이동구간 제어기법

Receding Horizon Control

권 욱 현, 안 춘 기
(Wook Hyun Kwon and Choon Ki Ahn)

Abstract : Current issues of receding horizon control scheme are reviewed. The basic idea of receding horizon control is presented first. For unconstrained and constrained systems, the results of closed-loop stability in receding horizon control are surveyed. We investigate the two categories of robustness of receding horizon control: stability robustness and performance robustness. The existing optimization algorithm to solve receding horizon control problem is briefly mentioned. It is shown that receding horizon control has been extended to nonlinear systems without losing good properties such as stability and robustness. Many industrial applications are reported along with extensive references related to receding horizon control.

Keywords : receding horizon control, stability, robustness, optimization, nonlinear systems, industrial applications

I. 서론

이동구간 제어 (Receding Horizon Control) 또는 모델예측 제어 (Model Predictive Control)는 과거 수십 년 동안 성능이 우수하고 실용적인 궤환 제어기 설계 법으로 인정 받고 있다. 이동구간 제어기법이 많은 주목을 받고 있는 이유는 폐루프 안정도가 보장되며, 입출력에 존재하는 구속조건을 만족시키면서 훌륭한 추종 성능이 보장되며 비선형 시스템에도 효과적으로 적용될 수 있기 때문이다. 제어기를 실제 시스템에 적용할 경우에, 안정성문제 또는 물리적인 제한에 의한 구속조건이 필연적으로 존재하게 된다. 실예로 제어입력은 최종 제어 요소인 밸브 등의 포화로 인해 정해진 범위 밖의 값을 가질 수 없다. 뿐만 아니라 안전, 환경규제 등으로 인해 시스템 출력들이 정해진 범위 안에 있어야만 하기도 한다. 이동구간 제어기법은 예측된 정보를 이용하여 유한구간 최적제어문제를 실시간으로 풀어 제어법칙을 구성하기 때문에 얻어진 제어법칙은 입출력에 존재하는 구속조건을 효과적으로 처리할 수 있으며 폐루프 안정성이 보장될 뿐만 아니라 훌륭한 추종성능이 보장된다. 따라서 이동구간 제어는 구속조건이 존재하며 비선형성을 갖고 있는 시스템에 대해 안정성을 보장하기 어려운 기존의 최적제어 기법의 한계점을 극복할 수 있는 제어기법이라고 볼 수 있다.

이러한 이동구간 제어기법 또는 모델예측 제어기법의 기본개념은 Kalman에 의해 상태공간 제어기법이 소개되고 이에 기반해 최적제어가 활발하게 연구되던 1960년대 초에 그 기반이 어느 정도 성립되어 있었다[1][2]. 하지만 시불변 선형시스템의 경우에 무한구간 2차 최적제어의 해가 항상 폐루프 제어형태였기 때문에 굳이 이동구간 제어기법을 사용할 이유가 없다고 생각해서 그 당시에는 많은 주목을 받지 못하였다. 다만 무한구간 2차 최적제어의 해를 쉽게 구할 수 없었던 시변 선형시스템의 안정화 문제에 주로 적용되었다. LQ문제를 다소 수정하여 선형 시변 시스템에 대해 고정 종단조건을 갖는 유한구간 2차 최적제어문제를 풀어 이동구간 제어법칙을 적용하려는 시도가 있었다[3][4]. 이러한 결과는 추종문제[5]와 출력 궤환 제어문제 문제[6][7][8]로 확장되었으나 이동구간제어기법을 개발하던 초기에는 시스템에 주어진 입출력 구속조건이 고려되지 않았다. 하지만 1970년대 말 화학공학자들에 의해 구속조건이 주어진 경우 이동구간 제어기법이 다른 제어기법에 비해 상당한 이점이 있음을 현장 적용을 통해 입증함으로써 그 중요성이 부각되기 시작되었다[9][10]. 다양한 형태의 입출력 구속조건들을 예측된 정보를 최적화하는 유한 구간 최적제어 문제에 포함하여 이들을 이동구간 제어기법으로 쉽게 다룰 수 있다. 보통 구속 조건이 존재하지 않는 경우 이를 효과적으로 제어 할 수 있는 다양한 형태의 선형제어 기법이 존재한다. 하지만 이들은 구속조건이 있으면 그 성능을 장담할 수 없게 된다. 따라서 이동구간 제어 기법이 구속조건을 효과적으로 다룰 수 있다는 점은 실제 시스템에 적용할 경우에 큰 장점이 된다고 볼 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서 이동구간 제어기법의 기본적인 내용을 소개하고, 3장에서 이동구간 제어기법의 폐루프 안정성을 보장하기 위한 여러 가지 결과들을 입출력에 구속조건이 있는 경우와 없는 경우로 나누어 설명한다. 4장에서는 이동구간 제어기법의 강인성에 대한 결과들을 안정도에 의한 강인성과 목적함수에 의한 강인성으로 나누어 소개하며, 5장에서는 이동구간 제어문제를 해결하기 위해 반드시 필요한 최적화 기법에 대해 언급한다. 6장에서는 이동구간 제어기법을 산업계 플랜트에 응용한 여러 사례를 알아보고 7장에서 결론을 맺는다.

II. 이동구간 제어기법

제어 대상이 되는 시스템이 다음과 같이 MIMO상태공간 모델로 표현된다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$$

여기서 벡터 $u(k)$는 시스템의 입력 변수를 나타내고 $x(k)$는 시스템의 상태변수를 뜻한다. 보통 주어진 시간 k에 시스템의 상태변수 $x(k)$가 주어지면 이를 예측모델의 초기치

권욱현,안춘기 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부
(whkwon@cisl.snu.ac.kr/hironaka@cisl.snu.ac.kr)
※ 본 연구는 두뇌한국21 프로젝트에 의하여 연구되었습니다.

로 간주 ($x(k \mid k)=x(k)$)하고 가상의 미래 제어입력 $u(k+j \mid k)$를 이용하여 미래의 상태변수 $x(k+j \mid k)$를 예측할 수 있다. 여기서 $x(k+j \mid k)$는 시간 $k+j$에서의 상태변수의 예측 값이며 이는 시간 k까지의 정보로부터 구해질 수 있다. 이동구간 제어기법은 유한구간 최적제어 문제에서 예측구간을 설정하고 그 구간 내에서 $u(k+j \mid k)$를 최적화하여 이중에서 $u(k \mid k)$를 시간 k에서 실제 적용하는 제어입력으로 사용하는 제어기법이다. 이렇게 유한구간 최적제어 문제를 반복적으로 풀어 제어 입력을 구하는 방법을 이동구간 제어기법이라고 한다. 설정된 예측구간에서 $u(k+j \mid k)$의 최적화에 가장 많이 사용되는 것은 유한구간 2차 최적제어 기법이며 이러한 경우에 매 측정시간마다 다음의 유한구간 최적제어 문제를 반복적으로 풀어 이동구간 제어 법칙을 구하게 된다.

$$\min \sum_{i=0}^{N-1} [x^T(k+i \mid k)Qx(k+i \mid k) + u^T(k+i \mid k)Ru(k+i \mid k)]$$

여기서

$$x(k+i+1 \mid k) = Ax(k+i \mid k) + Bu(k+i \mid k)$$
$$x(k \mid k) = x(k),$$
$$u^{\min} \le u(k+i \mid k) \le u^{\max}, i = 0,1,2,...$$
$$x^{\min} \le x(k+i \mid k) \le x^{\max}, i = 0,1,2,...$$

이며 Q와 R은 이동구간 목적함수에 포함되어 있는 가중 행렬을 나타내며 제어입력은 각각 최대값 $u^{\max}$와 최소값 $u^{\min}$으로 구속조건이 주어져 있으며 상태변수 역시 각각 최대값 $x^{\max}$과 최소값 $x^{\max}$으로 구속조건을 갖고 있다. 하지만 위에 제시된 유한구간 최적제어 문제를 풀어 얻은 제어 법칙은 폐루프 안정성이 보장되지 않아 추가로 안정성을 보장할 수 있는 방법이 필요하다.

