

근접장 광기록 헤드의 광학적 성능 평가와 정렬 오차에 대한 간섭 무늬 패턴 분석에 대한 연구

윤형길[#], 권대갑^{*}, 이준희^{*}, 정재화^{*}, 오형렬^{**}

A Study on the Evaluation of the Optical Head of a Near-field Optical Recording System and Interference Pattern Analysis

Hyoung Kil Yoon[#], Dae Gab Gweon^{*}, Jun Hee Lee^{*}, Jae Hwa Jung^{*}, Hyung Ryeol Oh^{**}

ABSTRACT

Optical performance evaluation results and an interference fringe pattern analysis of alignment errors for an optical head of a near-field recording (NFR) system are presented. The focusing unit is an optical head of a NFR system and is composed of a solid immersion lens (SIL) and an objective lens (OL). Generally, the size of the focusing unit is smaller than that of the conventional optical recording head. Hence there are difficulties to assemble the small focusing unit precisely. We composed an evaluation system with an interferometer and evaluated some focusing unit samples aligned and assembled by manual and present the obtained results. Using the conventional optical tool, CodeV, a tolerance analysis of the alignment error between the SIL and the objective lens and an interference pattern analysis for the assembly error are executed. Then, through an analysis of the simulation results, the conceptual auto-alignment methodology using a neural network approach is considered.

Key Words : interference pattern analysis(간섭 패턴 분석), near-field recording(근접장 기록), optical pick up head assembly(광픽업 헤드 조립), auto-alignment method(자동 정렬)

1. 서론

최근 정보 산업의 고속 성장에 따라 고밀도 대용량 광기록 저장 장치에 대한 요구가 증가하게 되었다. 대표적인 예로, 기존의 CD 나 DVD 에서는 대부분 단일 대물렌즈(objective lens, OL)를 이용하여 초점을 형성한다. 이때 회절 한계로 인해서 형

성되는 초점은 집광에 사용되는 레이저의 파장 이하 보다는 작아질 수 없고 이에 따라 기록 밀도나 저장 용량에 한계가 생긴다. 이를 극복하고자 근래에는 청색 레이저를 이용한 광기록 저장 장치의 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2}

더불어, 근접장 기록 방식을 이용한 기술이 기존의 회절 한계를 극복하는 방법으로써 광 정보 저장 장치 분야에서 연구가 활발히 진행되고 있

접수일: 2004 년 04 월 14 일; 게재승인일: 2005 년 02 월 18 일

[#] 교신저자: 한국과학기술원 기계공학과 NOM 연구실

E-mail lestle@lgc.com Tel. (02) 526-4538

^{*} 한국과학기술원 기계공학과

^{**} (주) Hysonic, 한양대학교 안산캠퍼스 내

다.^{3,4} 근접장 기록 방식은 높은 굴절률($n \approx 2$)의 광학계를 이용하여 파장 이하의 초점 크기를 형성하고 이를 이용하여 정보를 기록 및 관독하는 방식이다.⁵ 이러한 근접장 원리를 이용한 정보 저장기는 그 크기에 있어서 휴대용 기기에 적합하도록 점점 작아지고 있는 추세이다.⁶

이에 따라 핵심부분인 광학 헤드의 크기도 소형화되고 있는데, 작은 크기의 광학 헤드를 구성하는 부품들 혹은 그것들의 조립상태에 대한 광학적 성능 평가 및 분석이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 근접장 정보저장 기기용 소형 광학헤드에 대해서 성능 평가를 실시하고 그에 따른 분석을 수행하였다.

2. FU의 광학 성능 평가

2.1 FU의 조립문제

근접장 정보저장 기기의 광학 헤드, 즉 FU(focusing unit)은 대물렌즈와 굴절률이 2 정도되는 재질의 SIL(solid immersion lens)로 구성되기도 한다. SIL을 사용함으로써 FU의 광학 개구수(numerical aperture, N.A.)는 1보다 큰 값을 갖게 되어 파장보다 작은 크기의 초점 형성이 가능하다.⁷

$$d \approx \lambda / n \sin \theta_{\max} = \lambda / N.A. \quad (1)$$

$$\delta \approx \lambda / (n \sin \theta_{\max})^2 = \lambda / (N.A.)^2 \quad (2)$$

