

# 최소제곱평균 추정기법 알고리즘을 이용한 트랙서보패턴 간격 최적화

Track servo patterns spacing optimization using least mean square estimation algorithm for holographic data storage

임성용\*, 이종진\*\*, 이재성\*, 정우영\*, 양현석†, 박노철\*, 박영필\*  
Sung-Yong Lim, JongJin Lee, Jae-Seong Lee, Wooyoung Jeong  
Hyunseok Yang, No-Cheol Park and Young-Pil Park

(2013년 3월 18일 접수; 2013년 3월 22일 심사완료; 2013년 3월 22일 게재확정)

## Abstract

Page-oriented holographic data storage (HDS) is very sensitive to the disturbances. However, vibration effect by disc imbalance can be ignored because data pages are recorded and retrieved with stop-go rotation. Therefore, just estimating de-track due to eccentricity of disc is enough to construct stable track servo system. In this paper, propose the spacing of track servo patterns optimization method using Least Mean Square (LMS) estimation algorithm. Through the patterns spacing optimization, storage density maximize can be achieved.

**Key Words :** Holographic data storage, Servo pattern, Least mean square, Estimation method

## 1. 서론

### 1.1 홀로그래픽 정보저장기기

홀로그래픽 정보저장기기는 차세대 정보저장기기 중의 하나로서 2 차원 데이터페이지 (홀로그래프)를 한 지점에 중첩 기록함으로써 이론적으로 1Gb/s의 데이터 전송률과 1Tbit/cm<sup>3</sup>의 고밀도 기록이 가능한 장점을 가지고 있다[1]. 한 지점에 홀로그래프를 중첩 기록하는 기법을 다중화 기법이라 하는데 홀로그래프의 다중화 기록/재생 방법으로는 각 다중화, 파장 다중화, 위상코드 다중화 등 여러 가지 기법이 제안되어 있다. 이러한 기법들 중 각 다중화(angle multiplexing)방식은 그 구성이 간단하고, 상용화 가능성이 크므로 현재

홀로그래프의 다중화 기록/재생에 가장 널리 사용되는 방식이다.

### 1.2 연구배경

일반적인 각 다중화 방식의 홀로그래픽 정보저장기기의 스피들 모터의 구동방식은 일정한 선속도로 회전하는 CD, DVD와 같은 광 정보저장기기와 달리 가다-서다 회전을 반복하는 과정을 통해서 저장/재생이 이루어진다. 스피들이 정지한 상태에서 갈바노미러의 각도를 바꿔가며 홀로그래프를 기록하고 재생한다. 갈바노미러를 통해서 스팟에 중첩 기록된 데이터들의 기록 및 재생이 끝나면 스피들의 회전을 통해서 다음 스팟으로 이동한다.

기존의 광 정보저장기기의 외란 형태는 편심, 편향, 편중심 이 세 가지로 분류할 수 있다. 편심과 편향은 디스크와 스피들의 제작공차 및 스피들과 디스크의 체결조건의 변화에 의해서 발생한다. 또한 편중심 디스크의 회전에 의해 드라이브 진동이 발생하게 되는데, 편중심량과 디스크 드라이브의 구조적인 특성, 디스크의 회전 속도에 의해서 크기와 주파수 대역의 변화가 발

† Department of mechanical engineering, Yonsei Univ.  
E-mail : hsyang@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-4677

\* Department of mechanical engineering, Yonsei Univ.

\*\* Center for information storage device, Yonsei Univ.

생한다. 따라서 이에 대응하기 위해 페이지 위상 앞섬/뒤짐 제어기와 같은 기본 피드백 제어기에서부터 다양한 고급 제어기들이 적용되어 왔다. 하지만 각 다중화 기반의 홀로그래픽 디스크 드라이브의 스피들은 가다-서다 회전을 반복하기 때문에 매우 느린 속도로 회전하는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 고속 회전시 편중심 디스크에 의해 발생하는 외란을 고려할 필요가 없고, 디스크의 편향과 편심에 의해 발생하는 틸트, 트랙 및 포커스오차만을 보상하면 되기 때문에 피드백 서보시스템 대신 추정기법을 통해서도 충분히 안정적인 서보시스템을 구축할 수 있을 것으로 예상된다.