Ⅲ. 안정성

이동구간 제어기법이 유한구간 최적제어문제를 반복해서 풀어내서 폐루프 제어기를 설계하는 방식이므로 폐루프 안정성을 보장하는 문제는 이동구간 제어기법에서 매우 중요하다. 따라서 본 장에서는 입출력에 구속 조건이 있는 경우와 구속 조건이 없는 경우로 나누어 연구동향을 살펴보도록 하겠다.

1. 입출력에 구속조건이 없는 경우

입출력에 구속조건이 없는 경우 이동구간 제어기법의 폐루프 안정성을 보장하는 첫 번째 방법은 Kwon and Pearson 에 의해 1970년대 말 성립되었다[3]. 기본적인 아이디어는 유한구간 선형 최적제어 문제에 최종 상태가 0이 되도록 한정조건을 삽입하는 것이다. 이렇게 최종 상태의 한정조건을 최적제어문제에 추가하여 폐루프 시스템의 점근적인 안정성이 보장됨이 증명되었다. SISO 이산 시산 시스템에 대해서 시스템의 전이행렬이 정칙일 경우, 최종 상태의 한정 조건을 갖는 안정한 이동구간 제어기가 설계되었으며[11] 본 결과는 MIMO 시스템일 경우에도 확장이 되었다[12][13]. 이러한 기법은 후에 비선형 시스템으로 확장되었다. 최종 상태의 한정조건을 추가해서 안정도를 보장하는 기법은 종단 가중행렬을 무한대로 고정하면 얻을 수 있는 것으로 입출력 구속조건이 있는 시스템에 이러한 기법을 적용할 경우 실행영역이 매우 작아지는 결과를 가져온다. 이동구간 제어기법의 폐루프 안정성을 보장하는 다른 접근법은 90년대 초에 Rawlings 와 Muske에 의해 제안되었다[14]. 이 기법은 최종 상태의 한정조건을 추가하는 대신 다음과 같은 무한 구간 목적함수를 사용하였다.

$$\min \sum_{i=0}^{\infty} x^T(k+i \mid k)Qx(k+i \mid k) + \sum_{i=0}^{N-1} u^T(k+i \mid k)Ru(k+i \mid k)$$

제어 가능하지만 개 구간 불안정한 시스템에 대해, 시스템 행렬을 불안정한 부분과 안정한 부분으로 나누어 유한구간 안에 불안정한 상태들을 0으로 보내도록 한정조건을 추가하는 것이 기본적인 아이디어이다. 실제로 이 방법은 기존의 최종 상태 한정 조건을 이용한 이동구간 제어기법을 포괄하는 진일보한 방법으로 Rawlings 와 Muske는 이 방법이 점근적인 안정성을 보장하는 방법임을 증명하였다. 또한 Zheng과 Morari는 이 방법이 안정한 시스템에 대해 출력 궤환 제어의 경우에도 점근적인 안정성을 보장하는 방법임을 증명하였다[15]. 여기서 불안정한 부분과 안정한 부분을 나누는 방법은 기하학적 접근법이므로 수치적으로 어렵다. 하지만 이 방법을 사용하면 최종 상태 한정 조건을 갖는 이동구간 제어기가 매우 쉽게 얻어지며, 안정화 가능한 시스템일 경우 일반화된 역행렬을 이용하여 이동구간 제어기를 쉽게 설계할 수 있다[3]. 이동구간 제어 기의 안정성을 보장하는 또 하나의 방법은 다음과 같이 목적함수에 유한 종단 가중행렬을 이용하는 것이다[5][16].

$$\min \sum_{i=0}^{N-1} [x^T(k+i \mid k)Qx(k+i \mid k) + u^T(k+i \mid k)Ru(k+i \mid k)] + x^T(k+N \mid k)Fx(k+N \mid k)$$

유한한 종단 가중행렬을 대수 리카티 부등식의 해로 고정하여 이동구간 제어기의 폐루프 안정성을 보장할 수 있다. 최근에 [5]에서 제안되었던 폐루프 안정성을 위한 유한 종단 가중행렬의 대수 리카티 부등식을 선형행렬 부등식 조건으로 일반화하여 새로운 이동구간 제어기법이 제안되었다[17]. 이 방법은 균등한 안정화 조건하에서 폐루프 안정성이 보장됨을 증명하였으며 목적함수의 구간의 크기도 기존의 결과보다 더욱 자유롭게 선택 가능하다는 장점이 있다. 또한 최근에 개발된 고속의 선형행렬 부등식의 알고리즘을 이용하여 종단 가중행렬을 비교적 쉽게 찾아낼 수 있다. 연속형 시스템에도 유한 종단 가중행렬을 이용하여 안정성을 증명할 수 있다는 것이 [18]에 증명되었다.

2. 입출력에 구속조건이 있는 경우

입출력에 구속조건이 없을 경우와는 달리, 구속조건이 존재하면 폐루프의 안정성을 보장하는 이동구간 제어기 설계가 상당히 어렵다. 하지만 고려된 목적함수에 따라 발표

된 결과를 두 가지 부류로 나누어 살펴보면 다음과 같다. 첫째로 앞에서 고려되었던 무한구간의 목적함수를 사용하는 것이다[14][15]. 만약 이렇게 구속조건이 있는 시스템에 대해 이동구간 제어기를 설계할 경우 가능해가 존재한다면 목적함수의 단조성을 이용하여 폐루프의 안정성이 보장될 수 있다. 다시 말해서, 만약 주어진 시간에 최적화문제의 해가 존재한다면 다음 시간에 최적화 해의 존재가 보장되며 이러한 과정이 폐루프의 안정성을 간단하게 해준다. 그리하여 가능해의 여부가 구속조건이 있는 시스템에 대한 이동구간 제어기 설계의 핵심이 되는 부분이다. 하지만 이러한 가능해에 대한 명확한 연구결과는 거의 존재하지 않는다. 또한 이 방법은 기하학적 접근법을 이용해서 불안정한 상태와 안정한 상태를 나누어 불안정한 부분만 N 구간 안에 0으로 보내는 한정조건을 이용하므로 실행영역을 매우 작게 만들 가능성이 있으며 입력구간의 크기 선택에도 제한이 있다는 단점이 있다.

