

온라인 좌표 역변환 알고리즘의 개발과 이의 실험적 수행

오준호, 오막서옥, 이두현
한국과학기술원 생산공학과

Development of On-Line Inverse Kinematic Algorithm and Its Experimental Implementation

Jun H. Oh, Seo W. Park and Doo H. Lee
Dept. of Production Engineering, KAIST

ABSTRACT

This paper presents a new algorithm for solving the inverse kinematics in real-time applications. The end-tip movement of each link can be resolved into the basic resolution unit, Δl , which depends on link length, reduction ratio and resolution of the incremental encoder attached to the joint. When x - and y -axis projection of the end-tip movement are expressed in Δl unit, projectional increments Δx and Δy become -1, 0 or 1 by truncation. By using the incremental computation with these ternary value and some simple logic rules, a coordinate transformation can be realized. Through this approach, it should be noted that the floating-point arithmetic and the manipulation of trigonometric functions are completely eliminated. This paper demonstrates the proposed method in a parallelogram linkage type, two-link arm.

1. 서론

소위 1 세대 로봇이라고 불리는 작업교시 및 재생방식(teaching and playback type)의 로봇에서는 로봇트 핸드의 운동계획을 오프라인 프로그래밍 또는 teaching 의해 미리 지정하여 줌으로써 로봇트는 단지 이를 계획을 재생하여 반복작업을 수행하여 왔다. 그러나 최근에 와서는 시각 및 촉각센서등의 정보를 바탕으로 하여 로봇트의 운동을 수행하려는 시도가 대두되고 있다. 이는 예측불능의 주변상황에 대해 보다 유연성 있게 대처하며, 여러가지 오차요인들을 스스로 보상하면서 동작할 수 있게 한다.

온라인 좌표 역변환은 이러한 것을 가능케 하기 위한 기본적인 요구사항이다. 그러나 관절형 로봇트(articulated robot)에서는 좌표 역변환시에 많은 곱셈 및 삼각함수의 연산을 필요로 한다. 이는 부동소숫점 연산(floating-point arithmetic)을 필요로 하며, 많은 계산 량으로 인하여 로봇트 동작속도에 제한을 주는 요인이 된다.

최근에는 저렴하고 고속으로 부동소숫점 연산을 수행하는 co-processor 들이 개발되어지고 있기는 하지만, 원하는 정도(accuracy)의 해를 얻기 위해서는 word size 를 크게 해주어야 하는 등의 문제로 인하여, 좌표변환 전용의 프로세서를 설계하는 것이 복잡해진다[1][2].

가까운 장래에 좌표 변환용 chip 의 개발이 기대되고 있으나 아직은 여러가지 문제점들을 내포하고 있는 실정이다. 이와같이 좌표변환을 하드웨어로 구현하게 되면 상당한 계산 속도의 향상이 기대되어지지만, 이러한 chip 들은 범용 프로세서(general-purpose processor)와 쉽게 인터페이스가 되어야 하고, 이와같은 프로세서로 Direct digital control 이 가능해야만 하겠다[3].

본 논문에서는 저렴한 가격으로 쉽게 하드웨어로 구현이 가능한 좌표 역변환 알고리즘을 제안하고자 한다. 관절 위치검출기의 분해능, 감속비 및 링크 길이등에 의해 결정되는, 링크 끝 단의 위치해상도를 기본 단위로 하여 정기구학의 해를 구한다. 또한 복잡한 산술 연산 대신에 증분운동들의 도식적인 분석을 통하여 좌표 역변환을 구현하였다. 이를 평형 링크형태의 2 관절 로봇트에 대해 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

2. 기본해상단위에 기초한 정기구학

길이가 l 인 임의의 링크를 구동하기 위해 관절에는 서보모타가 부착되어 있고, 위치검출기으로써 광학 증분 엔코더(optical incremental encoder)를 사용한다고 하자. 이때 관절회전 운동의 해상도, $\Delta \theta$, 는 기어의 감속비와 엔코더의 분해능에 의해 결정된다. 감속비를 $N (>1)$, 엔코더의 분해능을 n (pulse/rev.)라고 할 때, $\Delta \theta$ 는 다음과 같다.

$$\Delta \theta = \frac{2\pi}{nN} \text{ (rad)} \quad (1)$$

또한 링크 끝 점의 기본해상 단위 (basic resolution unit), Δl 을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta l = l \Delta \theta \quad (2)$$

이와같이 링크의 운동이 유한한 위치정도(positional accuracy)를 가지므로, 관절증분 (joint increment)에 대응하는 링크 끝 점의 증분운동을 Δl 을 기본단위로하여 선형 근사화(linear approximation)시킬 수

있다. 그림.1 에서 보는 바와 같이, 링크의 주어진 자세 및 관절 회전방향에 따라 근사적인 증분운동은 3 가지 경우 중에 하나가 될 것이다.