## 2. 기존연구현황 및 연구목표

### 2.1 홀로그래픽 디스크 드라이브 외란분석

홀로그래픽 디스크의 외란을 분석하기 위해서 가다-서다 회전을 반복하는 스피들 구동에 의해서 발생하는 진동량을 측정하였다. Fig. 1은 가다-서다 회전을 반복하는 스피들의 구동을 엔코더로 측정한 결과다. 그리고 Fig.2는 1.0g/cm의 편중심 디스크를 체결한 상태로 가다-서다 회전을 반복하는 스피들과 5000rpm으로 일정하게 회전하는 스피들에서 발생하는 진동량을 시간 축을 기준으로 측정한 것이다. 가다-서다 회전을 반복하는 스피들에서는 진동량을 무시할 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 가다-서다 회전을 반복하는 홀로그래픽 정보저장기기는 편중심 디스크에 의한 진동을 고려하지 않아도 된다.

### 2.2 Discrete pre-patterns 을 이용한 트랙서보

편중심에 의한 진동을 무시할 수 있는 홀로그래픽 디스크 특성을 기반으로 하여 discrete pre-patterns 을 이용한 트랙서보 방법이 제안되었다 [2]. 일반적으로 홀로그래픽 디스크는 투과형이고, 기록된 홀로그램의 사이즈가 포커스된 서보빔보다 크기 때문에 이를 고려하여 트랙서보 패턴을 설계하였다. 제안된 트랙오차 검출 방법은 패턴과 패턴 사이에 데이터를 기록하고 패턴에 의해서 트랙오차가 보정된 데이터들은 Fig.3과 같이 다음 패턴이 나올 때까지 추가적인 트랙오차 보상없이 기록/재생이 이루어진다. 편심이 발생한 상태에서 디스크가 회전하게 되면, 회전에 따른 트랙오차가 발생하게 되기 때문에 정해진 트랙오차 마진을 벗어나기 전에 패턴을 통해서

트랙오차가 보상되어야 한다. 결과적으로 패턴 사이의 데이터들은 트랙마진 내에서 기록/재생될 수 있다. 패턴사이의 간격은 최대 편심발생량과 트랙오차 마진에 의해서 결정되는데, 최대 편심량이 100um 이고 트랙오차 마진이 25um 일 때 [3], 약 30°간격으로 패턴의 간격이 결정된다는 연구결과가 발표되었다 [2].

### 2.3 연구목표

앞으로 디스크의 최대 편심량이 증가하고 기록밀도 증가를 위해 트랙오차 마진이 작아지게 된다면 패턴간의 간격이 더욱 감소 될것으로 예상된다. 이로인해 기존 연구에 의해 제시되었던 패턴 사이에 기록된 홀로그램이 트랙오차 마진 내에 존재하게 하는 기존의 트랙서보방법으로는 기록밀도 향상에 한계가 있을 것으로 예상된다. 따라서 본연구를 통해서 추정기법 알고리즘을 이용해 최적의 패턴간격을 제안함으로써 기록용량 증가의 가능성을 제시한다.