두 번째 접근법은 유한한 종단 가중행렬을 이용하는 방법이다[17]. 이 방법은 최종 상태 한정조건을 완화하고 폐루프 안정도를 보장하기 위해서 불변의 타원영역을 도입한다. 선형 상태궤환 제어기를 이용해 구속조건을 갖는 시스템에 대해 불변이 되도록 최종 상태변수를 타원영역에 가두어 놓아 균일한 안정도 조건하에 폐루프 안정도가 보장되도록 이동 구간제어기를 설계하는 기법이다. 이 방법은 첫번째 제시된 방법보다 이동구간의 크기를 좀더 자유롭게 선택할 수 있으며 안정한 시스템일 경우에 첫번째 방법으로 설계된 이동구간 제어기보다 더욱 일반화된 이동 구간 제어 기법으로 볼 수 있다.

Ⅳ. 강인성

시스템에 불확실성과 외부 잡음이 존재할 경우 강인성 문제를 고려해야 실제 시스템에 이동구간 제어기법을 적용하였을 때 좋은 성능을 보장할 수 있다. 보통 강인성에 관한 결과는 2가지 형태로 나누어 생각해 볼 수 있는데 첫째는 안정도에 관한 강인성이며 두번째는 성능에 관한 강인성이다.

1. 안정도에 관한 강인성

입출력 구속조건이 없는 시스템에 대해 Garcia 와 Morari는 내부 모델 제어(Internal Model Control)기법을 이용하여 강인성 분석을 하였으며 강인한 안정도를 보장하기 위해 IMC 필터의 조정 방법을 개발하였다[19][20][21]. 입출력 구속조건이 존재하는 시스템에 대해 이동구간 제어기의 강인성을 보장하는 필요충분조건을 유도하기 위해 Zafiriou 와 Marchal은 이동구간 제어기의 축소(Contraction)성질을 이용하였으며[22][23] FIR 구조를 갖는 SISO 시스템에서 임펄스 응답계수의 상한과 하한이 주어졌을 때 Gencelli와 Nikolaou는 l_1 놈을 사용한 이동구간 제어기법의 강인성 분석방법을 제시하였다[24]. 또한 Polak과 Yang은 연속형 선형시스템에 대해 상태변수의 축소 제한조건을 이용하여 이동구간 제어기법의 강인성 분석을 하였다[25][26]. 연속형 시스템임과 동시에 출력궤환 시스템일 경우에 루프 전달회복(Loop Transfer Recovery)기법이 이동구간 제어기 설계에 응용되어 칼만필터 혹은 다른 종류의 필터를 이용해 LQ보다 더욱 강인한 성능을 보장할 수 있는 제어기법이 개발되었다[27]. 하지만 이동구간 제어기의 강인성에 관한 결과는 대부분 강인성분석[19][23][24][25][26]에 한정되어 있었으며 강인한 제어기를 설계하는 문제는 대부분 FIR 모델에만 수행되어 왔다[28][29][30]. 이러한 문제점을 극복하여 Kothare et al.는 선형 행렬 부등식[31]을 이용하여 일반적인 모델의 불확실성을 다룰 수 있으며 실시간 구현에도 뛰어난 성능을 보장하는 강인한 이동구간 제어기를 제안하였다[32]. 이 방법을 통해 입출력 구속조건을 선형행렬 부등식을 이용하여 매우 효과적으로 다룰 수 있게 되었다. 하지만 이 방법은 매시간 최적화 문제를 풀 때 선형 상태 궤환 제어기를 사용한다. 보통 불확실성 및 입출력 구속조건을 갖는 선형 시스템은 비선형시스템이므로 이를 선형제어기를 이용한 접근법을 사용한다면 상당히 제한적인 가능 초기조건 집합을 얻게 될 뿐만 아니라 비선형 제어기를 사용한 접근법보다 성능이 떨어지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 강인한 1 스텝 이동구간 제어기법이 개발되어 [32]에서 제시된 결과보다 더욱 넓은 가능 초기조건집합을 보장함과 동시에 더욱 뛰어난 성능을 가능하게 했다[33]. 이동구간 제어기의 폐루프 안정도를 보장하는 불확실성의 한계에 관한 결과들을 몇 가지 소개해보면 다음과 같다. 이동구간 제어기법의 비구조화된 매개변수의 불확실성의 한계를 얻는 방법은 [34]에 소개 되어있으며, 매개변수의 불확실성에 대한 강인성의 한계는 [35]의 결과에 나타나고 있다. 입출력에 구속조건을 갖는 시스템일 경우에는 강인성에 대한 특징을 분석하기 매우 어렵기 때문에 많은 결과들이 아직 도출되지 않았으며 이 분야에 더욱 많은 연구가 있어야 한다.

2. 성능지수에 관한 강인성

최소-최대 접근법은 H_∞ 제어기 설계법을 포함한 강인한 제어기 설계법에 매우 효과적인 방법으로 인식되고 있다. 보통 이동구간 제어기법에 게임이론[36][37]을 도입하여 강인한 제어기를 설계하고자 할 경우에 다음과 같은 성능지수를 사용하게 된다.

$$\begin{aligned}\min_u \max_w \sum_{i=0}^{N-1} & [z^T(k+i\mid k)z(k+i\mid k) \\ & -\gamma^2 w^T(k+i\mid k)w(k+i\mid k)] \\ & + x^T(k+N\mid k)Fx(k+N\mid k)\end{aligned}$$

여기서 z는 제어대상이 되는 변수이며, w는 외부잡음이다. 이러한 문제의 안정도는 상당히 제한적인 가정아래 종단 가중행렬을 무한대 값으로 고정시키는 방법으로 증명되었다[38]. 무한대 값을 갖는 종단 행렬을 사용하는 대신에 다른 종류의 종단 행렬을 이용하여 [38]에서 제시된 결과의 안정도 조건을 더욱 완화하였다[39]. 위에서 소개한 접근법들은 안정도를 증명하기 위해 리카티 방정식의 단조성을 이용하였다. 하지만 성능지수의 단조성을 이용한다면 종단 행렬 및 구간 크기를 선택할 경우에 상당한 장점을 갖게 되며 입출력 구속조건이 있을 경우에도 안정도 증명이 상당히 쉽다. 이러한 고찰하에 새로운 H_∞ 이동구간 제

어기가 제안되었다[39]. 만약 유한한 종단 가중행렬이 어떤 행렬부등식을 만족하도록 선택된다면 제안된 이동구간 제어기법은 폐루프 안정도를 보장할 뿐만 아니라 무한구간 H_∞ 놈의 한계를 동시에 보장하게 된다. 또한 이 방법은 입출력 구속조건을 갖는 시스템에도 적용 가능하다는 장점을 갖고 있다. [40]에서 제시된 유한한 종단 가중행렬의 조건보다 더욱 완화된 결과가 [41]에 소개되었다.