여기서 d 는 초점의 크기, λ 는 파장, n 은 굴절률 δ 는 초점심도, θ 는 입사각이다. 대물렌즈를 통과한 빛이 정확히 SIL의 바닥면 중앙에서 초점이 형성되도록 해야 근접장의 효과를 얻을 수 있는데, 휴대용 기기에 사용하려면 광학 부품들의 크기가 상당히 작아야 한다. 따라서 불과 수 mm 크기의 대물렌즈와 SIL을 잘 정렬하고 조립해야 FU의 광학적 성능이 보장될 수 있다.⁸

식(2)에서, 개구수가 커짐에 따라 초점심도가 작아지므로 FU에 있어서 대물렌즈와 SIL 사이에 광축 방향으로 정렬 허용 공차가 작아짐을 알 수 있다.

2.2 FU 샘플의 성능 평가

본 논문에서는 광학적 성능 평가를 위해 수작업으로 정렬 및 조립된 FU 샘플을 가지고 평가 작

업을 수행하였다.

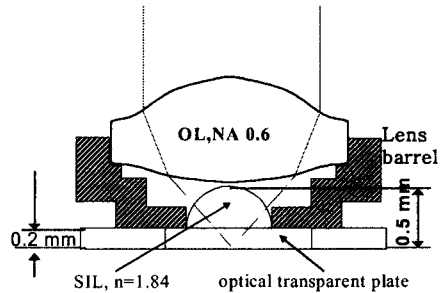


Fig. 1 Cross-section view of FU.

Fig. 1은 FU의 단면 모습이다. 대물렌즈는 개구수 0.6이고 직경은 2.2mm, SIL은 반구형태의 반지름 0.5mm의 렌즈이다. 경통에 의하여 조립이 되며 입사하는 빛은 SIL의 바닥면에 초점을 맺게 된다.

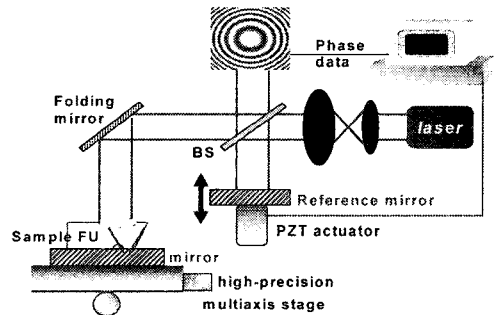


Fig. 2 Schematic diagram of evaluation system.

Fig. 2는 평가 시스템의 schematic diagram이다. Twyman-Green 간섭계와 Bucket algorithm의 위상천이(phase-shifting) 방법을 이용하여 평가하였다.⁹

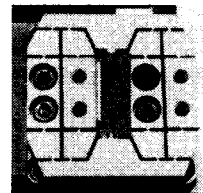


Fig. 3 Non-parasitic motion hinge stage

위상천이를 하기 위해서 Fig. 3과 같은 힌지 구조의 스테이지를 사용하였다. 초기광축 정렬 후 측정된 파면수차 값은 0.009λ이다. 이때 FU

샘플을 얻고 측정된 결과 값은 0.094λ 로 일반적인 광학헤드에 있어서의 파면수차 기준인 0.03λ 보다 큰 값을 나타냈다.

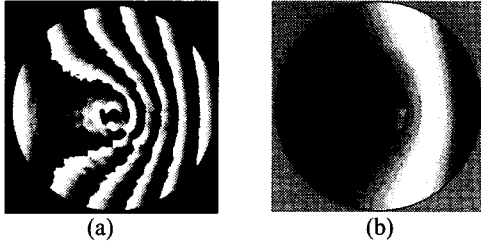


Fig. 4 Evaluation result of FU sample (a) phase map (b) unwrapped map.

Fig. 4 는 측정 결과이다. 여러 개의 샘플을 측정하였지만 대부분 기준치 보다 큰 파면 수차를 나타내었다. 이러한 결과를 살펴봤을 때, 아주 작은 사이즈의, 다군 렌즈의 광학 헤드에 정렬 및 조립하는 데 있어서 수작업에는 한계가 있음을 알 수가 있다.