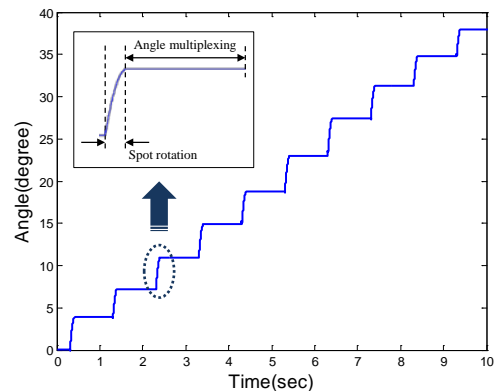


Fig. 1 Spindle control for stop-go rotation

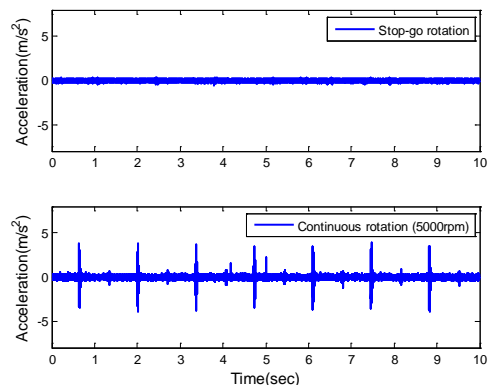


Fig.2 Comparing vibration of stop-go rotation with 5000rpm

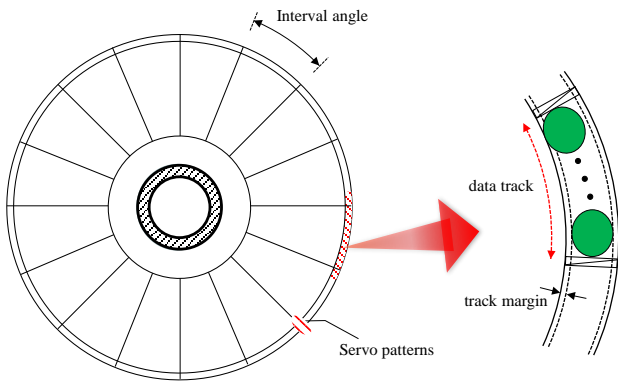


Fig.3 Comparing vibration of stop-go rotation with 5000rpm

### 3. 최소제곱평균 추정기법

최소제곱평균 (Least Mean Square) 알고리즘은 적응형 알고리즘 중에서 가장 간단하면서도 많이 사용되는 알고리즘이다. 임의의 모르는 시스템에 대해 추정 할 때 많이 이용된다. 구현이 간단하고 성능 또한 복잡도 대비 우수하기 때문에 많이 이용되고 있다 [4].

본 연구에서는 트랙오차를 최소의 패턴으로 정확하게 추정하기 위해 최소제곱평균 추정기법을 적용한다. 식(1)의 적합도 함수  $f(x)$  는 다항식으로 구성된다.  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_j$  는 다항식의 계수,  $y_i$  는 패턴 디스크에 새겨진 패턴을 통해서 측정된 트랙오차 값이다. 식(2)의  $err$  은 측정값과 추정값의 오차이다. 측정값을 기준으로 적합도 함수  $f(x)$  와 오차를 최소화 시킬 수 있는 다항식의 계수를 찾아내야 한다. 이를 위해 식(3)과 같이 오차의 제곱식을 최소화 시키기 위해 적합도 함수의 계수로 미분하고, 그 값이 0 인 다항식의 계수 값을 구하게 되면 측정값과 추정된 적합도 함수의 값의 오차가 최소화된다. 적합도 함수의 계수들은 식(4)와 같이  $X = A^{-1}B$  를 통해서 구해진다.

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_jx^j = a_0 + \sum_{k=1}^j a_k x^k \quad (1)$$

$$err = \sum_{i=1}^n (y_i - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_jx_i^j))^2 \quad (2)$$

$$= \sum_{i=1}^n \left( y_i - \left( a_0 + \sum_{k=1}^j a_k x_i^k \right) \right)^2$$

$$\frac{\partial err}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - \left( a_0 + \sum_{k=1}^j a_k x_i^k \right) \right) = 0$$

$$\frac{\partial err}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - \left( a_0 + \sum_{k=1}^j a_k x_i^k \right) \right) x_i = 0$$

$$\vdots$$

$$\frac{\partial err}{\partial a_j} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - \left( a_0 + \sum_{k=1}^j a_k x_i^k \right) \right) x_i^j = 0$$

$$A = \begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^j \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \dots & \sum x_i^{j+1} \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \dots & \sum x_i^{j+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^j & \sum x_i^{j+1} & \sum x_i^{j+2} & \dots & \sum x_i^{j+j} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_j \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum (x_i y_i) \\ \sum (x_i^2 y_i) \\ \vdots \\ \sum (x_i^j y_i) \end{bmatrix}$$