V. 최적화 기법

앞서 언급된 바와 같이 이동구간 제어기법은 유한구간 개루프 최적제어 문제를 반복적으로 풀어 폐루프 입력을 구해내는 기법이다. 이동구간 제어기법은 초기에 무한구간 최적제어 문제를 풀 수 없었기 때문에 시도된 방법 중 하나였다. 다시 말해서, 무한 차원 2차 프로그램인 무한구간 한정 선형 2차 최적제어의 해를 구하는 방법이 알려지지 않았기 때문에 시도된 방법중 하나 였다. 하지만 80년대 말 Sznaier 와 Damborg에 의해 무한구간 한정 선형 2차 최적제어 문제의 해를 구할 수 있는 방법이 도입되었다[42][43]. 실제로 무한구간 선형 2차 최적제어 문제의 목적함수가 유한하려면 예측된 시스템의 상태가 0으로 접근해야 한다는 것에 아디이어를 얻어 일정한 유한구간 이후에는 최종상태 한정조건이 자동적으로 성립한다는 것을 보였다. 이들은 일련의 2차 프로그램을 이용하여 유한구간을 찾는 방법을 제한하였다. 이 방법은 Scokaert와 Rawlings에 의해 더욱 발전되기도 하였다[44][45]. 하지만 이 방법은 짧은 측정 구간사이에 일련의 2차 프로그램을 풀어야하기 때문에 실시간 구현에는 문제점을 내포하고 있었다. 이를 극복하여 유한구간을 하나의 선형프로그램만으로 찾아내는 방법이 제안되어 무한구간 선형 최적제어의 실시간 적용이 가능하게 되었다[46]. 따라서 실시간으로 최적화 문제를 풀어 폐루프 제어법칙을 구하는데 중요한 주제로는 2차 프로그램을 매시간 효율적으로 풀 수 있는 알고리즘의 연구이다. 현재 발표되어 있는 가장 효과적인 2차 프로그램을 푸는 알고리즘은 Active Set Method[47] 와 Interior Point Method[48][49][50]이다. Active Set Method는 가능해가 존재한다고 가정을 하고 시작한다. 우선 r번째 반복했을 경우 가능해 θ_r가 존재한다고 가정하면 제한조건의 일부(Active Set)를 만족하면서 2차 프로그램의 목적함수를 최소화하도록 만드는 개선된 해 $\theta_r + \triangle\theta$를 찾는 것이다. 만약 새로 얻은 해가 가능 해라면 다음 번 반복을 수행하고, 이 해가 가능 해 가 아닐 경우에는 line-search를 적용하여 비활성화된 구속조건을 활성화시키고 새롭게 얻은 활성화된 구속조건을 active set에 추가시키면서 반복적으로 2차 프로그램을 푸는 것이다. 하지만 이 방법은 2차 프로그램의 해와 Active Set을 조합해서 문제에 추가시키기 때문에 시스템의 차수가 커짐에 따라 계산량이 매우 증가하게 된다. 하지만 Interior Point Method를 사용하면 큰 차수를 갖는 시스템이라도 상당히 빠른 성능을 보장 받을 수 있다. Active Set Method가 가능영역의 경계부분의 점들을 반복적으로 찾아가면서 가능해의 여부를 따지며 개선된 해를 얻는 방법임에 반해 Interior Point Method는 우선 가능영역의 내부에 존재하는 점들을 반복적으로 찾아가며 2차 프로그램을 푸는 것이다. 이와 더불어 반한정 프로그래밍에 의한 이동구간 제어기 설계법이 큰 주목을 받고 있다[17][32][33]. 이 접근법은 이동구간 목적함수를 직접적으로 최소하는 대신 목적함수의 상한을 최소화하는 방법을 이용한다. 이 방법은 입출력 구속조건을 선형행렬부등식 형태로 바꾸어 이를 반한정 프로그램의 한정조건에 추가하여 실시간으로 이동구간 법칙을 구해내기 때문에 입출력 구속조건을 매우 쉽게 처리할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 또한 현재 반한정 프로그램을 매우 효율적이고 빠르게 풀어낼 수 있는 여러 방법이 존재함과 동시에 상당히 정확하게 전역적인 최적해를 보장할 수 있기 때문에 최근 이동구간 제어기 설계시 주목을 받고 있는 방법중 하나이다. 선형행렬 부등식과 반한정 프로그램에 관한 자세한 사항은 [31]에 소개되고 있다.

VI. 비선형 시스템

이동구간 제어기법을 선형 시스템에서 비선형 시스템으로 확장하는 결과는 다음의 2가지 접근법으로 생각해볼 수 있다. 기본적으로 자코비 선형화에 의한 접근법이며 또 하나는 비선형 이동구간 제어기법이다. 비선형 시스템을 자코비 선형화하여 얻은 선형화 모델은 간단한 비선형제어기를 설계하기 위해 많이 쓰이는 방식이다[51]. 선형화된 모델은 상태변수의 변화에 따라 계속 갱신되며 DMC(Dynamic Matrix Control)이 선형화된 모델에 적용된다. 이 방법은 매우 간단하지만 안정도 및 성능을 보장할 수 없다. 이와는 다른 접근법으로 많은 연구가 수행되어 온 분야는 비선형 이동구간 제어기법이다. 보통 비선형 이동구간 제어기를 설계할 경우에 고려되는 시스템 및 목적함수는 다음과 같다.

$$x = f(t, x(t),\ u(t))$$

$$V(x, t:\ u) = \int_t^{t+T} m(\tau, x(\tau),\ u(\tau))d\tau$$

이때 위의 목적함수를 구간 $t \le \tau \le t+T$ 에서 최소화시키는 최적제어 입력을 $\hat{u}(\tau; x(t), t)$ 라고 두면 이때 비선형 이동구간 제어법칙은 다음과 같이 정의된다.

$$u(t) = \hat{u}(t; x(t), t)$$

구해진 제어입력은 시간 t와 상태변수 $x(t)$에 관한 함수이므로 폐루프 제어기로 간주될 수 있다. 일반적으로 비선형 이동구간 제어기를 설계할 경우 위의 최적화문제의 해가 존재한다고 가정을 하고 논의를 시작한다. 본 장에서는 비선형 이동구간 제어기를 설계하는 접근법에 따라 소개를 하고자 한다.

1. 최종상태 한정 조건에 의한 설계법

비선형 이동구간 제어기의 안정도에 관한 최초의 결과는 [52]에 소개되었다. 2차 목적함수를 고려하고 최종 상태 한정조건 $x(t+T)=0$에 따른 최적화문제의 해가 존재한다는 가정하에서 폐루프 안정도에 관한 결과가 도출되었다. 다소 제한적인 가정이 필요하지만 비선형 시불변 시스템에 대해 제안된 이동구간 제어법칙을 이용하여 점근적인 안정성을 증명하였다. 하지만 이 방법은 최적의 value function

이 미분가능 해야 한다는 가정을 필요로 하였지만 [53]과 [54]에서 이러한 가정이 완화되었다. 그 후에, 시변 비선형 시스템으로 안정화 제어기설계가 확장되었다[55][56]. [52]에서는 Lyapunov function을 이용하여 안정성을 증명하였지만 [56]에서는 value function의 단조성을 이용하여 증명이 한결 간단해졌다. 이산형 비선형 시스템에 대해서는 폐루프 안정성을 보장하는 위와 비슷한 결과[57][58][59]가 도출되었으며 이는 목적함수의 구간을 무한대로 두거나 최종상태 한정조건을 이용하여 value function이 비증가함수임을 보여 쉽게 증명되었다. 이 방법은 수학적으로 안정성을 증명하기가 쉬운 방법이지만 최종상태 한정조건에 의해 실행영역이 매우 작으므로 비선형 개 구간 최적제어 문제의 해가 존재할 가능성이 희박하므로 이러한 종류의 제어기를 구현하기에는 큰 문제점을 갖고 있다. 또한 주어진 구간의 크기가 작거나 시스템의 비선형성이 클 경우 그리고 비선형 시스템에 입출력 구속조건이 존재할 경우 최적화문제의 해가 존재하지 않을 경우도 있다.