3. FU 의 오차 및 민감도 분석

3.1 FU 의 광학적 모델링

앞서 기술한 정렬 및 조립에 관한 오차 문제를 분석하기 위해 상용화된 시뮬레이터(CodeV)를 이용하여 FU 를 모델링 하고 민감도 분석을 실시하였다.

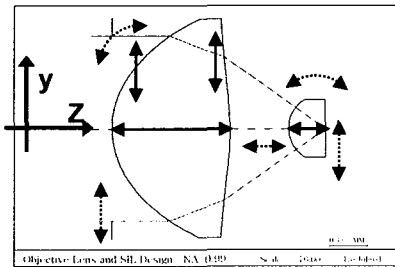


Fig. 5 New FU modeling and error components

Fig. 5 는 위 평가실험에 사용된 FU 와 같은 광학적 성능을 가지고 크기가 커진 새로운 FU 이다. 추후 과제로 본 논문에서 진행된 분석 결과를 이

용하여 작은 광학 헤드에 대한 정렬 자동화에 대한 실험적 검증을 위하여 다루기 쉽도록 큰 사이즈의 FU 를 새로이 설계하였다. 실선으로 표시된 것이 가공 오차의 종류고 점선으로 표시된 것은 조립(정렬) 오차의 종류이다. 광축(defocus, z) 방향 오차와 횡방향(decenter, x,y) 오차, 틀어짐(tilt, x,y)오차의 3 가지 종류(5 축)가 정렬오차이다.

Table 1 FU specification comparison

	Old FU	New FU
OL Clear Aperture	1.6 mm	5.252 mm
SIL 직경	1.0 mm	2.0 mm
OL n	1.487 (PMMA)	1.745 (PVC81)
SIL n	1.84 (LAH71)	1.84 (LAH71)
OL 두께	1.014	3.2
Total NA	1.1	1.1

Table 1 은 새로 설계된 FU 와 원래의 FU 의 사양 비교표 이다. 크기가 커졌지만 전체 광학적 성능은 개구수 1.1 로 같은 성능을 가진다.

3.2 오차 민감도 분석

새로운 FU 에 대하여 앞서 설명한 오차 성분들에 대하여 민감도 분석을 실시하였다.

Table 2 Sensitivity analysis result for assembly errors

Error elements	Tolerance limit (Wavefront error< 0.03λ RMS)	
FU tilt	$\pm 1.3^\circ$	Assembly error
SIL tilt	$\pm 2.4^\circ$	Assembly error
OL tilt	$\pm 1.1^\circ$	Assembly error
SIL Decenter	$\pm 2.1 \mu\text{m}$	Assembly error
OL Decenter	$\pm 2.1 \mu\text{m}$	Assembly error
Defocus	$\pm 0.35 \mu\text{m}$	Assembly error

Table 2 는 조립 오차 성분들에 대한 민감도 분석결과이다. 본 논문에서는 정렬 및 조립 문제에 관심을 두고 있으므로 가공오차는 고려는 제외한다. 값을 살펴보면 defocus 오차가 가장 민감한 것을 알 수가 있는데 이는 초점심도가 짧은 근접장 정보저장 기기용 작은 광학 헤드의 특성과도 관계가 깊다. 따라서 그만큼 정렬 및 조립에 있어서 쉽지 않음을 알 수가 있다.