$$X = A^{-1}B \quad (4)$$

### 4. 최소제곱평균 알고리즘을 이용한 트랙오차추정

#### 4.1 편심량, 90° 위상변화, 패턴간격에 따른 추정기법 정확도 분석

최소제곱평균 추정기법을 이용해 편심으로 인한 트랙오차를 정확히 추정해내기 위해 필요한 패턴간의 간격과 적합도 함수의 최적의 차수를 계산하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 편심에 의해 발생하는 트랙오차는 사인함수 형태로 발생하게 된다. Fig.4는 150um 편심디스크 한 트랙에 서보패턴이 120° 간격으로 3 개 삽입되었을 때, 3 개의 패턴을 통해 구해진 트랙오차를 통해 적합도 함수의 차수에 따른 계수를 최적화한 결과이다. 다항식의 차수가 3 차일 때 트랙오차 마진 내에 들어오지만 4,5 차 일 때 트랙오차 마진보다 오차가 커진다.

디스크가 스피들에 탈착 될 때 마다 편심량과 방향이 바뀌게 된다. Fig.5 는 150um 측정위치와 편심디스크 간의 90° 위상차이가 발생했을 때 추정된 결과이다. 위상차이가 없을 때와 달리 모든 오차가 더 크게 발생했다. Fig.6 은 80um 편심디스크에 90° 위상차이가 발생했을 때 추정된 결과로 편심량이 적을수록 추정되는 결과가 정확해짐을 알 수 있다.

Fig.7,8 은 패턴의 수가 증가될수록 추정기법의 정확도가 정확해짐을 보여준다. 패턴의 개수가 60° 간격으로 6 개가 될 때는 적합도 함수의 차수와 상관없이 트랙오차 마진 내에서 트랙오차가 추정된다.

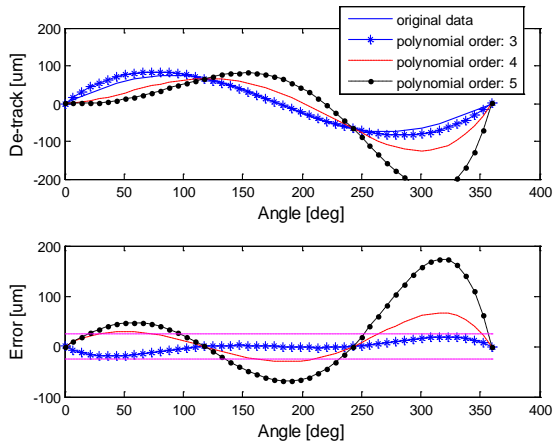


Fig.4 Estimated de-track and error (patterns: 3, 150um de-track)

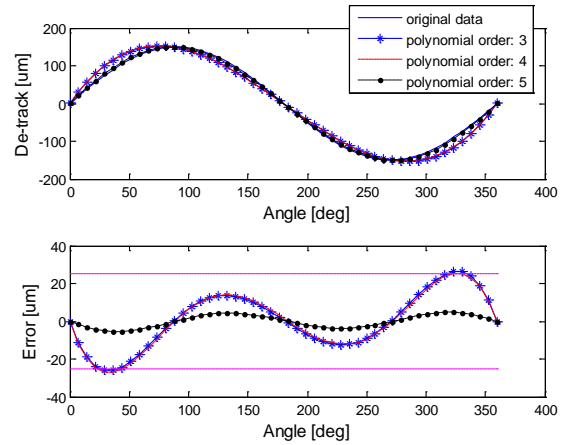


Fig.7 Estimated de-track and error (patterns: 4)

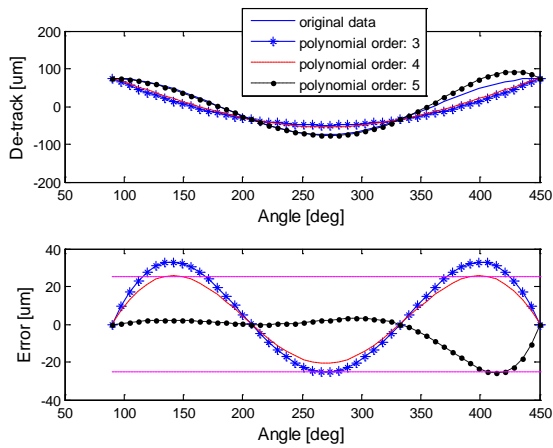


Fig.5 Estimated de-track and error (patterns: 3, 90 degree delay, 150um de-track)

