

증분형 엔코더를 이용한 로봇 관절의 절대위치 검출

Detection of Absolute Position of Robot Joint Using Incremental Encoders

임재식*, 이영진

(Jae Sik Lim^{1,*} and Young Jin Lee¹)

¹Autopwer Co., Ltd.

Abstract: This paper proposes an efficient detection of absolute position of a robot joint using two incremental encoders. We consider a robot joint comprising a motor, a reducer, two encoders, and a motor drive. An incremental(first) encoder provides motor's rotor position or input position of reducer while another incremental(second) encoder does output position of the reducer. A table is made where the relationship between the first and the second encoder counts is recorded. The key point is placed where the table is constructed: when a pulse occurs in the second encoder, there exists a corresponding unique count value of the first encoder. The absolute position is detected using the table by searching the second encoder position corresponding to the first encoder count value when a pulse occurs in the second encoder. The proposed method needs a small rotation, as just one second encoder's pulse angle, for the initial absolute position detection.

Keywords: incremental encoder, robot arm, absolute position, reducer

I. 서론

기존의 산업용 다관절로봇을 대체하여 인간과 같은 공간에서 함께 작업이 가능한 협업로봇에 대한 요구가 최근 대두되고 있다[1-3]. 협업로봇은 로봇과 사람의 경계를 구분하는 펜스를 없애는 새로운 개념의 로봇으로 인간이 가진 장점과 로봇이 가진 장점을 최대한 활용할 수 있다. 협업용 로봇은 기존의 산업용 로봇이 가지는 성능과 신뢰성에 더하여 케이블의 내재화와, 인간과 같이 작업을 하기 위한 안전기능이 요구된다. 아울러 산업에 적용하기 위해서는 가격적인 경쟁력이 요구된다.

이러한 형태의 로봇을 구현하기 위한 핵심은 로봇의 관절을 구성하는 구동모듈에 있다. 일반적인 산업용 로봇의 구동 모듈(관절)은 감속기, 서보 모터, 엔코더, 드라이브, 브레이크로 구성되어 있다. 모듈의 부품이 일체형으로 되어 있으면 로봇 제어기에서 각 관절로 전원선과 통신선만 연결하면 되므로 배선의 수를 최소화 할 수 있다. 또한 모듈을 중공형으로 만들면 배선을 관절 내부로 할 수 있어 로봇 배선과 사람 간의 간섭을 없애 안전을 향상시킬 뿐 아니라 로봇의 작업 반경을 넓힐 수 있다.

일반적으로 산업용 로봇의 구동 모듈은 모터의 출력축에 감속기가 부가되어 자체 중량 대비 큰 토크를 발휘하며 로봇을 구성하는 각 관절의 감속기 출력축의 위치를 제어하여 로봇 움직임이 제어된다. 감속기 출력축에 회전형 엔코더가 부착되어 관절 모듈의 회전각이 직접 검출될 수도 있고, 모

터 회전축에 엔코더가 부착되어 모듈의 회전각이 간접적으로 검출될 수도 있다. 절대치 엔코더는 회전각의 절대치를 한 번의 스캔으로 바로 알아낼 수 있어 편리한 반면 중공형으로 주문 제작하려면 비교적 큰 비용이 필요하다.

통상적인 A, B, Z(Index) 상 출력을 갖는 상용 증분형 엔코더를 사용하여 절대위치를 검출하기 위해서는 전원 투입 후 엔코더가 인덱스 펄스를 감지해야 한다. 이런 엔코더가 감속기 출력축에 부착되어 있다고 가정하면 로봇관절의 절대위치를 파악하기 위해서 전원 투입 후 로봇 관절이 최대 1회전까지 움직여야한다. 큰 범위로 회전하면 안전상의 문제가 발생할 수도 있고 링크간의 간섭에 의해 실제로 1회전이 불가능한 상황도 발생한다. 한편, 참고문헌[4]는 일반적인 증분형 엔코더 디스크에 균등한 마크 이외에 두 개 열의 마크를 부가하여 절대위치를 파악할 수 있도록 구현하였다. 이 방법을 이용하려면 특별히 고안된 광학 검출기가 필요하다.

