-5$  단위에서 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 사실상 거의 error값이 없다고 봐도 무방하다. 다만 실제 하드웨어에 적용함에 있어서는 measurement noise와 같은 disturbance에 의해 이와 같은 완벽한 tracking 결과가 나오지는 않을 것으로 예상할 수도 있다. 하지만 분명 simulation상에서 tracking performance는 굉장히 뛰어나다는 것을 확인할 수 있다.

Figure 4.2는 adaptive control algorithm의 parameter update rule을 이용해 시간

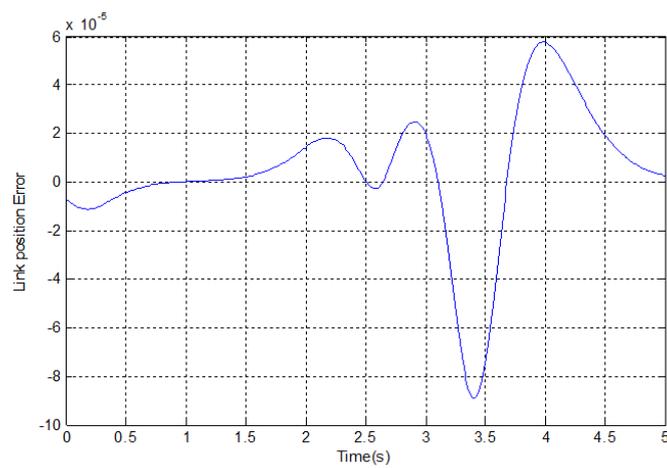
에 따라 변하는  $K_t(t)$  값을 추정한 그래프이다. 약 3초 이전까지는 비교적 parameter가 변하는 추세를 잘 따라가는 모습을 보이나 3초 이후에는 다소 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. time-Varying parameter가 천천히 부드럽게 변하지 않을 때 다소 에러가 생기는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이 결과는 polynomial curve fitting을 위한 data로 이용되는 결과이기에 완벽한 수렴이 필요한 결과는 아니다. Adaptation gain 등의 값을 적절히 조절함에 따라 수렴 정도를 개선시킬 수 있지만, trial and error 과정을 거쳐야 한다는 단점이 있다.

Figure 4.3은 Figure 4.2에서 얻은  $K_t(t)$  data와 각 시간에 해당하는  $\phi$  값의 data로부터 polynomial curve fitting을 시행하여  $K_t(\phi)$ 의 추정 식을 구한 그래프이다. 결과를 보면 deformation 값이 약 -0.3에서 0.3 사이일 때는 거의 정확하게 추정이 되고 있음을 확인할 수 있고, deformation의 크기가 이보다 더 큰 경우에는 약간의 오차가 생기는 것을 확인할 수 있다. 실제 기구가 구동될 때 시간에 따른 deformation  $\phi$  값을 보면 -0.3에서 0.3를 넘지 않기 때문에 실제 데이터에서 유효하게 적용할 수 있는 data라고 할 수 있다. 실제 stiffness function의 참 값은  $K_t(\phi) = 2200\phi^4 + 30$ 인데 본 연구의 방법으로 추정된 결과식은  $\hat{K}_t(\phi) = 1810\phi^4 + 28.13$ 이었다. 비교적 비슷한 nonlinear function으로 추정하는 것을 확인할 수 있었다.

이를 유사한 선행 연구의 결과와 비교해 본 결과는 Figure 4.4 (a)와 Figure 4.4 (b)를 비교하여 알 수 있다. Figure 4.4 (a)는 Flacco의 연구 [4]에서 나온 결과로 시뮬레이션 세팅은 같고, 방법론은 dynamic residual approach로 flexibility torque를 먼저 추정하고 이 data로부터 recursive least square 방법을 이용하여 stiffness 값을 추정한다. 이 방법에서는 deformation이 클 때 본 연구에 비해 오차가 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 그에 반해 본 연구의 결과 Figure 4.4 (b)는 선행 연구에 비해서 deformation이 큰 경우에도 비교적 더 가까이 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Trajectory tracking performance