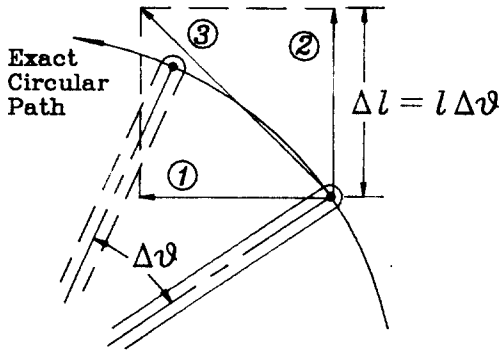


Fig.1 Incremental End-Tip Movements for CCW Joint Motion

이와같이 선형 근사화된 링크 끝점의 증분운동은 그림.2 에서 보는 바와 같이, 링크의 자세 및 회전 방향에 따라서 8 가지 가능한 경우 중의 하나가 된다. 예로써 $n = 100$ pulse/rev., $N = 1$ 의 경우에 대해서 얻어진 근사적인 경로는 그림.3 과 같다.

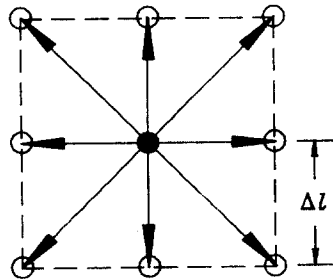


Fig.2 Eight Possibilities for Incremental Linear Movements

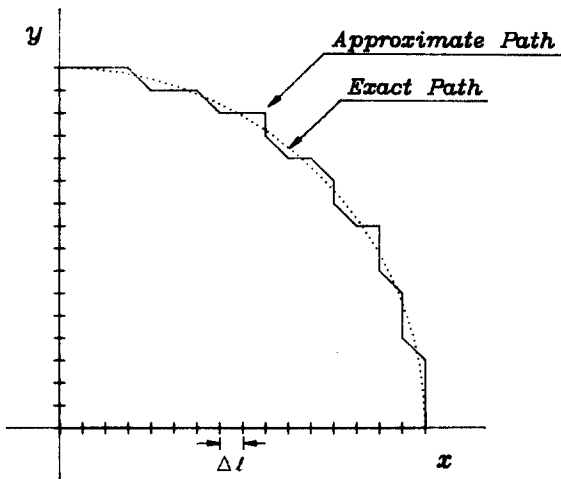
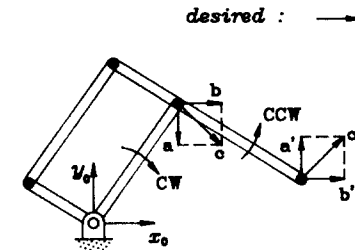


Fig.3 Approximate Path of End-Tip

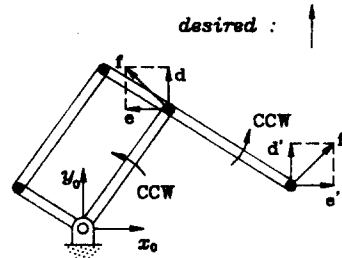
이와같이 엔코더의 분해능 및 감속비가 결정되면, 관절증분에 대응하는 끝 점의 증분운동이 얻어진다. 1, 0, 1 의 형태인 이들 값을 메모리에 저장한 뒤, 이를 look-up 하여 합하면 정기구학의 해를 쉽게 구할 수가 있다.

3. 좌표역변환 알고리즘

두 링크의 길이가 같고, 평형 링크 형태를 갖는 2 관절 평면 로봇에 대한 좌표 역변환 문제를 살펴보자. 그림.3 및 그림.4 의 두 가지 특징적인 자세에 대한 링크 증분운동의 도식적인 분석을 통하여, 제한하고자 하는 알고리즘을 설명하고자 한다.



(a). For +x Command



(b). For +y Command

Fig.4 Relation between Joint Increments and Cartesian Increments (1 x 4 configuration)

그림.4 와 같은 자세에서 +x 방향의 지령이 주어지면, upper arm 은 시계방향, fore arm 은 반시계 방향으로 움직여야 원하는 위치로 가게 된다. 반면에 +y 방향의 지령에 대해서는 각 관절을 모두 반시계 방향으로 움직여야 한다. 이러한 각 관절의 회전방향은 Newton-Raphson correction vector, $J^{-1} \Delta x$ 의 부호를 취한 것임을 알 수 있다[4]. 이러한 관절의 동작에 대응하는 각 링크 끝 점의 증분운동은 3 가지 중의 하나가 된다. 각 링크의 이들 증분운동의 조합이 지령운동과 일치하게 될 때가 구하고자 하는 해가 된다. 이들을 여러 경우에 대해서 분석한 결과, 다음 4 가지의 형태로 분류되어진다.