2. 이중모드 제어기 설계법

최종상태 한정 조건 $x(t+T)=0$을 갖고 비선형 최적화문제를 풀 경우 해가 존재하지 않을 경우가 있으므로 이러한 최종상태의 등식 조건을 부등식 조건 $x(t+T)\in W$으로 완화한다면 최적화문제를 풀기가 더욱 수월해질 것이다 [54]. 만약 $x(t)\notin W$일 경우 부등식 조건 $x(t+T)\in W$을 갖고 유한구간 비선형 최적화문제를 연속적으로 풀어 상태변수를 집합 W으로 끌고 온 후 보통 집합 의 내부에서 제어기를 변경하여 $u(t)=K_{LQ}x(t)$와 같은 안정한 선형제어기를 이용한다. 여기서 집합 W가 LQ 제어기의 가능해 집합이므로 이 방법의 폐루프 안정성은 쉽게 증명될 수 있다. 보통 집합 W는 원점주변에서 선형 궤한 제어기가 선형화된 시스템을 안정화하도록 설계되지만 시스템의 비선형성이 크거나 선형화된 시스템이 불안정할 경우 이것이 불가능할 경우도 존재한다. 최종 상태변수의 영역인 집합 W를 오프라인에서 결정하는 방법은 [60]에 소개되어 있다. 또한 본 접근법은 모델의 불확실성과 외부 잡음에도 강인한 성능을 갖는 장점을 갖고는 있지만 비선형 제어기로부터 선형제어기로의 변화는 다소 인위적인 방법이며 제어기의 불연속성을 발생시킬 수도 있다. 다음 장에 소개되는 최종상태 목적함수에 의한 이동구간 제어기 설계법은 제어기의 스위칭을 필요로하지 않는 좀 더 진일보된 방법이라고 볼 수 있다.

3. 최종상태의 목적함수에 의한 설계법

이 방법은 폐루프 안정성을 보장하기 위해 다음과 같은 목적함수 $F(\cdot)$를 고려하여 이동구간 제어기를 설계하는 방법이다[61][62].

$$V(x,t:u)=\int_{t}^{t+T} m(\tau,x(\tau),u(\tau))\,d\tau + F(x(t+T))$$

이때 최종상태의 목적함수는 시간 $t+T$이후에 안정한 제어기 $u(t)=Kx(t)$를 이용하여 다음과 같이 선택한다면

$$F(x(t+T)) \geq \int_{t+T}^{\infty} m(\tau,x(\tau),u(\tau))\,d\tau$$

목적함수의 value function을 Lyapunov Function으로 간주하여 쉽게 안정성을 증명할 수 있다. 여기서 위의 부등식 조건이 만족되도록 최종상태의 목적함수 $F(\cdot)$와 선형 안정화 제어기 $u(t)=Kx(t)$를 찾는 방법은 쉽지 않지만 보통 선형 제어기가 원점 주변에서 선형화된 시스템을 안정화 하게 만드는 집합 W에서 계산된다. 즉, 연속형 비선형 시스템에 대해 최종상태의 목적함수를 선형화된 시스템의 Lyapunov Function인 2차 형태로 잡아 상당히 쉬운 설계법을 제시하고 있다. 또한 비교적 간단한 2차 형태의 목적함수를 고려하여 구현하기도 상당히 쉽다는 장점을 갖고 있다. [61]과는 달리 [63]에서는 시변 이산시 비선형 시스템에 대해 비 2차 형태의 이동구간 목적함수를 고려한 결과를 소개하고 있다. 이 결과 역시 최종상태의 목적함수 $F(\cdot)$는 위의 부등식을 만족하도록 선택된다. 이 방법은 이중모드 제어기 설계법이 갖고 있는 제어기의 스위칭 특성을 요구하지 않지만 주어진 비선형시스템을 원점 주변에서 선형화하여 얻은 선형 시스템이 안정화 가능하지 않다면 적용될 수 없다는 단점을 갖고 있다.

4. CLF에 의한 설계법

최근에 비선형 이동구간 제어기의 폐루프 안정성을 보장하기 위해서 전역 CLF(Control Lyapunov Function)를 이용한 접근법이 제안되었다[64][65]. 이동구간 제어기의 구간을 0으로 접근시킬 경우 [66]에서 제안된 Pointwise Min-Norm 제어기가 생성이 됨과 동시에 구간을 무한대로 접근시킬 경우 무한구간 최적제어 문제가 생성된다는 흥미로운 결과를 제시하지만 이 방법에서 고려되는 비선형시스템은 입력에 구속조건이 없으며 시스템에 대한 전역 CLF를 이미 알고 있어야 한다는 단점이 있다. 보통 전역 CLF를 이동구간 제어기설계에 이용하는 방법은 2가지로 나눌 수 있다. 첫째로 다음과 같은 직접적인 안정성에 관한 구속조건을 추가해서 최적화문제를 풀어 제어입력을 구하는 방법[64]이다.

$$\frac{\partial V}{\partial t}[f+gu(t)] \leq -\varepsilon\sigma(x(t))$$

여기서 $\sigma(\cdot)$는 양한정 함수이며 $0<\varepsilon\leq 1$이다. 이 방법은 전역 CLF를 이용한 Sontag의 비선형 제어기[67]보다 상당히 뛰어나며 무한구간 최적 제어기에 근접한 성능을 보장한다. 둘째로 최종상태의 목적함수를 전역 CLF로 두어 설계하는 방법[65][68]이다. 이 방법에서 보통 비선형 제어기 $k(\cdot)$에 대해 CLF는 다음과 같은 관계식을 만족하도록 선택된다.

$$F(x(t+T)) = \int_{t+T}^{\infty} m(\tau,x(\tau),k(\tau))\,d\tau$$

이러한 관계식을 만족하는 CLF를 찾는 방법[68]은 여러가지가 존재하지만 비록 위의 관계식을 정확히 만족하는 CLF를 발견할 수 없다고 해도 충분히 큰 상수로 크기조정을 하여 관계식을 만족시킬 수 있다[65]. [65][68]에서 사용하는 방법은 CLF가 cost-to-go의 상한이 되도록 선택하는

것이다. 현재 발표된 CLF를 이용한 결과들은 대부분 입출력 제한조건이 없는 경우에만 한정이 되어있으므로 입출력에 구속조건이 존재하는 시스템에 대한 연구가 필요하다.