본 논문 (본 논문은 참고문헌[5]에 이론을 보강하고 실험을 추가한 것이다)은 인간협업용 로봇에 사용되는 구동 모듈에 적용하기 위한 중공형 엔코더에 관한 것으로서 특히 저가의 광학식 증분형 엔코더를 감속기출력축과 모터구동축에 각각 부착하여 감속기 출력축의 절대위치를 검출하는 방법을 제안한다. 제안된 방법을 사용하면 초기 절대위치 검출을 위하여 감속기 출력축 엔코더의 한 펄스 간격만큼의 회전만 필요하다. 감속기출력축엔코더(이하 제2엔코더)의 A/B 상 펄스 발생 순번과 펄스 발생시의 모터구동축엔코더(이하 제1엔코더)의 펄스 계수치의 대응 테이블을 만들어서, 제2엔코더 펄스 발생시 제1엔코더의 계수치를 읽어 테이블에서 제2엔코더의 발생순번을 확인하여 절대위치를 알아내는 방식이다. 대응 테이블을 만드는 방법으로서, 첫

* Corresponding Author

Manuscript received December 10, 2014 / revised January 26, 2015 / accepted February 11, 2015

임재식, 이영진: (주)오토파워

(jslim@seoultech.ac.kr/ceo@autopower.co.kr)

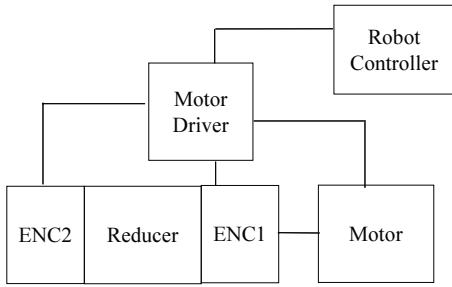


그림 1. 드라이브 일체형 로봇 액추에이터 구성.
Fig. 1. Configuration of robot actuator.

째, 제2엔코더의 회전당 펄스수와 감속기의 감속비가 서로 소(relative prime)가 되도록 설정하는 방법과, 둘째 일정 회전각에 대하여 제2엔코더의 펄스 발생 간격이 다르게 설정하는 방법을 제안한다. 제 IV절에서 실험을 통하여 제안된 방법의 효용성을 보인다.

II. 시스템 구성

그림 1에 보인 바와 같이 본 논문에서 고려하는 액추에이터는 감속기, 드라이브, 엔코더, 모터가 일체형으로 된 로봇관절 모듈이다. 모터 드라이브가 제1엔코더로부터 모터회전자의 위치를 검출하여 서보 구동이 이루어진다. 제2엔코더는 감속기 출력축에 연결되어 로봇관절의 절대위치를 검출하는 데 이용된다. 모터 드라이브는 로봇 마스터와 같은 상위제어기와 통신으로 연결되어 관절의 토크지령, 위치지령 등을 내려 받아 이에 따라 서보 제어를 수행하며 로봇 관절의 현재 위치, 토크 등을 올려준다. 본 논문에서 로봇 제어기는 펄스 구성 요소에 속하지는 않는다.

감속기 입력축과 출력축에 증분형 엔코더인 제1엔코더, 제2엔코더가 부착되어 있다. 감속기의 입력축은 곧 모터의 회전축이다. 제1엔코더와 제2엔코더는 A, B, Z(index) 상 출력을 갖는 통상적인 증분형 엔코더이며 이들 엔코더는 엔코더 디스크와 검출기로 구성된다. 이하에서 편의상 제2엔코더의 펄스발생 위치라 함은 정방향 회전일 때 A상(B상) 출력의 상승에지 역방향회전일 때는 A상(B상) 출력의 하강에지를 뜻하는 것으로 정한다.

III. 대응관계

본 절에서는 감속기 출력축에 부착된 제2엔코더의 펄스 발생위치와 그 위치에서의 모터 구동축에 부착된 제1엔코더 계수치의 관계가 일대일대응이 되는 테이블을 만드는 방법에 관하여 논의한다. 대응 관계를 만들기 위하여, 일정 회전각 마다 펄스가 발생하되 회전당펄스수를 감속비와 서로소(relative prime)가 되는 제2엔코더의 디스크를 사용하는 방법과, 펄스 발생 회전각 간격이 다르게 고안된 제2엔코더의 디스크를 사용하는 두 가지로 구분한다.

우선 이하에서 일정 회전각 마다 펄스가 발생하되 회전당펄스수가 감속비와 서로소가 되는 제2엔코더의 디스크를 사용하면 제2엔코더의 펄스발생위치와 그 위치에서의 모터 구동축에 부착된 제1엔코더 계수치의 관계가 단사함수가 된다는 것을 보인다. 모터구동축의 회전은 감속기를 거쳐 감

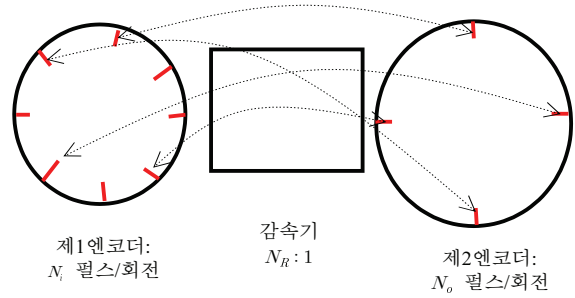


그림 2. 감속기입/출력축(제1/제2) 엔코더 펄스 위치 간의 대응 관계.
Fig. 2. Relationship between pulse positions of reducer input(1st) and output(2nd) encoders.