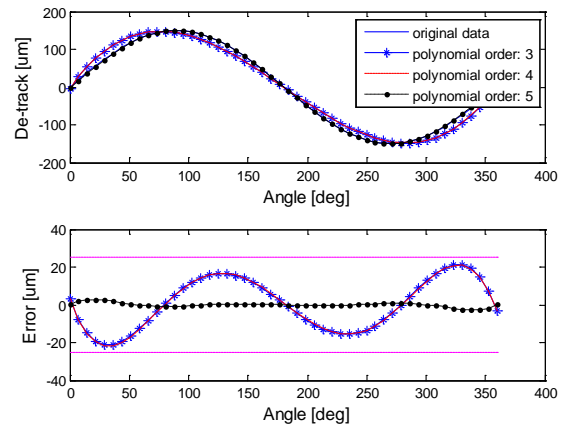


Fig. 8 Estimated de-track and error (patterns: 6)

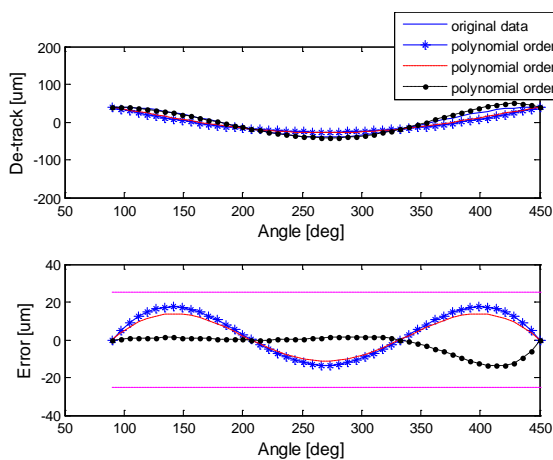


Fig.6 Estimated de-track and error (patterns: 3, 90 degree delay, 80um de-track)

#### 4.2 0-360 degree 위상변화에 따른 추정정밀도 분석

앞서 언급하였듯이 편심량과 방향은 디스크 탈착시 마다 바뀌게 된다. 따라서 측정위치와 편심 디스크 간의 위상 변화에 상관없이 트랙오차를 정확히 추정할 수 있어야 한다. Fig.4 와 Fig.5 를 보면 위상차이에 따라 추정정밀도가 달라짐을 알 수 있다. 따라서 모든 위상에 대한 추정정밀도를 고찰해야 한다. 이를 바탕으로 최적화된 패턴의 개수와 적합도 함수의 차수가 제안되어야 한다.

따라서 이를 분석하기 위해서 각각의 위상변화와 패턴의 개수, 적합도 함수의 차수에 의해 추정된 커브의 오차데이터 내에서 최대 오차 값만을 도시하였다. (해당 오차데이터에서 가장 큰 값이 트랙오차 마진을 넘지 않는 것을 확인하면 추정된 트랙오차 커브의 오차가 마진 안에 존재함을 확인할 수 있다.) 시뮬레이션 결과 120 degree 간격의 3개의 패턴으로는 적합도 함수의 차수와 상관없이

모든 위상차이에 대한 추정오차를 마진을 벗어난다 (Fig.9). 90° 도 간격의 4 개의 패턴으로는 4.5 차의 적합도 함수를 이용하여 트랙오차 마진 내에서 트랙오차를 추정해 낼 수 있다 (Fig.10).

4 차의 적합도 함수와 4 개의 패턴을 이용해 15um 오차 내에서 트랙오차를 추정할 수 있었고, 6 차의 적합도 함수와 6 개의 패턴을 이용해 1.5um 오차 내에서 트랙오차를 추정 할 수 있음을 확인하였다 (Fig.11). 일반적으로 패턴의 개수가 많을 수록 정확하게 트랙오차를 추정해 낼 수 있지만 기록밀도를 생각한다면 4 개의 패턴을 이용해서 트랙오차 마진 내에서 트랙오차를 추정하는 것이 가장 효율적이라고 할 수 있다.

