

실험계획법을 이용한 6축 힘/토크 센서의 설계

Design of a Six-axis Force/Torque Sensor by Using Design of Experiment method

*천세준¹, 김경환², #정재화³

*Sejun Chun¹, Kyoungwhan Kim², #Jaehwa Jeong (jaehwa@korea.ac.kr)³

¹ 고려대학교 대학원 제어계측공학과, ² NT 리서치, ³ 고려대학교 제어계측공학과

Key words : 6-axis Force/Torque sensor, Design of Experiments, Finite element method, Strain gage assembly error

1. 서론

6축 힘/토크 센서(힘/토크센서)은 3축의 힘과 3축의 토크를 측정하는 센서로 현재 힘제어 방식의 로봇에 필수적인 센서로 대두되고 있다. 특히 로봇을 이용한 정밀부품 시 발생하는 조립불량 현상을 해결방안이나 HapHCI(Haptic based human-computer interaction)에 활용될 수 있다.

힘/토크 센서는 외부의 힘이 인가되는 하중부, 하중부에 전달된 힘/토크를 감지하기 위한 감지부, 그리고 감지부에 부착된 스트레인 게이지로 스트레인 값을 전기적인 신호로 변환하고, 온도 등의 영향을 보상하는 보상회로로 구성되어 있다.[1]

6축 힘/토크 센서는 크게 세 종류로 분류가 되는데 스트레인 게이지를 이용한 방법, 압전체를 이용한 방법, 그리고 LVDT를 사용하여 스튜어트 플랫폼기구를 이용하는 방법이 있다. 스트레인 게이지를 이용하는 방법은 스튜어트 플랫폼 기구보다 감지부의 구조가 간단하며, 일체화된 구조로 제작할 수 있으며, 압전체 소자를 이용한 센서에 비해 선형성이 좋다.[2]

6축 힘/토크 센서를 설계에 있어 가장 중요한 것은 감지부의 구조이다. 감지부는 임의의 축으로 힘 또는 토크를 인가하였을 때 해당 축이 아닌 다른 축의 힘 성분이 감지되는 상호간섭 오차가 최소화되도록 설계되어야 한다.

그러나 감지부가 이상적으로 설계되더라도 스트레인 게이지가 정확한 위치에 장착되지 않으면, 각 방향으로 설계치와 다른 출력 값이 나오거나 상호간섭 오차가 발생하게 된다.[3]

현재 힘/토크 센서에 스트레인 게이지를 붙이는 작업은 수작업에 의존하고 열경화성 접착제로 부착하는 경우가 많아 경화과정에서 이러한 조립 오차가 유발될 가능성이 매우 크다.

따라서 본 논문에서는 실험계획법을 이용하여 힘/토크 센서를 설계하고 스트레인 게이지 부착 시 발생하는 오차를 제어 인자에 포함시켜, 다른 제어인자와 비교하여, 각 축의 민감도에 영향을 분석하고자 한다.

2. F/T 센서의 구조

Fig.1은 힘/토크 센서의 구조 및 스트레인 게이지 위치를 나타낸다. 현재 힘/토크 센서는 4보로 구성되었으며, Fx, Fy 그리고 Fz의 스트레인 값을 증가시키기 위해서 Leaf spring을 사용하였다. 힘/토크 센서의 재질은 Al2024이다.

설계될 힘/토크 센서는 총 24개의 스트레인 게이지를 사용하며, Fx, Fz는 200N, Fy는 400N, Mx, My, Mz는 10N·m의 정격용량을 가지는 센서이다. 4개의 스트레인 게이지를 브릿지 회로로 구성되며 압축력과 인장력이 발생하는 부분에 스트레인 게이지를 부착한다. 다음은 각 축의 출력에 대한 식은 식(1)과 같다.

U_{F_x}, \dots, U_{T_z} 는 각 방향의 출력에 대한 값이며 $K_i(i=1, \dots, 6)$ 은 개인 상수이다. $S_i(i=1, \dots, 24)$ 는 각 스트레인 게이지의 출력값을 의미하며, 압축력은 '-'로, 인장력은 '+'로 표기되었다.

$$\begin{bmatrix} U_{F_x} \\ U_{F_y} \\ U_{F_z} \\ U_{M_x} \\ U_{M_y} \\ U_{M_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1(s_{11} + s_{22} - s_{12} - s_{21}) \\ K_2(s_6 + s_{17} - s_5 - s_{18}) \\ K_3(s_2 + s_{16} - s_1 - s_{15}) \\ K_4(s_8 + s_{19} - s_7 - s_{20}) \\ K_5(s_3 + s_{14} - s_4 - s_{13}) \\ K_6(s_{24} + s_{10} - s_{23} - s_9) \end{bmatrix} \quad (1)$$