VII. 산업계의 응용

70년대 후반 이후 컴퓨터 기술이 발전함에 따라 위에 제시되었던 이동구간 제어 알고리즘이 매우 효율적으로 계산되어 산업계에 널리 응용되고 있다. 보통 화학공정, 항공기, 메카트로닉스와 같은 복잡하고 비선형성이 높은 플랜트에도 이동구간 제어기법이 상당히 많은 주목을 받고 있다. 하지만 이동구간 제어기법을 실제 플랜트에 응용할 경우 만약 시스템에 입출력 구속조건이 존재한다면 매우 성능이 뛰어난 컴퓨터가 마련되어 있거나 고속의 최적화 알고리즘이 개발되어 있지 않다면 빠르게 동작하는 플랜트에는 적용이 어려울 경우가 있다. 따라서 이동구간 제어기법을 성공적으로 설치 및 가동하기 위해서는 상당한 정도로 숙련된 기술자가 요구되기도 한다. 이와 관련된 찬반 양론은 [69]에 소개되고 있다. 입출력 구속조건이 없는 시스템에 대한 이동구간 제어기의 응용 사례는 상당히 적은데 그 이유는 이동구간 제어기법을 연구하던 초기에 입출력 구속조건 없이 제어기의 특징을 이론적으로 연구했기 때문이며 실제로 많은 플랜트가 물리적인 한계 및 환경적인 문제에 의하여 필연적으로 구속조건을 갖고 있기 때문이다[56]. 기본적으로 이동구간 제어기법의 산업계 응용은 [70]에 소개되고 있으며, 화학공정에서 다음과 같은 플랜트에 이동구간 제어기법이 적용되고 있다: 증류탑[9][71][72][73][74][69], 촉매분해 시설[75][10], 수소 첨가 분해로[76][77], 화학 반응기[78][51][79]. 이동구간 제어기법이 적용되는 다른 시스템을 살펴보면 다음과 같다: 탱크 수위[80][81], 보일러[82], 열 교환기[83], 제트엔진[84], 연소[85], 풍동[82]. 또한 항공기 유도[86], 자동 조종장치[87], 메카트로닉스 서보 시스템[69]에도 응용되고 있다. 화학공정 분야에서 세계적으로 가장 널리 쓰이는 이동구간 제어기법의 제품으로는 70년대 말 이동구간 제어기법의 유용성을 발견해낸 Cutler그룹이 속한 DMC사가 만든 DMC와 Richalet 그룹이 속해 있는 Adersa에서 만든 IDCOM, HIECON등이 있다. 이외에 널리 쓰이는 것들로는 Setpoint사의 SMPC, Honeywell의 RMPCT 그리고 Treiber Controls의 OPC를 들 수 있다. 최근에 ASPEN TECH사가 DMC사와 Setpoint사를 인수하여 DMC와SMPC의 접목을 시도하고 있다. 이들 이동구간 제어기법의 제품들은 기본적으로 이동구간 제어기법을 채용하고 있으나 채택한 공정모델, 최적화하려는 이동구간 목적함수, 제어입력의 계산방법이 서로 다르다. 한편 Adersa의 IDCOM과 HIECON는 기계, 항공, 식품 분야를 포함한 다양한 공정에서 사용되었다. 이동구간 제어기법에 대한 상용 패키지의 정보는 최근 CPC-V에서 발표된 [88]에 소개되어 있으며 더욱 자세한 정보는 같은 저자의 최근 동향논문[89]에 소개되고 있다.

VIII. 결론

이동구간 제어기법은 현재 산업계에서 널리 적용되고 있는 이론적으로 잘 정립된 고급 제어이론 중 하나이다. 유한구간 최적제어문제를 반복해서 풀어 폐루프 제어입력을 구해내기 때문에 입출력에 구속조건이 있을 경우 이를 매우 효과적으로 처리할 수 있게 해주는 유용한 제어기법이다. 하지만 유한구간 최적제어 문제를 풀어 입력을 얻기 때문에 폐루프 안정성을 보장하는 문제가 이동구간 제어기법에서 중요하게 인식되고 있다. 따라서 본 논문에서는 이동구간 제어기법의 폐루프 안정성을 보장하기 위한 여러 결과들을 소개하고 이와 더불어 모델의 불확실성 및 외부잡음에 만족할 만한 성능을 보장하는 강인한 이동구간 제어기 설계에 관한 연구내용이 소개되었다. 또한 이동구간 제어법칙을 구하기 위해 필요한 최적화 기법이 언급되었으며 이동구간 제어기법을 비선형 시스템에 적용하여 폐루프의 안정성과 같은 좋은 특징을 갖는 여러 결과들을 소개 하였다. 고속화된 최적화 알고리즘과 뛰어난 성능을 자랑하는 컴퓨터의 개발로 이동구간 제어기법은 실제 산업계 플랜트의 훌륭한 성능을 보장하는 제어기법으로 자리매김을 하고 있으며 앞으로 더욱 많은 결과와 응용사례가 보고될 것이다..

참고문헌

[1] A. I. Propoi, "Use of Linear Programming Methods for Synthesizing sampled data Automatic Systems", *Auto. Remote Contr.*, vol. 24, pp. 837-844, July, 1963.

[2] S. E. Dreyfus, *Dynamic Programming and the Calculus of Variations*, Academic Press, New York, 1965.

[3] W. H, Kwon and A. E. Pearson, "A Modified Quadratic Cost Problem and Feedback Stabilization of a Linear System", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 22, no. 3, pp. 838-842, 1977.

[4] W. H, Kwon and A. E. Pearson, "On the Feedback Stabilization of Time Varying Discrete Time Systems", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 23, pp. 479-481, 1978.

[5] W. H, Kwon and D. G. Byun, "Receding Horizon Tracking Control as a Predictive Control and its Stability Properties", *International Journal of Control*, vol. 50, no. 3, pp. 1807-1824, 1989.

[6] Y. I. Lee, W. H. Kwon, and S. Noh, "Receding Horizon Predictive Control and its Related GPC with Stability Properties", *C-TAT* vol. 10, no. 3, pp. 523-537, 1994.

[7] P. Krauss, K. Dass, and H. Rake, "Model-based Predictive Controller with Kalman Filtering for State Estimation", *Advances in Model-Based Predictive Control*, Oxford University Press, pp. 69-83, 1994.

[8] J. H. Lee and N. L. Ricker, "Extended Kalman Filter Based Nonlinear Model Predictive Control", *Inde. Eng. Chem. Res*, vol. 33, pp. 1530-1541, 1994.

[9] J. Richalet, A. Raults, J. L. Testud and J. Papon, "Model Predictive Heuristic Control: Application to Industrial Precesses", *Automatica*, vol. 14, pp. 413-428, 1978.

[10] C. R. Cutler and B. L. Ramaker, "Dynamic Matrix Control-A Computer Control Algorithm", *Proc. of Joint Automatic Control Conference*, 1980.

[11] W. H, Kwon and A. E. Pearson, "On the Stabilization of a Discrete Constant Linear System", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 20, no. 6, pp. 800-801, 1975.

[12] L. Chisci and E. Mosca, "Stabilizing Predictive Control: the Singular Transition Matrix Case", *Advances in Model-Based Predictive Control*, Oxford University Press, pp. 122-130, 1994.

[13] C. K. Finn, B. Wahlberg, and B. E. Ydstie, "Constrained Predictive Control Using Orthogonal Expansions", *AIChE J.*, vol. 39, no. 11, pp. 1810-1826, 1993.

[14] J. Rawlings and K. R. Muske, "Stability of Constrained Receding Horizon Control", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 38, pp. 1512-1516, 1993.

[15] A. Zheng and M. Morari, "Stability of Model Predictive Control with Mixed Constraints", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 40, pp. 1818-1823, 1995.

[16] W. H, Kwon, A. M. Bruckstein, and T. Kailath, "Stabilizing State-feedback Design via the Moving Horizon Method", *International Journal of Control*, vol. 37, pp. 631-643, 1983.

[17] J. W. Lee, W. H. Kwon, and J. H. Choi, "On Stability of Constrained Receding Horizon Control with Finite Terminal Weighting Matrix", *Automatica*, vol. 34, no. 12, pp. 1607-1612, 1998.

[18] W. H. Kwon and K. B. Kim, "On Stabilizing Receding Horizon Controls for Linear Continuous Time-invariant Systems", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 45, no. 7, pp. 1329-1334, 2000.