속기출력축의 회전을 발생하는데 이하의 방법에 의하면 감속기 입/출력 엔코더 펄스 발생 위치 간의 관계를 그림 2에 나타낸 바와 같이 만들 수 있다. 즉, 전원투입 후 초기에 제2엔코더 펄스가 발생하면 그에 대응하는 제1엔코더 계수치를 확인하여 감속기 출력축의 위치를 알아낼 수 있다.

이하의 논의에서 다음 두 가지를 가정한다. 제1엔코더와 제2엔코더는 Z(index) 펄스 발생시 계수치가 0으로 리셋되도록 설정된다고 가정한다. 그리고 감속기는 기구적으로 완전하여 이상적으로 동작한다고 가정한다.

1. 제2엔코더 펄스수와 서로소인 감속비
제1엔코더의 회전당 펄스발생수를 N_i , 감속기입력축과 출력축의 회전비율을 $N_r : 1$, 감속기출력축 제2엔코더의 회전당 발생펄스수를 N_o 라 하자. 다음을 가정한다.

- (a) 제1엔코더와 제2엔코더는 각각 디스크의 일정 회전 각마다 펄스가 발생
- (b) N_r 은 자연수
- (c) N_o 와 N_r 은 서로소
- (d) $N_o < N_i$

그러면 다음 정리가 성립한다.
정리1: 상기 조건하에서 제2엔코더의 펄스발생위치에 대응하는 제1엔코더 계수치는 유일하다.
증명: 부록 참조

제2엔코더의 회전당펄스수가 $13(=N_o)$, 감속비 $100:1(N_r=100)$, 제1엔코더의 회전당펄스수가 $2000(=N_i)$ 인 경우의 예를 들어보자. 13과 100은 서로소이고 $N_i > N_o$ 이므로 상기 가정을 만족한다. 표 1에 제2엔코더 펄스 계수, 출력축회전, 모터구동축 회전, 제1엔코더 펄스 누적계수치, 제1엔코더 펄스 계수치를 각각 보였다. 전술한 바와 같이 제2엔코더 펄스발생 위치와 제1엔코더 펄스계수치 간의 일대일대응 관계가 확인된다. 따라서, 제2엔코더 펄스 발생 시 제1엔코더의 계수치를 읽어 감속기 출력축의 절대위치를 파악할 수 있다. 예를 들어, 표 1의 관계를 갖는 액추에이터에서 제2엔코더 펄스 발생 시 제1엔코더의 계수치가 923이었다면 이에 해당하는 제2엔코더 순번은 5이고 이는 감속기 출력축의 0.384615 회전에 해당한다.

표 1. 대응관계의 예.

Table 1. Relationship example.

제2엔코더 펄스순번	감속기출력축회전	모터축회전	제1엔코더누적카운터	제1엔코더계수치(Rk)
0	0	0	0	0
1	0.076923	7.692308	15385	1385
2	0.153846	15.38462	30769	769
3	0.230769	23.07692	46154	154
4	0.307692	30.76923	61538	1538
5	0.384615	38.46154	76923	923
6	0.461538	46.15385	92308	308
7	0.538462	53.84615	107692	1692
8	0.615385	61.53846	123077	1077
9	0.692308	69.23077	138462	462
10	0.769231	76.92308	153846	1846
11	0.846154	84.61538	169231	1231
12	0.923077	92.30769	184615	615
13	1	100	200000	0

한편 표 1을 살펴보면 제2엔코더 펄스순번에 대응하는 제1엔코더 계수치가 일정하게 증가하거나 감소하지 않고 커졌다 작아졌다 한다. 단조증가하는 대응관계는 아래 정리를 만족하면 얻을 수 있다.

정리2: 어떤 자연수 M 에 대하여

$$N_r = MN_o + 1$$

이면 그때만 제2엔코더 펄스순번에 대응하는 제1엔코더의 계수치가 단조증가한다.

증명: 부록 참조

이 정리에 의하면, $N_r = N_o + 1$ 이 되도록, 즉 감속비보다 1작은 펄스를 갖는 제2엔코더 디스크를 사용하면 제2엔코더 펄스 순번에 대응하는 제1엔코더 계수치가 단조증가한다. 이러한 단조증가 특성은 이후 IV절에서 보이듯이 실제 모듈의 기구적 완전성을 살펴보는 데 유용하다.