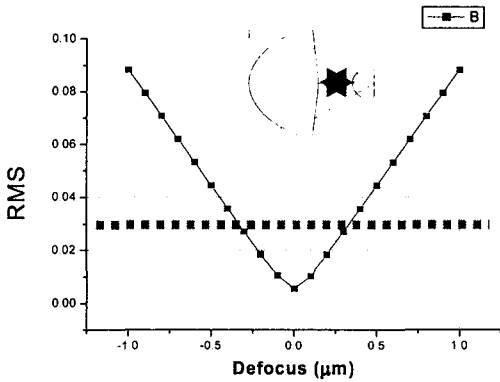


Fig. 6 Wavefront RMS VS errors (a) defocus

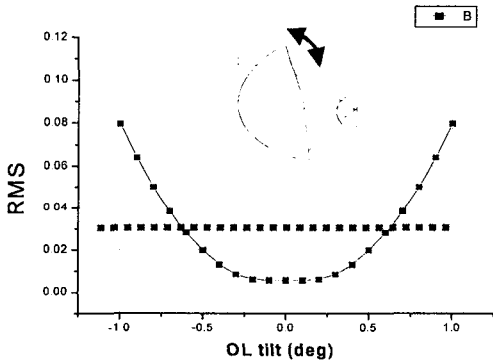


Fig. 6 Wavefront RMS VS errors (b) OL tilt

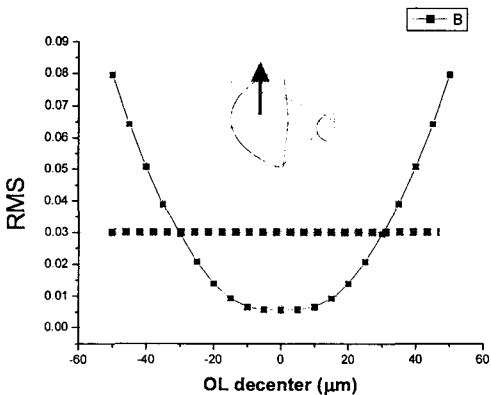


Fig. 6 Wavefront RMS VS errors (c) OL decenter

Fig. 6 은 여러 조립 오차 중에서 대표적으로 defocus 오차와 대물렌즈의 decenter, tilt 오차에 대한 파면수차의 그래프이다. 0.03λ 값을 기준으로 이 값을 넘지 않는 오차 값을 확인함으로써 허용 가능한 오차 범위가 정해진다. SIL 과 대물렌즈 사이에

decenter 오차는 상대성이 존재하는 것을 결과값에서 확인할 수 있었다. 따라서 이와 같은 일련의 민감도 분석 결과를 바탕으로, 추후 실험적으로 정렬 자동화를 검증하기 위해서는 defocus, 대물렌즈의 decenter, tilt 오차를 정렬 변수로 선택할 수 있을 것이다.

4. 조립 오차의 간섭무늬 분석

4.1 시스템 모델링과 간섭 패턴 분석

2 장에서 사용된 FU 의 광학적 성능을 평가하는 간섭시스템을 CodeV 를 이용하여 모델링 하였다.

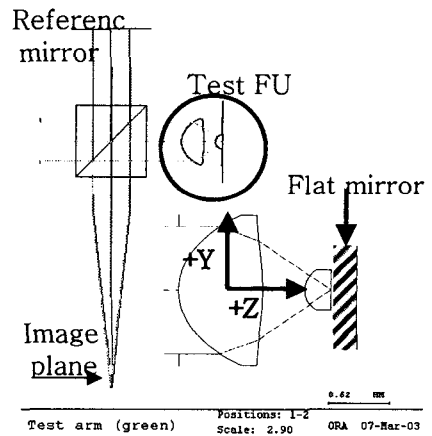


Fig. 7 Optical modeling of evaluation system

Fig. 7 은 실제 FU 평가 시스템(Twyman-Green 간섭계) 모델링 한 것인데, 이때 기준 거울에 반사된 빛과 측정 FU 바닥 면에서 반사된 빛은 상면에서 간섭 무늬를 형성하게 된다. 이때 형성된 간섭무늬는 FU 의 조립 및 정렬 상태에 따라 여러 가지 왜곡된 형상을 가지게 되는데 이것을 분석하면 FU 에 대한 정렬 상태를 알 수가 있다.



Fig. 8 Initial pattern (a) without FU (b) with FU

Fig. 8 은 초기 광축 정렬된 상태에서의 시물래이션 결과이다. (a)는 FU가 없는 상태에서 파면수차 0λ를 가지며, (b)는 오차가 없는 FU가 존재할 때 중앙 부위에 아주 미세한 왜곡이 있고 파면수차 0.00783λ를 가진다. 즉, FU에 아무런 오차가 존재하지 않는 상태에서 FU는 위와 같은 작은 파면수차 값을 갖게 된다. 이와 같은 상황에서 인위적으로 오차를 발생시키고 그에 따른 간섭무늬의 결과를 살펴보았다.

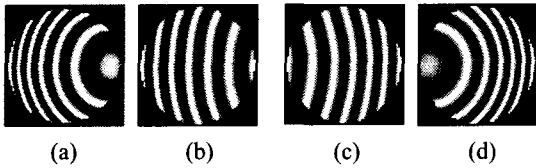


Fig. 9 Interference patterns of defocus error (a) -3 (b) -2 (c) 2 (d) 3 μm.