[19] C. E. Garcia and M. Morari, "Internal Model Control: 1. A Unifying Review and Some New Results", *Inde. Eng. Chem. Res*, vol. 21, pp. 308-232, 1982.

[20] C. E. Garcia and M. Morari , "Internal Model Control: 2. Design Procedure for Multivariable Systems", *Inde. Eng. Chem. Res*, vol. 24, pp. 472-484, 1985.

[21] C. E. Garcia and M. Morari, "Internal Model Control: 3. Multivariable Control Law Computation and Tuning Guidelines", *Inde. Eng. Chem. Res*, vol. 24, pp. 484-494, 1985.

[22] E. Zafiriou, "Robust Model Predictive Control of Processes with Hard Constraint", *Computer Chem. Engng.*, vol. 14, pp. 359-371, 1990.

[23] E. Zafiriou, and A. Marchal, "Stability of SISO Quadratic Dynamic Matrix Control with Hard Output Constraint", *AIChE J.*, vol. 37, pp. 1550-1560, 1991.

[24] H. Genceli and M. Nikolaou, "Robust Stability Analysis of Constrained l_1-norm Model Predictive Control", *AIChE J.*, vol. 39, pp. 1954 - 1965, 1993.

[25] E. Polak and T. H. Yang, "Moving Horizon Control of Linear Systems with Input Saturation and Plant Uncertainty -1. Robustness", *International Journal of Control*, vol. 53, pp. 613-638, 1993.

[26] E. Polak and T. H. Yang, "Moving Horizon Control of Linear Systems with Input Saturation and Plant Uncertainty - 2. Disturbance Rejection and Tracking", *International Journal of Control*, vol. 58, pp. 639-663, 1993.

[27] J. Y. Lee, "Receding Horizon Predictive Control for the Continuous-time Systems", *Proc. of the 32nd SICE annual Conference*, pp. 1067-1072, 1993.

[28] P. J. Campo and M. Morari, "Robust Model Predictive Control", *Proc. of American Control Conference*, pp. 1021-1026, 1987.

[29] J. C. Allwright and G. C. Papavasiliou, "On Linear Programming and Robust Model Predictive Control Using Impulse Response", *Systems and Control Letters*, vol. 18, pp. 159-164, 1992.

[30] Z. Q. Zheng and M. Morari, "Robust Stability of Constrained Model Predictive Control", *Proc. of American Control Conference*, pp. 379-383, 1993.

[31] S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*, vol. 15, SIAM, Philadelphia, 1994.

[32] M. V. Kothare, V. Balakrishnana, and M. Morari, "Robust Constrained Model Predictive Control using Linear Matrix Inequalities", *Automatica*, vol. 32, no. 10, pp. 1361-1379, 1996.

[33] B. G. Park and W. H. Kwon, "Robust one-step Receding Horizon Control for Constrained Systems", *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 9, no. 7, pp. 381-395, 1999.

[34] D. W. Clake, "Advanced in Model-based Predictive Control", *Advances in Model-Based Predictive Control*, Oxford University Press, pp. 3-21, 1994.

[35] J. W. Lee, "Robustness of Receding Horizon Control", *Technical Report of Information Systems Lab. in Seoul National University*, SNUISL 9317, 1993.

[36] I. Yaesh and U. Shaked, "Minimum H_∞ norm Regulation of Linear Discrete-time Systems and Its Relation to Linear Quadratic Discrete Games", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 35, pp. 1061-1064, 1990.

[37] T. Basar, "A Dynamic Game Approach to Controller Design : Disturbance Rejection in Discrete-time", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 36, pp. 936-952, 1991.

[38] G. Tadmor, "Receding Horizon Revised : An Easy way to Robustly Stabilize an LTV Systems", *Systems and Control Letters*, vol. 18, pp. 285-294, 1992.

[39] S. Lall and K. Glover, "A Game Theoretic Approach to Moving Horizon Control", *Advances in Model-Based Predictive Control*, Oxford University Press, pp. 131-144, 1994.

[40] J. W. Lee, W. H. Kwon, and J. H. Lee, "Receding

Horizon H_∞ Tracking Control for Time-Varying Discrete Linear Systems", *International Journal of Control*, vol. 68, pp. 385-399, 1999.

[41] K. B. Kim and W. H. Kwon, "Stabilizing Receding Horizon H_∞ Control for Linear Discrete Time-varying Ssytems", *International Journal of Control*, vol. 75, no. 8, pp. 1449-1456, 2002.

[42] M. Sznaier and M. J. Damborg, "Suboptimal Control of Linear Systems with State and Control Inequality Constraint", *Proc. of Conf. Decision Contr.*, pp. 761-762, 1987.

[43] M. Sznaier and M. J. Damborg, "Heuristically Enhanced Feedback Control of Constrained Discrete-time Linear Systems", *Automatica*, vol. 26, pp. 521-531, 1990.

[44] P. O. M. Scokaert and M. J. Rawlings, "Infinite Horizon Linear Quadratic Control with Constraints", *Proc. of IFAC World Congress*, pp. 109-114, 1996.

[45] P. O. M. Scokaert and M. J. Rawlings, "Constrained Linear Quadratic Regulation", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 43, pp. 1163-1169, 1998.

[46] D. Chmielewski and V. Manousiouthakis, "On Constrained Infinite-time Linear Quadratic Optimal Control", *Systems and Control Letters*, vol. 29, pp. 121-129, 1996.

[47] R. R. Fletcher, *Practical Methods of Optimization*, Wiley, 2nd Edition, 1987.

[48] J. E. Nesterov and A. S. Nemirovsky, *Interior Point Polynomial Methods in Convex Programming : Theory and Applications*, SIAM, Philadelphia, 1994.

[49] S. J. Wright, *Primal-Dual Interior Point Methods*, SIAM, Philadelphia, 1974.

[50] C. Roos, T. Terlaky, and J.-Ph. Vial, *Theory and Algorithms for Linear Optimization - An Interior Point Approach*, Wiley, Chichester, 1997.

[51] C. E. Garcia, "Quadratic Dynamic Matrix Control of Nonlinear Processes : An Application to a Batch Reactor Process", *Proc. of AIChE Annual Meeting*, San Francisco, 1984.

[52] D. Q. Mayne and H. Michalska, "Receding Horizon Control of Nonlinear Systems", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 35, no. 7, pp. 814-824, 1990.

[53] H. Michalska and D. Q. Mayne, "Receding Horizon Control of Nonlinear Systems without differentiability of optimal value function", *Systems and Control Letters*, vol. 16, pp. 123-130, 1991.

[54] H. Michalska and D. Q. Mayne, "Robust Receding Horizon Control of Constrained Nonlinear Systems", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 38, no. 11, pp. 1623-1633, 1993.

[55] R. B. Vinter and H. Michalska, "Receding Horizon Control for Nonlinear Time-varying Systems", *Proc. of Conf. Decision Cont.*, pp. 75-76, 1991.

[56] L. Kershenbaum, D. Q. Mayne, R. Pytlak, and R. B. Vinter, "Receding Horizon Control", *Advances in Model-Based Predictive Control*, Oxford University Press, pp. 523-535, 1994.