정리2와 유사하게 단조감소하는 대응관계에 관한 정리를 얻을 수 있다.

정리3: 어떤 자연수 M 에 대하여

$$N_r = MN_o - 1$$

이면 그때만 제2엔코더 펄스순번에 대응하는 제1엔코더의 계수치가 단조감소한다.

증명: 정리2의 증명과 유사함

2. 불균일한 제2엔코더 디스크 사용

이제 펄스 발생 회전각 간격이 다르게 고안된 제2엔코더의 디스크를 사용하여 제2엔코더의 펄스발생위치와 그 위치에서의 모터 구동축에 부착된 제1엔코더 계수치의 관계가 단사함수가 되도록 만드는 것에 관하여 설명한다.

앞선 경우와 마찬가지로 가정(b), (d)가 성립하고, 제1엔코더의 펄스발생 회전각은 일정하다고 가정한다. 우선 제2엔코더의 펄스발생 회전각이 균일하다고 생각해보자. 그리고 감속비 N_r 과 제2엔코더의 회전당펄스수가 1보다 큰 최대 공약수 G 를 갖는다고 가정하자. 즉

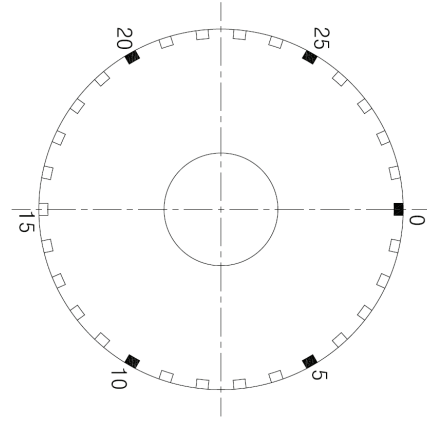


그림 3. 불균일한 제2엔코더 디스크.

Fig. 3. Irregular type disk of the 2nd encoder.

$$N_o = GN_{o1}, \quad N_r = GN_{r1} \quad (N_{o1} > 1) \quad (1)$$

그러면 식 (A4)가 다음과 같이 된다.

$$(k_1 - k_2)N_{r1}/N_{o1} = Q_{k1} - Q_{k2} \quad (2)$$

k_1, k_2 ($0 \leq k_1, k_2 < N_o$)를 식 (2)의 좌변이 정수가 되지 않도록 선택하자. 즉 N_{o1} 이 $k_1 - k_2$ 를 나누어 떨어뜨리지 못하도록 만드는 k_1, k_2 의 집합에 대해서는 앞선 경우와 마찬가지로 제2엔코더의 펄스발생위치와 그 위치에서의 모터 구동축에 부착된 제1엔코더 계수치의 관계가 단사함수임이 가능해진다.

그러한 k 의 집합은 다음과 같은 방식으로 특정될 수 있다.

$$S = \{k = Pn < N_o \mid P \text{는 } N_{o1} \text{과 서로소인 정수, } n \text{은 } N_{o1} \text{의 배수를 제외한 자연수}\} \quad (3)$$

식 (3)의 집합 S 에 해당하는 제2엔코더의 펄스발생위치에서만 실제로 펄스가 발생되도록 제2엔코더의 디스크를 만들면 된다. 회전당펄스수 N_o 를 가지며 펄스간 회전각이 균일한 디스크가 있다고 가정할 때 그 디스크에서 식 (3)에 표시된 집합에 속하지 않은 위치에서는 펄스가 발생하지 않도록 엔코더 디스크를 만들면 된다.

이해를 돕기 위한 예를 들면, $N_r = 10$ 이고 $N_o = 30$ 일 때, $G = 10$, $N_{o1} = 3$ 이 되는데 3과 서로소인 $P = 5$ 을 택하면 집합

$$S = \{0, 5, 10, 20, 25\}$$

에 속하는 제2엔코더의 펄스발생위치와 그 위치에서의 모터 구동축에 부착된 제1엔코더 계수치의 관계가 일대일 대응이 가능해진다. 그림 2에 이에 해당하는 제2엔코더 디스크를 보였다. 검정색으로 마킹된 위치에서만 엔코더 펄스가 발생한다.

IV. 실험

본 논문에서는 50W, 300W 두 개의 관절 모듈을 대상으로 실험하였다. 각 모듈의 형상은 그림 4, 5와 같다.

각 모듈의 상세 규격은 아래 표와 같다.

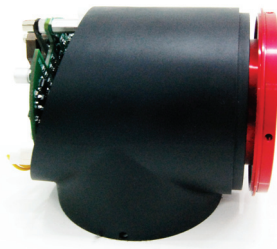


그림 4. 50W 액추에이터.