Fig. 9는 defocus 오차에 따른 간섭 무늬의 변화이다. 결과에서 알 수 있듯이 defocus 오차는 동심원의 특성을 가지며 오차가 커질수록 무늬의 개수가 많아지며 중심부가 횡방향으로 이동하는 것을 알 수가 있다. 이때 패턴의 중심부는 곡률이 있는 무늬들의 중심부를 의미한다.

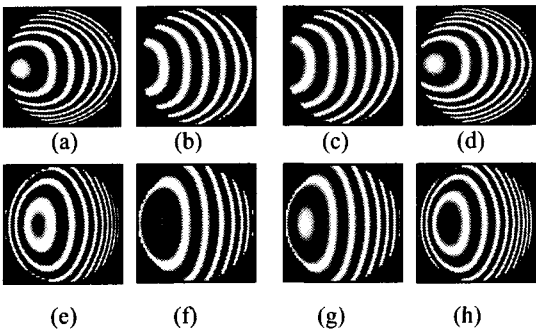


Fig. 10 Interference patterns of tilt x and tilt y errors (a) -3 (b) -2 (c) 2 (d) 38 in vx, (e) -3 (f) -2 (g) 2 (h) 38 in vy

Fig. 10은 대물렌즈의 tilt 오차에 대한 결과이다. 타원성의 무늬특성을 갖고, x 방향으로서는 가로의 타원성, y 방향으로서는 세로의 타원성을 갖는다. 또한

중심부는 역시 횡방향으로 이동하는 것을 확인할 수가 있다. 다음으로는 대물렌즈의 decenter 오차에 대한 결과를 살펴보았다.

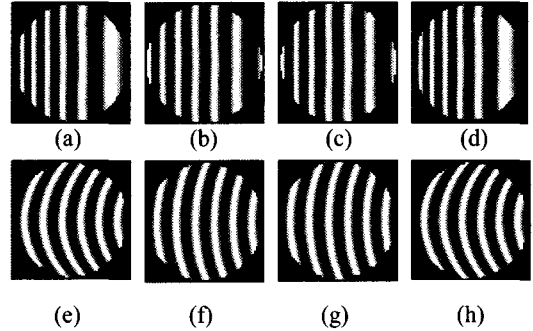


Fig. 11 Interference patterns for decenter x and decenter y errors (a) -70 (b) -50 (c) 50 (d) 70μm in x, (e) -70 (f) -50 (g) 50 (h) 70μm in y.

위에서 보는 바와 같이, decenter 오차는 쌍곡선의 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. x 방향과 y 방향이 다른 이유는 초기 기준거울에 약간의 틀어짐이 있다고 가정하였기 때문이다. 이는 실험상 황과 같은 것으로 간섭계를 이용한 평가기의 대부분이 기준거울에 약간의 틀어짐(tilt)을 준 상태에서 평가를 하기 때문이다. 대물렌즈의 tilt 오차와는 다르게 오차가 어느 정도 발생하더라도 간섭 무늬의 왜곡은 크게 발생하지 않는 것을 알 수가 있는데 이는 앞서 기술한 민감도 분석과 연관이 된다. 즉, defocus 오차가 가장 민감한 오차였고, decenter 오차가 가장 덜 민감한 오차이기 때문이다.

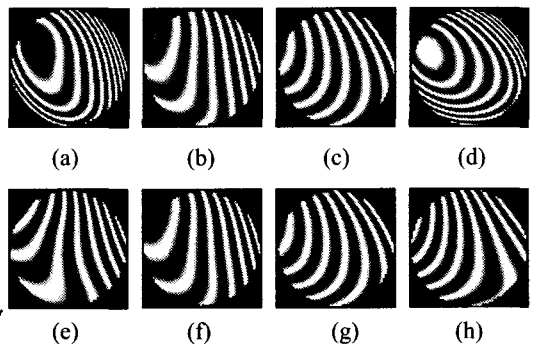


Fig. 12 Interference patterns of combined errors. First,

the tilt effect in the presence of defocus 1 μ m and decenter x 45 μ m, decenter y -45 μ m (a) -2, 2 (b) -1, 1 (c) 1, -1 (d) 28, -28 in vx, vy, and second, decenter effect in the presence of defocus 1 μ m and tilt x 18, tilt y -18 (e) -60, 60 (f) -45, 45 (g) 45, -45 (h) 60 μ m, -60 μ m in xy.