(b) link trajectory tracking error

Figure 4.1: Trajectory tracking results

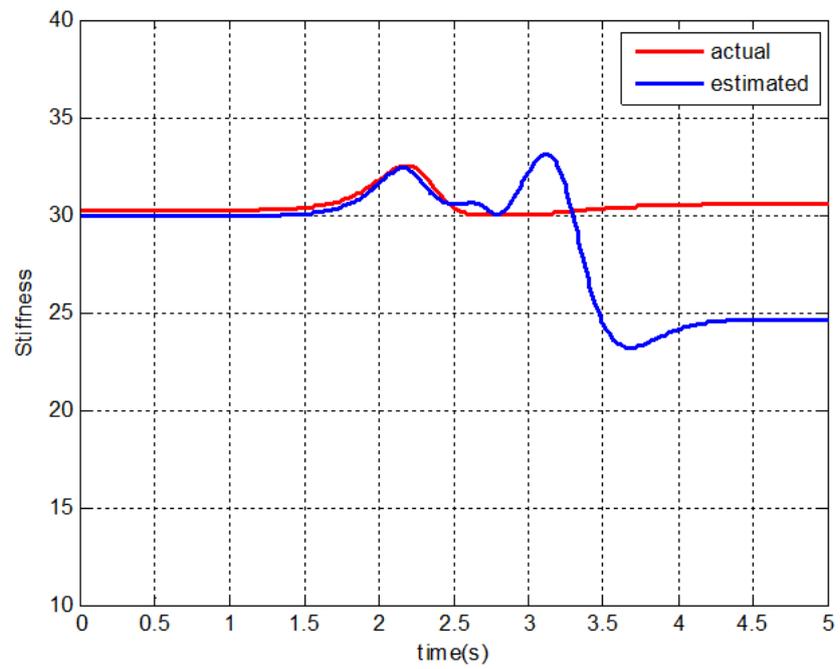


Figure 4.2: Actual and estimated stiffness w.r.t time t

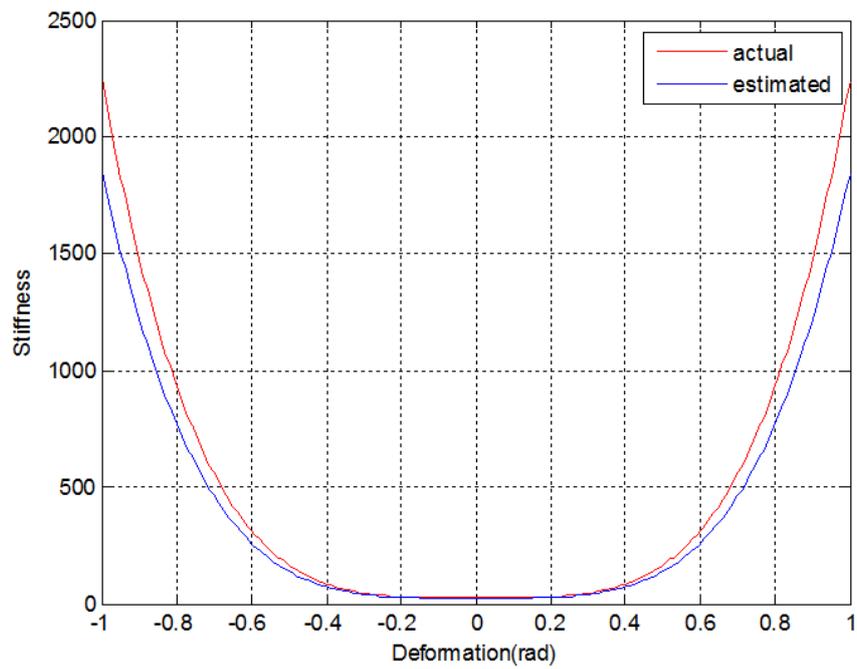


Figure 4.3: Actual and estimated stiffness w.r.t  $\phi$

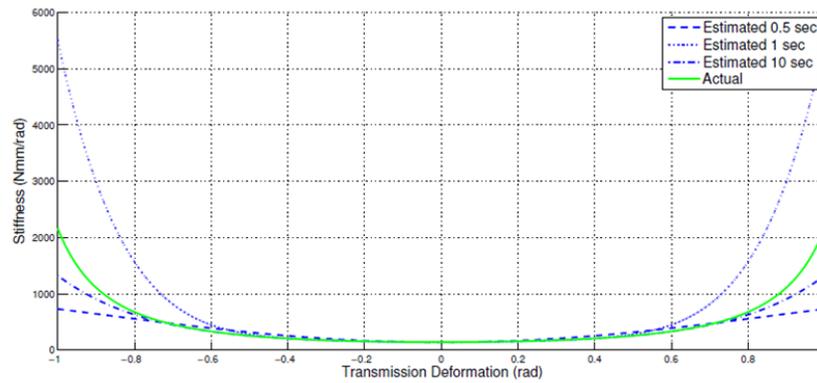
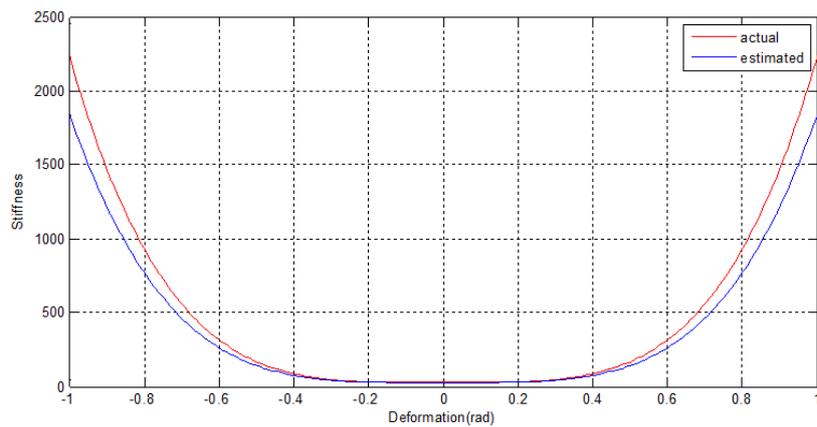
(a) Stiffness estimation of  $K_t(\phi)$  in Flacco's research(b) Stiffness estimation of  $K_t(\phi)$  in my research

Figure 4.4: Stiffness estimation

# 5

## Conclusion

본 연구에서는 agonistic-antagonistic한 VSA를 기반으로 한 1 자유도 링크 로봇의 joint stiffness estimation를 기존의 연구들과는 다르게 adaptive control algorithm을 이용한 방법으로 접근하였다. Joint stiffness가 deformation에 대한 nonlinear polynomial function을 갖는다고 가정하여 이를 찾는 연구를 진행하였다. 이용한 Adaptive control algorithm은 input-output linearization을 통한 full-state feedback 방법을 이용하였다. Adaptive control의 장점을 이용해 joint stiffness의 estimation 뿐만 아니라 동시에 link angle의 trajectory tracking이 가능하다. 시뮬레이션 결과, deformation에 대한 nonlinear stiffness function을 찾아 추정하였고 실제 구동에서 생기는 deformation범위에서는 비교적 정확한 estimation 결과를 얻을 수 있었다. 또한 trajectory tracking 또한 좋은 성능으로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 추 후에 시뮬레이션 결과를 검증하기 위한 하드웨어 실험을 계획하고 있다. 실험에서 이용하려는 VSA는 Choi의 [2] 에서 소개된 Leaf spring을 이용한 VSA device이며, KIST와의 협력 연구로 실험을 진행하여 본 연구의 타당성을 심도있게 검증할 예정이다.

# Bibliography

- [1] Chengyu Cao and Naira Hovakimyan. adaptive controller for systems with unknown time-varying parameters and disturbances in the presence of non-zero trajectory initialization error. *International Journal of Control*, 81(7):1147–1161, 2008.
- [2] Junho Choi, Seonghun Hong, Woosub Lee, Sungchul Kang, and Munsang Kim. A robot joint with variable stiffness using leaf springs. *Robotics, IEEE Transactions on*, 27(2):229–238, 2011.
- [3] Yixin Diao and Kevin M Passino\*. Stable adaptive control of feedback linearizable time-varying non-linear systems with application to fault-tolerant engine control. *International Journal of Control*, 77(17):1463–1480, 2004.
- [4] Fabrizio Flacco and Alessandro De Luca. Stiffness estimation and nonlinear control of robots with variable stiffness actuation. *18th IFAC World Congr., Milano, I*, 2011.
- [5] Shuzhi Sam Ge and Jing Wang. Robust adaptive tracking for time-varying uncertain nonlinear systems with unknown control coefficients. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 48(8):1463–1469, 2003.
- [6] Giorgio Grioli and Antonio Bicchi. A non-invasive real-time method for measuring variable stiffness. In *Robotics: Science and Systems*. Citeseer, 2010.