Fig. 4. 50W actuator.

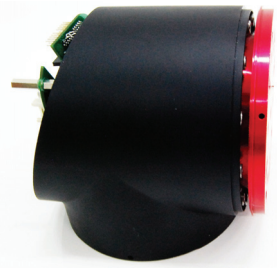


그림 5. 300W 액추에이터.

Fig. 5. 300W actuator.

표 2. 모듈의 규격.

Table 2. Specifications of actuators.

분류		50W	300W
구성		감속기/모터/브레이크/엔코더	
치수	직경	Φ78.6	Φ116.6
	길이	116.9	141.8
	중공경	Φ4.0	Φ9.0
	무게	1.2kg	3.8kg
엔코더	모터축	7852 펄스	10000 펄스
	감속기축	83 펄스	100 펄스
감속기		하모닉 감속기 101:1	

50W 액추에이터의 경우 표 2에서 $N_i=7852$, $N_o=83$, $N_r=101$ 인데, 83과 101은 서로소이다. 1000 rpm 으로 감속기 출력축이 20회전하는 동안, 제2 엔코더에서 펄스가 발생할 때 제1엔코더의 계수치와 회전 수를 기록하였다. 그 결과는 아래 표 3과 같다. 여기서, 제1엔코더 계수치는 20번 나운 값을 평균하여 반올림한 것이다. 20번 시행에서 하나의 제2 엔코더 펄스 순번에 해당하는 20개의 제1엔코더 계수치들의 최대/최소 간 편차는 20펄스 이내였다.

모터구동축에 부착된 제1엔코더도 증분형이기 때문에 전원 투입 직후에 인덱스 펄스를 감지하여야 그 이후부터 올바른 계수가 된다. 그런 다음 제2엔코더 펄스가 발생하는 순간 제1엔코더 계수치를 읽어 그 값을 테이블에서 찾아서 제2엔코더의 펄스 순번을 알아내고 또한 모터축의 회전수를 알아내서 절대위치를 계산하면 된다. 예를 들어, 제2엔코더 펄스가 발생하는 순간 제1엔코더 계수치가 6,674였다면 이는 제2엔코더 펄스 순번이 7이고 모터회전수는 7회전이므로 절대위치는 제1엔코더 기준으로 다음과 같다.

$$7\text{회전} \times 7,852/\text{회전} + 6,674 = 61,638$$

표 3. 50W 액추에이터 절대위치 테이블.

Table 3. Table for absolute position of 50W actuator.

제2엔코더 펄스 순번	제1엔코더 계수치	모터축 회전수
0	3053	0
1	4667	1
2	6309	2
3	101	4
4	1743	5
5	3391	6
6	5049	7
7	6674	8
8	438	10
9	2072	11
10	3730	12
...	...(중략)	...
78	2537	95
79	4223	96
80	5875	97
81	7522	98
82	1397	100

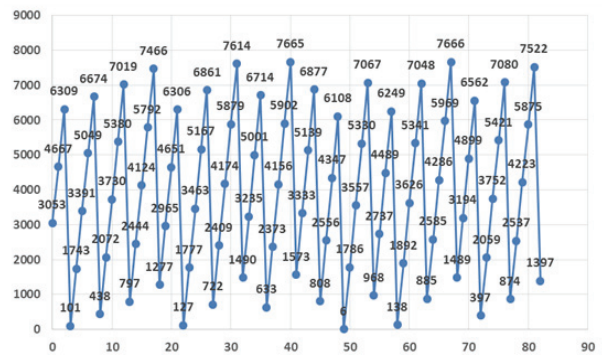


그림 6. 50W 액추에이터 절대위치 관계. x축: 제2엔코더 펄스 순번, y축: 제1엔코더 계수치.

Fig. 6. Relationship of absolute position for 50W actuator. x-axis : pulse number of the 2nd encoder, y-axis : counter of the 1st encoder.

표 3을 그래프로 표현하면 그림 6과 같다. 제2엔코더 펄스 순번에 대하여 지그재그 형태의 파형을 보인다. 표 3에서 제1엔코더 계수치가 비슷한 제2엔코더 펄스 순번이 다수 존재하는데 이는 모터축의 흔들림, 엔코더 디스크의 편심 등 기구적 불완전성에 기인한다. 그래서 이러한 비슷한 항목을 제거하고 최종 39개 항목을 갖는 테이블을 얻어 적용하였다. 실제 적용에서는 제1엔코더 계수치가 테이블에 있는 값과 +/-10 이내이면 일치하는 것으로 판단하였다.