- (1). 한 링크만의 운동으로 해를 얻는 경우: b 또는 b', d 또는 d'
- (2). 두 링크 운동의 조합에 의해 해를 얻는 경우: a-c', c-a', e-f', e'-f
- (3). 두 링크 운동의 조합으로 끝점이 현 상태를 유지하고 있는 경우: a-a', e-e'

(4). 두 링크 운동의 조합에 의해 발산하는 경우: $c-c'$, $i-i'$

여기서 세번째 경우는 각 링크의 증분 운동으로서 상쇄작용을 일으키는 경우로써, 이때는 알고리즘을 반복 수행함으로써 결국 원하는 위치로 가게 된다.

그런데 네번째의 경우는 발산하게 되는데, 이때는 fore arm 의 운동에 제한을 가함으로써 발산 현상을 회피할 수 있다. 또한 이때 발생하는 Δl 에 해당하는 오차를 다음 단계에서 보상되어짐을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

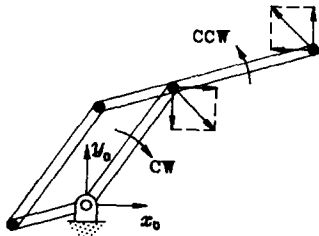


Fig.5 Relation between Joint Increments and Cartesian Increments (1 x 1 configuration)

그림.5 와 같은 자세에서는 위에서 살펴본 것과는 다소 양상이 다르다. + x 및 + y 지령에 대해서 fore arm 은 시계방향으로, upper arm 은 반시계 방향으로 회전 할 때 끝 점이 원하는 위치를 추종하게 된다. 이때는 다음의 두가지 경우로 분류되어진다.

(1). + x 방향의 지령에 대해서 : fore arm 만이 원하는 동작을 하는데 기여한다. upper arm 은 fore arm 이 동작을 취함으로 발생하는 y 방향의 오차를 없애주는 역할만을 한다.

(2). + y 방향의 지령에 대해서 : 위 경우와는 반대로 upper arm 만이 끝 점이 원하는 운동방향으로 움직이는데 기여한다. fore arm 은 단지 x 방향의 오차를 보상해주는 역할만을 할 뿐이다.

평형링크 형태의 로봇은 elbow-down 의 자세만을 취하게 되는데, 이때 로봇은 각 링크가 놓여지는 상반(quadrant)에 따라서, 12 가지 형태의 자세로 분류된다. 또한 각 자세에 대해서 + x 및 + y 방향의 지령이 주어졌을때, 각 관절이 회전해야 될 방향을 미리 결정할 수 있다. 이때 경우의 수는 24 가지가 된다. 이러한 조작 테이블을 메모리에 기억시킨 뒤에, 로봇의 자세 및 지령이 바뀔때 마다 이들을 look-up 함으로써 해결 수가 있다.

이러한 방법은 inverse Jacobian 을 주어진 궤적에 대해서 매번 계산 해야하는 기존의 방법과는 계산 속도에 있어서 많은 잇점이 있다. 또한 위치해상도가 아주 낮은 경우 (예컨대, $n = 50$, $N = 1$ 인 경우) 에 대하여 얻어진 몇가지 규칙들이 실제의 경우(예컨대 $n = 1000$ pulse/rev., $N = 50$) 에 그대로 적용이 되어진다.

원하는 직교공간상의 경로가 주어지면 위와같은 알고리즘으로부터 각 관절에 가해질 조작신호를 얻게 된다. 디지털 서보방식으로 모터위치제어를 할 때, 이들 조작신호는 각 관절서보에 대해 지령펄스의 열(sequence of command pulse train) 을 발생한다.

4. 시뮬레이션

제안된 알고리즘을 프로그래머하여 여러가지 경로에 대해 그래픽 시뮬레이션을 행하였는데, 그것의 간단한 결과는 다음과 같다.

그림.6은 지령경로가 y 축을 따르는 직선경로인 경우에 대하여 운동모습을 연속적으로 나타내 보이고 있다. 이때 엔코더는 100 pulse/rev. 이고 감속정지는 없는 경우이다. 그림에서 P_1 및 P_2 는 각 관절에 가해지는 펄스 일의 거리이고, 펄스의 수는 관절의 각도를 나타낸다. 그림.7 은 각기 다른 엔코더의 n (pulse/rev.) 값에 대하여, x 축을 따르는 직선경로를 수행하여 원하는 직선경로로부터의 편차를 보여주고 있다.