- [7] Byeong-Sang Kim and Jae-Bok Song. Hybrid dual actuator unit: A design of a variable stiffness actuator based on an adjustable moment arm mechanism. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 1655–1660. IEEE, 2010.
- [8] Ki-Hoon Nam, Byeong-Sang Kim, and Jae-Bok Song. Compliant actuation of parallel-type variable stiffness actuator based on antagonistic actuation. *Journal of mechanical science and technology*, 24(11):2315–2321, 2010.
- [9] Florian Petit, Maxime Chalon, Werner Friedl, Markus Grebenstein, AA Schaffer, and Gerd Hirzinger. Bidirectional antagonistic variable stiffness actuation: Analysis, design & implementation. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 4189–4196. IEEE, 2010.
- [10] Shankar Sastry and Marc Bodson. *Adaptive control: stability, convergence and robustness*. DoverPublications. com, 2011.
- [11] Sosale Shankara Sastry and Alberto Isidori. Adaptive control of linearizable systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 34(11):1123–1131, 1989.
- [12] Riccardo Schiavi, Giorgio Grioli, Soumen Sen, and Antonio Bicchi. Vsa-ii: A novel prototype of variable stiffness actuator for safe and performing robots interacting with humans. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 2171–2176. IEEE, 2008.
- [13] Giovanni Tonietti, Riccardo Schiavi, and Antonio Bicchi. Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pages 526–531. IEEE, 2005.

- [14] Sebastian Wolf and Gerd Hirzinger. A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 1741–1746. IEEE, 2008.

# 국문초록

본 논문에서는 antagonistic한 가변 강성 관절을 지닌 1 자유도 링크 로봇의 관절 강성 추정 문제를 적응 제어 알고리즘을 이용하여 접근한다. 관절 강성 추정을 위해서 강성 값을 제외한 dynamic parameter는 이미 알고 있다고 가정하며, motor 변위와 속도, link 변위와 속도, flexibility torque 값을 측정 가능하다고 가정한다. 본 문제에 가장 적합하다고 판단한 적응 제어 알고리즘인 input-output linearization state feedback 방법을 이용하였고, 관절 강성 값은 deformation에 대한 비선형 polynomial 식을 갖는다고 가정하여 이를 추정하였다. 시뮬레이션 결과, link angle 값의 경로 추적이 좋은 성능으로 제어 됨을 확인하였고, 본 연구의 목적인 관절 강성 값의 비선형 polynomial 식 추정도 비교적 좋은 성능으로 추정하는 것을 확인할 수 있었다.

**주요어:** 적응 제어, 관절 강성, Antagonistic 가변 강성, 유연 동역학 모델

**학번:** 2012-20665

## 감사의 글

대학원 생활동안 부족한 저에게 질타와 격려를 아끼지 않고 사랑으로 가르쳐 주신 박종우 교수님께 마음 깊이 감사드립니다. 논문이 나오기 까지 교수님의 관심과 질타가 없었다면 논문을 제대로 마무리하지 못했을것입니다. 논문을 쓰는 동안 교수님께서 말씀해주신 신뢰에 대한 조언들을 평생 잊지 않고, 앞으로 사회생활 하는 동안에도 가슴 깊이 간직하겠습니다.

또 로보틱스 연구실에 있는 동안 함께 공부하고 연구하면서 서로 격려하고 서로에게 든든한 버팀목이 되어주었던 선배님, 동료, 후배님들에게도 감사하다는 말 전합니다. 비록 졸업하고 연구실을 떠나지만 앞으로도 함께 인생, 연구 등에 대한 조언을 주고 받고 서로 도움을 줄 수 있는 사이로 남았으면 좋겠습니다.

또한 언제나 변함없는 사랑으로 아낌없는 지원과 든든한 성원을 보내주신 아버지, 어머니께 진심으로 감사의 말씀을 전합니다. 항상 뒤에서 묵묵히 저를 믿어주시고 응원해주시는 점 잊지 않고 꼭 보답하도록 하겠습니다. 그리고 현재 해병대에서 군 복무 중이어서 본인이 고생 많을텐데도 언제나 저를 걱정해주고 격려해주는 동생 대현이에게도 고맙다는 말 전합니다. 아직 제대까지 많은 시간이 남았지만 훈련 무사히 받고 멋진 남자로 제대하길 바랍니다.

마지막으로 다시 한번 지도 교수님이신 박종우 교수님께 감사드립니다.