절대위치 검출이 정확히 이루어지는지 확인하기 위하여, 먼저 감속기 출력축을 원점에 위치시켜 놓고, 감속기 출력축과 연결된 부품(외부기와 연결하기 위한 부품)의 가장 자리와 모듈의 하우징 외부에 절대위치 원점에서 해당하는 표식을 각각 해두었다. 그런 뒤, 전원 투입 후 절대위치 검출 하고나서 절대위치 원점으로 위치제어하여 표시된 원점으로 이동하는가를 육안으로 관찰하였다. 초기위치를 임의

로 두고 이 과정을 반복하여본 결과 절대위치 검출이 제대로 이루어짐을 확인할 수 있었다.

300W 액추에이터의 경우 표 2에서 $N_i = 10,000$, $N_o = 100$, $N_r = 101$ 인데, 100과 101은 서로소이다. 정리2에 의하면 단조증가하는 테이블을 얻을 수 있다. 50W 모듈에서와 마찬가지로 20번 시행에서 테이블을 얻었다. 제2엔코더 펄스에 대응하는 제1엔코더 계수치의 최대/최소간 편차는 20펄스 이내였다. 그림 7에 제2엔코더 펄스 순번에 대응하는 제1엔코더 계수치를 나타냈다. 단조증가하는 그래프로 나타났는데, 이론적으로는 직선이 되어야하지만 실제로는 누운 S자 형태의 곡선이 얻어졌다. 이는 모터회전축/감속기축의 흔들림, 엔코더 디스크의 편심 등에 기인한다. 앞선 50W 모듈의 경우에는 실제 적용할 때 실험에서 구한 테이블에서 제1엔코더 값이 비슷한 항목들을 제거하고 사용하였는데, 300W 모듈은 실험에서 구한 테이블 항목 대부분을 사용할 수 있었다. 즉, 제1엔코더 값이 대부분 서로 충분히(50펄스 이상) 차이가 났다.

정리2에 의해 감속비보다 1 작은 펄스를 갖는 제2엔코더 디스크를 사용하면 단조증가하는 직선의 그래프가 얻어지야하는데 실제로는 기구적 불완전성으로 인해 그림 7과 같은 곡선이 얻어진다. 이때, 그래프가 얼마나 직선에 가까운지를 보고 기구적인 불완전성의 정도를 한눈에 파악할 수 있다는 점에서 감속비보다 1 작거나 큰 펄스를 갖는 제2엔코더 디스크를 사용하는 것이 최적이라 볼 수 있다.

이상의 논의는 양의 방향으로 회전하면서 만든 절대위치 테이블을 이용하여 양의 방향으로 회전하면서 검출하는 방법에 관한 것이다. 이상적인 경우라면 음의 방향으로 회전하면서도 양의 방향 테이블을 그대로 사용할 수 있을 것이다. 제2엔코더 $-k(k < 0)$ 순번에 해당하는 제1엔코더 계수치를 다음과 같이 표현해보자.

$$-kN_iN_r/N_o = N_iQ_k + R_k, \quad (Q_k \text{는 정수}, 0 \leq R_k < N_i)$$

그러면, 제2엔코더의 $N_o - k$ 순번에 해당하는 제1엔코더 계수치는 다음과 같이 표현된다.

$$(N_o - k)N_iN_r/N_o = N_i(N_r + Q_k) + R_k,$$

따라서 제2엔코더의 $-k$ 번째 펄스가 발생할 때 양의 방향으로 $N_o - k$ 번째 펄스에 해당하는 절대위치를 선택함으로써 절대위치 검출을 수행하면 된다. 그러나 음의 방향으로 회전하면서 절대위치 테이블을 실제로 만들어본 결과 이상적인 경우와는 차이가 있었다. 음의 방향에 해당하는 양의 방향 테이블 항목에서 제1엔코더 계수치가 대략 20 ~ 50 정도 차이가 있었다. 따라서 본 논문에서 실험한 액추에이터에 대해서는, 음의 방향으로 회전하면서 절대위치를 검출하기 위해서는 음에 방향에 대한 테이블을 별도로 만들어서 이용하는 것이 필요하였다.

V. 결론

이상에서 모터구동축과 감속기 출력축에 증분형 엔코더를 각각 설치하여 로봇 관절의 절대위치를 검출하는 방법을 제안하였다. 감속기의 감속비와 감속기출력축의 엔코더

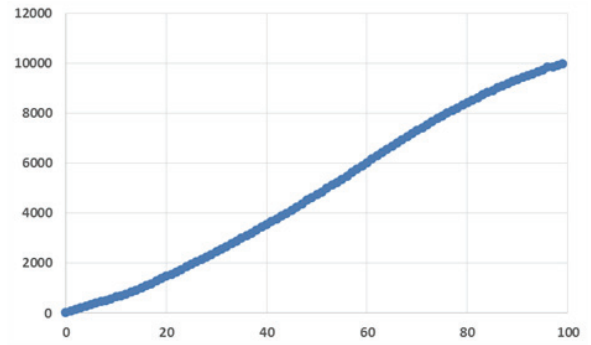


그림 7. 300W 액추에이터 절대위치 관계: x축-제2엔코더 펄스 순번, y축-제1엔코더 계수치.