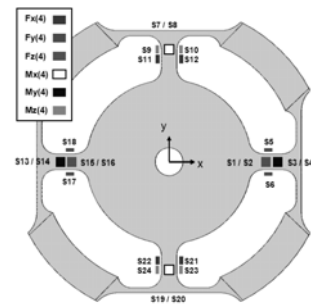


Fig.1 Position of Strain gage for Force/Torque Sensor

3. FT 센서의 설계

3.1 유한요소법

모델은 8절점 3차원 블록요소를 사용하였으며, 총 절점 수는 30244개이며, 총 요소 수는 29714개이다. 대각선에 위치한 고정부의 상하면을 고정하였으며, 중심부에 6개의 절점에 힘을 가하여, 200N, 400N의 힘과 10N·m의 토크를 발생시켰다. Fig.2는 힘 Fz를 인가했을 경우 스트레인 해석이다.

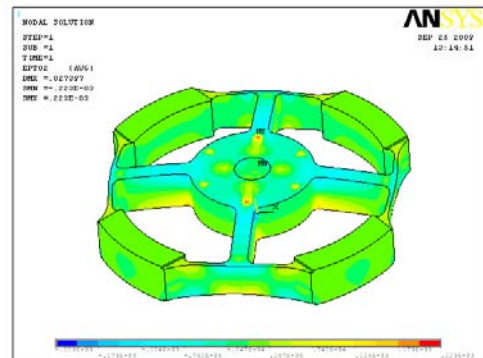


Fig.2 Strain Analysis result of Force/Torque Sensor (Fz)

3.2 실험계획법

설계 인자들의 각 축 방향 민감도(sensitivity)에 미치는 영향을 체계적으로 분석하기 위하여 실험계획법을 사용하였다. 실험의 결과는 유한요소해석의 결과를 이용하였으며, 총 6개의 제어인자를 설정하였다.(Table.1) 제어인자 중 4개는 설계변수이며, 2개는 스트레인 게이지 부착 시 발생하는 에어로 X축 이동과 Y축 이동으로 설정하였다. Fig.3에서 보듯이 보의 폭(C), Leaf spring의 두께(D), 길이(E), 두께(F)가 설계변수로 선정되었다.

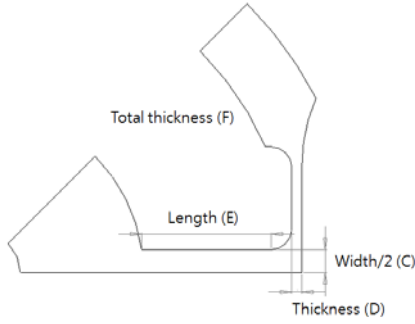


Fig.3 Geometric factor of Force/Torque Sensor

A 의 인자와 B 의 인자는 손으로 부착 시 발생하는 오차로 설정하였으며, C 인자의 1 수준은 스트레인 게이지의 폭 3.1mm 를 기준으로 하였다. D 와 F 의 인자 1 수준은 설계 목표인 항복응력의 1/4 을 넘지 않도록 설정하였다.

직교배열표는 L18 을 사용하였으며, 교호작용은 무시하였다. 각 축 방향 민감도는 크면 클수록 좋은 특성인 망대특성으로 설정하여 실험계획법을 수행하였다.

3.3 결과 분석

각 축에 대한 민감도를 보게 되면, 설계변수들 중에서는 폭(C)과 전체 두께(F)는 모든 축에 대해서 가장 크게 영향력이 있으며, Leaf spring 의 두께(D)는 Fx 와 Tz 에 대해서 영향력이 있는 반면에, Fz 와 Tx 에는 영향력이 거의 없는 것으로 나타났다. 보의 폭(C), 보의 길이(E) 그리고 전체 두께(F)는 모든 방향의 민감도에 비슷한 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

스트레인 게이지를 부착 시 발생하는 오차로 인한 각 축 당 민감도의 영향력을 보게 되면, X 축 방향의 이동오차(A)가 Y 축 방향의 이동오차(B)보다 영향력이 큰 것으로 나타났다. 또 스트레인 게이지의 조립오차는 설계인자들에 비해 영향력이 적은 것으로 나타났다.