[57] S.S. Keerthi and E.G. Gilbert, "Optimal Infinite-horizon Feedback Laws for a General Class of Constrained Discrete-time Systems: Stability and Moving-horizon Approximations", *J. Optimiz. Theory and Appl.*, vol. 57, pp. 265-293, 1988.

[58] E. Meadows and J. Rawlings, "Receding Horizon Control with an Infinite Horizon", *Proc. of American Control Conference*, pp. 2926-2930, 1993.

[59] M. Alamir and G. Bornard, "New Sufficient Conditions for Global Stability of Receding Horizon Control for Discrete-time Nonlinear Systems", *Advances in Model-Based Predictive Control*, Oxford University Press, pp. 173-181, 1994.

[60] J. Hauser and M. C, Lai, "Estimating · Quadratic Stability Domains By Nonsmooth Optimization", *Proc. of American Control Conference*, pp. 571-576, 1992.

[61] H. Chen and F. Allgower, "A Quasi-infinite Horizon Nonlinear Model Predictive Control Scheme with Guaranteed Stability", *Automatica*, vol. 34, no. 10, pp. 1205-1217, 1998.

[62] T. Parisini and R. Zoppoli, "A Receding Horizon Regulator for Nonlinear Systems and a Neural Approximation", *Automatica*, vol. 31, pp. 1443-1451, 1995.

[63] G. De Nicolao, L. Magni, R. Scattolini, "Stabilizing Receding-horizon Control of Nonlinear Time-varying Systems", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 43, No. 7, pp. 1030-1036, 1998.

[64] J. A. Primbs, V. Nevistic, and J. C. Doyle, "A Receding Horizon Generalization of Pointwise Min-norm Controllers", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 45, No. 5, pp. 898-909, 2000.

[65] A. Jadbabaie, J. Yu, and J. Hauser, "Stabilizing Receding Horizon Control of Nonlinear Systems : A Control Lyapunov Function Approach", *Proc. of American Control Conference*, pp. 1535-1539, 1999.

[66] R. Freeman and P. V. Kokotovic, *Robust Nonlinear Control Design*, Birkhauser, Boston, 1996.

[67] E. D. Sontag, "A Universal Construction of Arstein's Theorem on Nonlinear Stabilization", *System and Control Letter*, vol. 13, no. 2, pp. 117-123, 1989.

[68] A. Jadbabaie, "Receding Horizon Control of Nonlinear Systems : Control Lyapunov Function Approach", *Ph. D. Dissertation*, California Institute Technology, 2000.

[69] J. Richalet "Industrial Application of Model Based Predictive Control", *Automatica*, vol. 29, pp. 1251-1274, 1993.

[70] C. E. Garcia, D. E. Prett, and M. Morari "Model Predictive Control - Theory and Practice - A Survey", *Automatica*, vol. 25, Iss. 3, pp. 335-348, 1989.

[71] J. C. Engrand, "Applications of Multivariable Control in a Refinery and Implementation on a Dedicated Minicomputer", *Proc. of JACC*, FA9-D, 1980.

[72] R. H. Luecke, J.C. Lewis, H.Y. Lin, and W. K. Yoon, "Dynamic Matrix Control of a Batch Distillation Column", *Proc. of American Control Conference*, pp. 209, 1985.

[73] K L. Levien and M. Morari, "Internal Model Control of Coupled Distillation Conlumn", *AIChE J.*, vol. 33, pp. 83, 1987.

[74] J. H. Lee, S. M. Gelormino, and M. Morari, "Model Predictive Control of Multi-rate Sampled-data Sytems : A State-space Approach", *International Journal of Control*, vol. 55, no. 1, 1992.

[75] D. M. Prett and R. D. Gillette, "Optimization and Constrained Multivariable Control of a Catalytic Cracking Unit", *AIChE National Mtg : also Proc. Joint Aut. Control Conf.*, 1979.

[76] C. R. Cutler and R. B. Hawkins, "Constrained Multivariable Control of a Hydrocracker Reactor", *Proc. of American Control Conference*, pp. 1014-1020, 1987.

[77] J. M. Caldwell and G. D. Martin, "On-line Analyzer Predictive Control", *Proc. of 6th Annual Control Expo Conference*, 1987.

[78] F. Lebourgeois, "IDCOM Application and Experiences on a PVC Production Plant", *Proc. of JACC*, FA9-C 1980.

[79] F. S. Ozgulsen, S. J. Kendra, and A. Cinar, "Nonlinear Predictive Control of Periodically Forced Chemical Reactors", *AIChE J.*, vol. 39, no. 4, 1993.

[80] Y. Arkun, J. Hollet, W. M. Canney, M. Morari, "Experimental Study of Internal Model Control", *Ind. Chem. Process Des. Dev.*, vol. 25, 1986.

[81] F. Berlin and P. M. Frank, "Design and Realization of a MIMO Predictive Controller for a 3-tank System", *Advances in Model-Based Predictive Control*, Oxford University Press, pp. 446-457, 1994.

[82] R. K. Mehra and R. Rouhani, J. Eremo, and J. Richalet, "Model Algorithm Control : Review and Recent Development", *Eng. Foundation Conf. on Chemical Process Control II*, pp. 287-310, 1982.

[83] J. R. Parrish and C. B. Brosilow "Inferential Control Application", *Automatica*, vol. 21, pp. 527-538, 1985.

[84] R. K. Mehra, W. C. Kessel, A. Rault, J. Richalet, and J. Papon, "Model Algorithm Control using IDCOM for the F100 Jet Engine Multivariable Control Design Problem", *in Alternative for Linear Multivariable Control*, 1978.

[85] S. Venugopal and Y. P. Gupta, "Predictive Control of a Circulating Fluidized Bed Combustor", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 69, pp. 130-135, 1991.

[86] J. G. Reid, D. E. Chaffin, and J. T. Silverthron, "Output Predictive Algorithm Control : Precision Tracking with Application to Terrain Following", *Journal of Guidance and Control*, vol. 4, no. 5, pp. 502-509, 1981.

[87] E. G. Kassapakis and G. K. Warwick, "Predictive Algorithm for Autopilot Design", *Advances in Model-Based Predictive Control*, Oxford University Press, pp. 458-470, 1994.

[88] S. J. Qin and T. A. Badgwell, "An Overview of Industrial Model Predictive Control Technology", *Proc. of Chem. Proc. Contr. V*, pp. 232-256, 1996.

[89] S. J. Qin and T. A. Badgwell, "A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology", *appear in Control Engineering Practice*, 2003.

권 욱 현

1944년 1월 19일생. 1966년 서울대학교 전기공학과(공학사). 1972년 서울대학교 전기공학과(공학석사). 1975년 미국 Brown University 전기공학과(공학박사). 1976년~1977년 University of Iowa 겸직 조교수. 1981년~1982년 Stanford University 객원교수. 1977년~현재 서울대학교 교수로 재직중. 1991년~현재 제어계측신기술연구센터 소장. 관심분야는 다변수 강인제어, 이동구간제어, 시간지연 시스템, 최적 FIR 필터, 이산현상 시스템, 네트웍 분석, 공장자동화를 위한 컴퓨터 응용 등.

안 춘 기

1977년 1월 6일생. 2000년 고려대학교 전기전자전파공학부(공학사). 2002년 고려대학교 전기공학과(공학석사). 2002년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정 재학중. 관심분야는 이동구간제어, 시간지연 시스템, 비선형 제어 이론, 적응제어.