Fig. 7. Relationship of absolute position for 300W actuator. x-axis : pulse number of the 2nd encoder, y-axis : counter of the 1st encoder.

펄스수의 관계가 수학적으로 서로소가 되도록 선택하는 방식과, 제2엔코더의 디스크를 특수하게 제작하여 제2엔코더 펄스발생위치와 제1엔코더 계수치의 관계가 일대일대응이 되도록 만드는 방식을 제안하였다. 50W, 300W 액추에이터를 제작하여 제안된 방식으로 절대위치를 검출하는 실험적 예를 보였다.

제안된 방법에 의하면, 상대적으로 고가인 절대치 엔코더를 대신하여 저렴한 증분형 엔코더를 사용함으로써 액추에이터의 제작비용을 낮출 수 있다. 전원투입 후 초기 구동시에 출력축 제2엔코더의 Z펄스(기준위치)를 찾을 필요가 없기 때문에 적은 회전으로 쉽게 감속기 출력축의 절대위치를 찾을 수 있어서, Z펄스를 찾기 위해 구동기가 큰 회전을 할 때 발생하는 기구부 간의 충돌 및 운전자와의 충돌과 같은 문제를 피할 수 있으므로 안전을 높이는 효과를 가진다. 또한, 제2엔코더 펄스 발생 시 마다 모터구동축 제1엔코더 위치가 테이블에 정해진 순서대로 나타나는가를 감시하여 기구적 결함을 진단하는 데도 이용할 수 있을 것으로 기대한다.

부록

정리1의 증명: 제2엔코더의 k 개의 펄스발생 시 감속기 출력축은 k/N_o 회전하고 이때 모터구동축은 kN_r/N_o 회전하므로 제1엔코더는 kN_iN_r/N_o 개의 펄스를 발생한다. kN_iN_r/N_o 을 다음과 같이 표현하자.

$$kN_iN_r/N_o = N_iQ_k + R_k \tag{A1}$$

여기서, Q_k 는 정수이고, R_k 는 $0 \leq R_k < N_i$ 범위를 갖는데 R_k 의 정수부는 제1엔코더 디스크의 1회전마다 Z펄스 발생 시 계수치를 리셋할 때 제1엔코더의 계수치이다.

이제 k_1, k_2 는 0보다 같거나 크고 N_o 보다 작은 서로 다른 정수라 하자. 제2엔코더의 펄스가 k_1, k_2 개 발생 시의 제1엔코더의 펄스발생 수는 식 (A1)에 의해 다음과 같이 각각 표현된다.

$$kN_iN_r/N_o = N_iQ_{k1} + R_{k1} \tag{A2}$$

$$kN_r N_r / N_o = N_i Q_{k2} + R_{k2} \quad (A3)$$

$R_{k1} = R_{k2}$ 라 가정해보자. 식 (A2)에서 식 (A3)을 빼고 양변을 N_i 로 나누어 다음식을 얻는다.

$$(k_1 - k_2)N_r / N_o = Q_{k1} - Q_{k2} \quad (A4)$$

식 (A4)의 우변은 가정에 의해 정수이다. 그런데 $k_1 - k_2$ 의 절대치가 N_o 보다 작고 N_r 과 N_o 가 서로소이기 때문에 좌변은 정수가 될 수 없어서 모순이 발생한다. 따라서 서로 다른 k_1, k_2 에 대해서 서로 다른 R_{k1}, R_{k2} 가 대응한다.