5. 결론

스트레인 게이지 부착 시 오차는 Y 축 이동에서는 거의 영향력이 없었지만, X 축 이동은 ±0.2mm 로 움직일 경우에 각 축의 민감도 부분에서 10~15 μm/m 영향력이 있음을 알 수 있다. Table.2 은 초기 설계인자와 각 방향 민감도가 최대화된 설계인자를 나타낸 것이다. Table.3 에서 보듯이 민감도가 최대화된 힘/토크 센서의 출력은 기존 힘/토크 센서의 출력에 비해 각 축으로 측정되는 스트레인 값이 2 배 가량 증가함을 알 수 있다. 본 연구는 민감도만을 고려한 설계를 수행한 것으로써 추후 상호간섭오차를 고려한 설계가 이루어질 예정이다.

Sort	Factor	Level 1	Level 2	Level 3
Control factor	A X translation error [mm]	-0.2	0	0.2
	B Y translation error [mm]	-0.2	0	0.2
	C Width [mm]	3.1	4	4.5
	D Thickness [mm]	0.8	0.9	1
	E Length [mm]	12	13	14
	F Total thickness [mm]	8.5	9	9.5

Table 1. Factors and Levels

Condition	A	B	C	D	E	F
	X Trans.	Y Trans.	Width	Thickness	Length	Total thickness
1 Initial condition	2	2	3	3	3	3
	(0 mm)	(0 mm)	(4.5 mm)	(1 mm)	(14 mm)	(9.5 mm)
2 Optimum condition	1	2	1	1	3	1
	(-0.2 mm)	(0 mm)	(3.1 mm)	(0.8 mm)	(14 mm)	(8.5 mm)

Table 2. Optimum condition

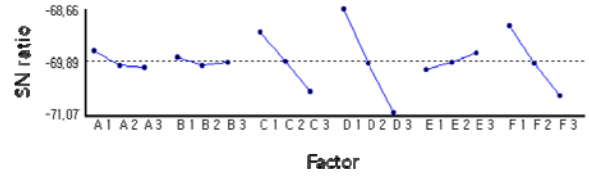


Fig.4 SN ratio (Fx Sensitivity)

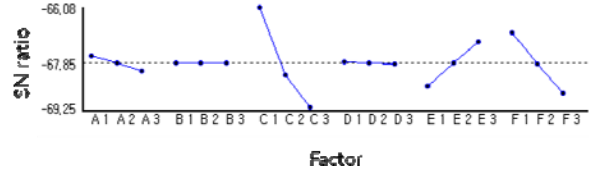


Fig.5 SN ratio (Fz Sensitivity)

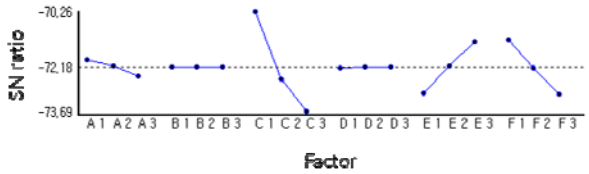


Fig.6 SN ratio (Tx Sensitivity)

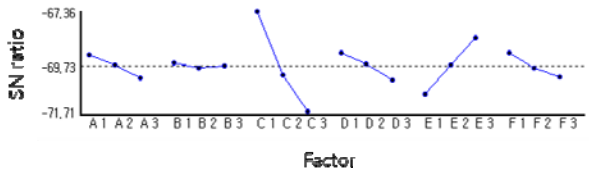


Fig.7 SN ratio (Tz Sensitivity)

	Fx_Strain	Fz_Strain	Tx_Strain	Tz_Strain
Initial condition	245 [um/m]	336 [um/m]	206 [um/m]	265 [um/m]
Optimum condition	466 [um/m]	618 [um/m]	389 [um/m]	597 [um/m]

Table 3. Optimum condition - Strain

후기

본 연구는 의료융합형 멀티모달 콘텐츠 및 시뮬레이션 기술 개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 강대임, 김갑순, 정수연, 주진원, “실험계획법을 이용한 쌍안경식 6 축 로드셀의 설계 및 상호간섭 오차 평가”, 대한기계학회논문집(A) 제 21 권 제 11 호, 1921~1930, 1997
2. 주진원, 나기수, 김갑순, “병렬관 구조를 이용한 소형 6 축 힘/토크센서의 설계 및 특성평가”, 대한기계학회논문집(A) 제 22 권 제 2 호, 352~364, 1998
3. 주진원, 김승환, 김갑순, 이경원, “VCR 주행장치의 2 축 플렌지 반력 측정장치 개발”, 대한기계학회논문집(A), 제 20 권, 제 7 호, 2213~2222, 1996