Fig. 12 는 위의 3 가지 오차가 모두 존재할 때의 간섭 무늬이다. defocus 오차와 대물렌즈의 tilt, decenter 오차가 복합적으로 발생하여 FU 에 존재하게 되면 위와 같은 아주 비선형적이고 복잡한 형상의 간섭 무늬가 나타남을 확인할 수가 있다. 이렇듯, 각각의 개별적인 오차들은 간섭 무늬에 있어서 어느 정도 일정한 무늬 특성을 가지는 경향이 있어, 오차가 많고 적음에 따라 패턴의 경향을 미리 예측할 수가 있다.

즉, 오차들이 독립적으로 존재할 때는 경향성 있는 패턴이 발생하지만 복합적으로 존재할 때는 비선형적이고 우연한 패턴을 가지게 된다.

4.2 정렬 자동화 방법론

위에 언급한 대로 오차들이 복합적으로 존재할 때, 충분한 간섭 무늬 패턴 분석을 실시하고 수집한 간섭 무늬 패턴 데이터들로부터 적절한 특징(feature)을 추출할 수 있다면 신경회로망을 이용하여 간섭 패턴 인식이 가능할 것이다.¹⁰

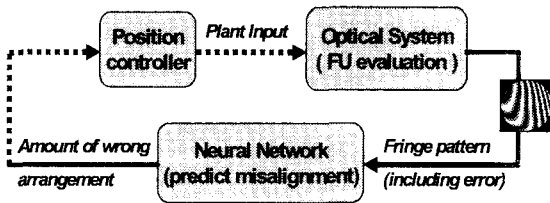


Fig. 13 Schematic block diagram of the auto-alignment system using the neural network

Fig. 13 은 신경회로망을 이용한 정렬 자동화 시스템의 schematic diagram 이다. 평가 시스템으로부터 FU 의 평가 결과인 간섭 무늬가 발생되면 이것으로부터 특징 점들을 추출하여 학습이 완료된 신경회로망에 입력하면 출력값으로 FU 의 오정렬 상태에 대한 오차 정보를 출력하고 이를 위치 제어

시스템과 초정밀 스테이지를 이용하여 다시 정렬을 하게 된다. 이러한 방법을 반복하면 결국 대물렌즈와 SIL 사이의 오차가 최소화되는 방향으로 정렬을 하게 된다.

4.1 에서 수행한 간섭무늬 분석 결과들을 살펴보면, 오차가 발생하여 간섭 패턴에 왜곡이 생기면 중심부가 어느 한쪽으로 치우치는 것을 알 수가 있다. 즉, 횡방향이나 종방향 혹은 각각 대각선 방향으로 중심부의 이동이 발생하게 되는데, 이는 간섭 무늬 안에서 영역별로 강도(intensity)분포의 차가 발생한다는 것을 의미한다.

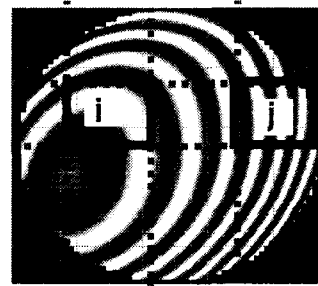


Fig. 14 Example of the feature in fringe pattern

Fig. 14 를 보면, 간섭 무늬를 회색이미지(gray image)로 변환하면 각각의 픽셀 값은 0 에서 255 사이 값을 가지게 된다. 이때, i 영역과 j 영역을 비교해보면 밝은 부분이 많은 i 영역내의 픽셀 값의 합이 j 영역의 픽셀 값의 합보다 크다.

$$S_i (= \sum_i Pixel\ value) \gg S_j (= \sum_j Pixel\ value) \quad (3)$$

즉, 중심부위의 치우침으로 인해서 영역 별로 강도분포의 변화가 생긴 것이다. 따라서 하나의 간섭 무늬 이미지를 m 개의 영역으로 나누고 각각의 영역내의 픽셀 값의 합을 S 라 하면,

$$feature\ vector = [S_1, S_2, \dots, S_m] \quad (4)$$

와 같이 특징 벡터를 구할 수 있다.