그런데 엔코더의 계수치는 항상 정수이므로, 식 (A1)의 R_k 는 항상 그 정수부만 이용된다. 따라서 서로 다른 k_1, k_2 에 대해서 R_{k1}, R_{k2} 의 정수부가 서로 다른지 확인해야 한다. 이를 위하여 가정(a)에 의해 서로 다른 k_1, k_2 중 어느 하나를 0으로 두고 생각해도 무방하다. 그래서 식 (A1)에서 R_k 의 정수부를 0이 되게 하는 정수 k ($0 < k < N_o$)가 있는지 확인하는 것으로 충분하다. kN_r 을 다음과 같이 표현하자.

$$kN_r = N_o q_k + r_k \quad (A5)$$

(q_k 는 정수, $0 < r_k < N_o$)

그런데 N_r 과 N_o 가 서로소이므로 r_k 는 0이 아니다. 식 (A1)과 (A5)로부터

$$\begin{aligned} R_k &= N_i k N_r / N_o - N_i Q_k \\ &= N_i (k N_r / N_o - Q_k) \\ &= N_i (q_k - Q_k) + N_i r_k / N_o \end{aligned} \quad (A6)$$

R_k 가 음이 아닌 정수인 점을 고려할 때 식 (A6)의 마지막 식이 최소가 되는 경우는 $q_k = Q_k$ 이고, $r_k = 1$ 일 때이다. 이때 $R_k = N_i / N_o$ 인데 가정(d)에 의해서 이 값은 1보다 크다. 이로써 제2엔코더의 펄스발생위치가 다르면 제1엔코더 계수치도 다름을 보였다. 제2엔코더의 펄스발생위치의 수와 이에 대응하는 제1엔코더 계수치의 수가 동일하므로 두 집합은 서로 일대일 대응 대응관계를 갖는다.

정리2의 증명: (충분성) 제2엔코더 펄스 순번 $k_1, k_2 \in \{0, 1, \dots, N_o\}$ ($k_1 < k_2$)에 대하여

$$k_1 / N_o < k_2 / N_o < 1$$

이므로, k_1, k_2 에 대응하는 제1엔코더 값은 다음관계를 갖는다.

$$k_1 N_i / N_o < k_2 N_i / N_o < N_i$$

(필요성) $N_r = MN_o + m$ ($1 < m < N_o$)이라 가정하자. $k_1, k_2 \in \{0, 1, \dots, N_o\}$ ($k_1 < k_2$)에 대하여

$$\begin{aligned} k_1 m &= N_o s_1 + t_1 \quad (s_1 \geq 0, 0 \leq t_1 < N_o) \\ k_2 m &= N_o s_2 + t_2 \quad (s_2 \geq 0, 0 \leq t_2 < N_o) \end{aligned}$$

을 만족하는 자연수 s_1, s_2, t_1, t_2 가 존재한다. 특히 $s_1 = 0, s_2 = 1$ 이고 $k_2 = k_1 + 1$ 이 되도록 k_1, k_2 를 선택하자.

실제로 그러한 k_1, k_2 는 항상 선택 가능하다. 그러면 $t_1 - t_2 = k_1 m - (k_1 m + m - N_o) = N_o - m > 0$ 이므로, k_1, k_2 에 대응하는 제1엔코더 값은 각각 $t_1 N_i / N_o, t_2 N_i / N_o$ 인데 $t_1 N_i / N_o > t_2 N_i / N_o$ 이다. 따라서 m 은 0 또는 1인데 0이면 N_r 과 N_o 는 서로소가 아니므로 $m = 1$ 이어야 한다. \square

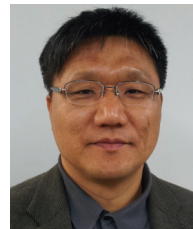
REFERENCES

- [1] K. Kosuge, H. Yoshida, D. Taguchi, T. Fukuda, K. Hariki, K. Kanitani, and M. Sakai, "Robot-human collaboration for new robotic applications," *Industrial Electronics, Control and Instrumentation, International Conference on*, 1994.
- [2] P. J. Hinds, T. L. Roberts, and H. Jones, "Whose job is it anyway? a study of human-robot interaction in a collaborative task," *Human-Computer Interaction*, vol. 19, pp. 151-181, 2004.
- [3] Trogny Brogardh, "Present and future robot control development—An industrial perspective," *Annual Review in Control*, vol. 31, pp. 69-79, 2007.
- [4] R. I. Kibrick and C. R. Delaney, "Encoder for measuring both incremental and absolute positions of moving elements," Pat. No. US4736187, USA, 1988.
- [5] J. S. Lim and Y. J. Lee, "Detection method of absolute position of reducer output axis," Pat. No. 10-1461627, Korea, 2014.



임재식

1996년 경상대학교 제어계측공학과 졸업. 2000년 동 대학원 석사. 2011년 서울과학기술대학교 나노아이티공학과 박사. 현재 한국전기연구원 기업지원 연구직 선임연구원. 관심분야는 모델 예측제어(MPC) 이론과 전력변환기 및 전동기 제어에 MPC 적용 등.



이영진

1995년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1998년 동 대학원 석사. 2001년 동 대학원 박사. 현재 (주)오토파워 대표이사. 관심분야는 델타로봇 및 협업로봇 등 산업용 로봇의 제품화.