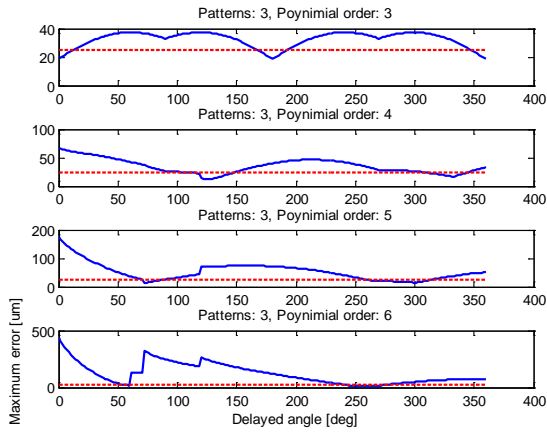


Fig.9 Maximum estimated errors according to the delayed angle (patterns: 3)

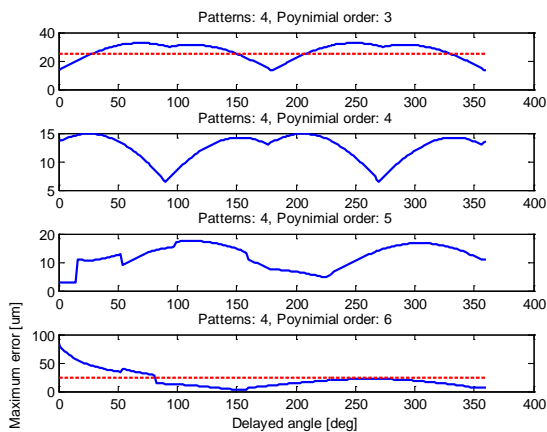


Fig.10 Maximum estimated errors according to the delayed angle (patterns: 4)

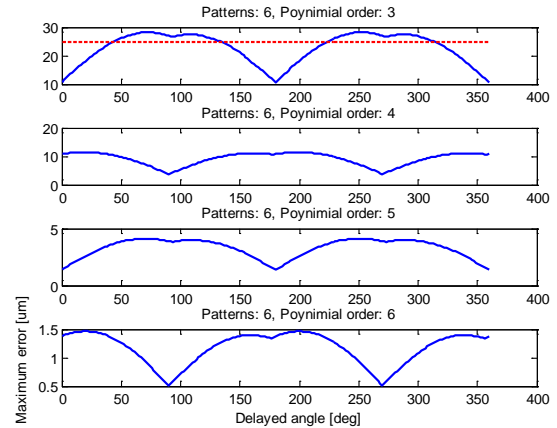


Fig.11 Maximum estimated errors according to the delayed angle (patterns: 6)

## 5. 결론

본 연구에서 최소제곱평균 추정기법을 이용해서 패턴간격을 최적화 함으로서 트랙오차를 생성하기 위한 패턴을 최소화 함으로서 패턴으로 인한 기록 밀도의 감소를 최소화 할 수 있음을 확인하였다. 또한 트랙오차 뿐만 아니라, 포커스오차 및 틸트도 정확하게 추정할 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

"이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0001013)."

## 참고문헌

- [1] Hans J.Coufal, Demetri Psaltis and Glen T. Sincerbox, 2000 " Holographic Data Storage", Springer
- [2] Sung-Yong Lim, Nakyeong Kim, Kyuil Jung, Jae-Seong Lee, and Hyunseok Yang, et al., 2009 "Tracking Servo Method for Holographic Data Storage Using Discrete Pre-patterns", Microsystem Technologies, Vol. 18, pp. 1711~1717
- [3] Alan Hoskins, Brad Sissom, Friso Schlottau, Edeline Fotheringham, Kevin Curtis, 2007, "Tolerances of a page-based holographic data storage system", Proc. of SPIE Vol. 6620 66203-4
- [4] Burden, Faires, "Numerical Analysis", 6<sup>th</sup> edition, Scitech media