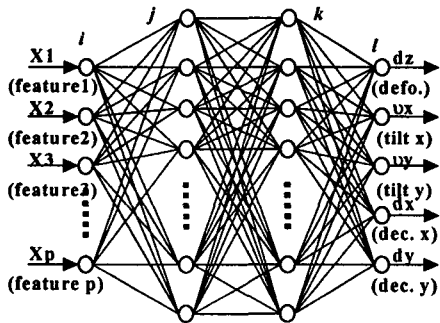


Fig. 15 Example of neural network structure

Fig. 15 는 식(4)의 특징 벡터 값을 입력으로 하는 신경회로망의 예이다. 이와 같이 다층 구조의 신경회로망을 구성하여 출력 값을 알고자 하는 오차 값으로 정하고 신경회로망을 학습시키면 학습이 완료된 회로망을 이용하여 Fig. 13 에서 언급된 정렬 자동화를 수행할 수가 있을 것이다.

신경회로망을 학습 시키기 위한 수정 보완된, 적절한 특징 점들을 추출하는 것과 적합한 학습 알고리즘의 선정, 그리고 그에 따른 학습과정 및 결과는 추후 논문에 다시 언급할 것이다. 또한 이를 바탕으로 실제 정렬 자동화 시스템을 구성하여 실험적으로 검증하는 작업이 아울러서 진행될 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 초소형 정보저장 기기에 활용될 근접장 광학 헤드(FU)의 정렬 및 조립에 관한 내용을 언급하였다. 수작업으로 조립된 FU 샘플의 광학적 성능 평가를 통해서 작은 크기의 FU의 정렬과 조립의 문제를 인식하고 FU에 존재하는 오차들에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 더불어 평가 시스템을 광학적으로 모델링 하고 FU의 오차에 따른 간섭 무늬 패턴을 분석하여 이를 이용한 정렬 자동화 방법론을 제안하였다. 추후 과제는 이에 대한 모의실험과 제안된 방법론을 실험적으로 검증하는 일일 것이다.

참고문헌

1. Itonaga, M., Chaen, S., Nakano, E., Nakamura, H. and Ito, F., "Optical Disk System using a High-numerical Aperture Single Objective Lens and a Blue LD," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, pp. 978-979, 2000.
2. Takada, K., Hashimura, J., Ori, Y. and Mushiake, N., "Blu-ray Disc/DVD Compatible Objective Lens Assembly," ISOM2003, pp. 230-231, 2003.
3. Terris, B.D., Mamin, H.J., Rugar, D., Studenmund, W.R. and Kino, G. S., "Near-filed Optical Data Storage using a Solid Immersion Lens," Appl. Phys. Lett., Vol. 65, pp. 388-390, 1994
4. Terris, B.D., Mamin, H. J. and Rugar D., "Near-field Optical Data Storage," Appl. Phys. Lett., Vol. 68, pp. 141-143, 1996.
5. Betzig, E., Trautman, J.K, Wolfe, R., Gyorgy, E.M and Finn, P.L., "Near-filed Magneto-Optics and High Density Data Storage," Appl. Phys. Lett., Vol. 61, pp. 142-144, 1992.
6. Kim, S.K., Park, J.M., Park, G.S., Lee, J.K., Lee, J.G., Jung, H.W. and Kim, J.Y., "An Optical Flying Head Assembly for A Small Form Factor Plastic Disk in the PCMCIA like Drive," ISOM2003, pp. 226-227, 2003.
7. Mansfield, S.M., Studenmund, W.R., Kino, G.S. and Osato, K., "High-numerical-aperture Lens System for Optical Storage," Opt. Lett., Vol. 18, pp. 305-307, 1993.
8. Hendriks, B.H.W., "Optical Tolerances of an Actively Tilted High-numerical-aperture Two-lens Objective for Optical recording," Appl. Opt., Vol. 37, pp. 8195-8205, 1998.
9. Malacara, D., "Phase shifting interferometry," Chap. 14 in Optical shop testing, Jhon Wiley & Sons, Inc., NY, pp. 502-533, 1991.
10. Bishop, C.M., "Neural Networks for pattern recognition," Clarendon press, Oxford, 1995.