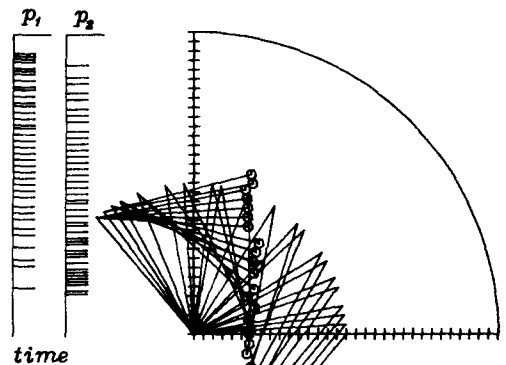


Fig.6 Motion Profiles for Straight-Line Path

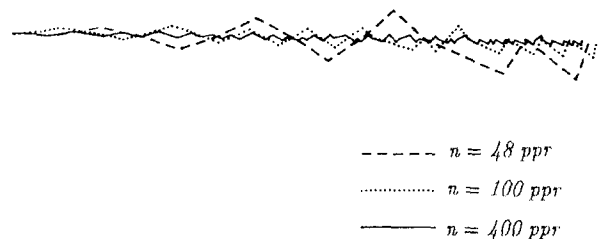


Fig.7 Deviations from Desired Straight Line Path for various Resolutions of Encoder

5. 실험

5.1 실험용 로봇의 제작

실험에 사용될 로봇은 평형링크 형태로써 대략적인 구조는 그림.8 과 같다. 자세한 치수는 표.1 에서 보는 바와같다. 로봇 본체는 무게에 비하여 고강성을 갖는 복합재료 (Graphite/Epoxy)를 사용하였다. 두께 0.175 mm 의 재료를 여러형태로 적층하여 autoclave molding 에 의해 성형, 제삭하였으며, 각 관절은 두랄루민으로 따로 제작하여 조립하였다.

사용한 액츄에이터는 Harmonic Driver 시의 직류 시모터 (67 W)이고, 감속장치는 50:1 의 감속비를 갖는 Harmonic Driver 를 사용하였다. 출력위치를 검출하는 센서로는 1000 pulse/rev. 의 Incremental Optical Encoder 를, 속도검출용으로는 Tachogenerator 장치하였다.

감속기의 사용으로 인하여, 관절에 미치는 로봇의 관성, 감속비의 제곱만큼 줄어든다. 또한 평형링크가 갖는 여러가지 특성 - 모터의 전력소비가 적고, 각 링크간의 반력이나 비선형성이 적다 - 뿐만아니라, 복합재료가 가지는 장점들로 인하여, 고속동작시에 로봇의 비선형적 동특성으로 인한 문제점들을 최소화시킬 수 있다.

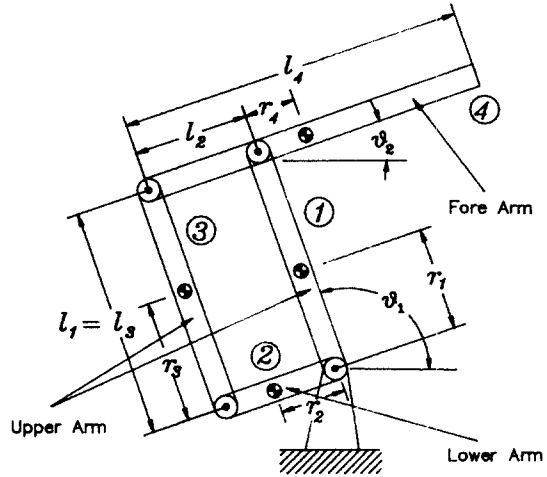


Fig.8 Schematics of Two-Link Arm for Experiments

Table.1 Specifications of the Robot

Link Number	Mass (Kg)	Moment of Inertia (Kg-cm ²)	Mass Center (cm)	Link Length (cm)
1	1.63	322	12.9	40
2	0.79	62	9.0	20
3	0.37	133	20.0	40
4	1.08	306	4.3	60

5.2 실험장치의 개요

그림.9 는 전체적인 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 제안된 실험 방법인 알고리즘으로부터 각 관절에 개해질 지령펄스 (command pulse)가 구해진다. 이 지령펄스는 각 관절에 부착된 직류모터 위치제어용 모터의 펄스 카운트 (LS193)로 기해진다. 한편 엔코더로부터의 A 및 B상의 펄스열은 방향판별 및 동기회로를 거쳐 계환되어진다. 이들 간의 차는 순간 위치오차에 해당되는 값인데, 이것이 D/A converter 에 의해 선형으로 변환되어 서보 드라이버로 입력된다. 서보 드라이버는 PWM 방식으로 구동되며, 모터의 회전속도는 tachogenerator 에 의해 드라이버로 계환된다.

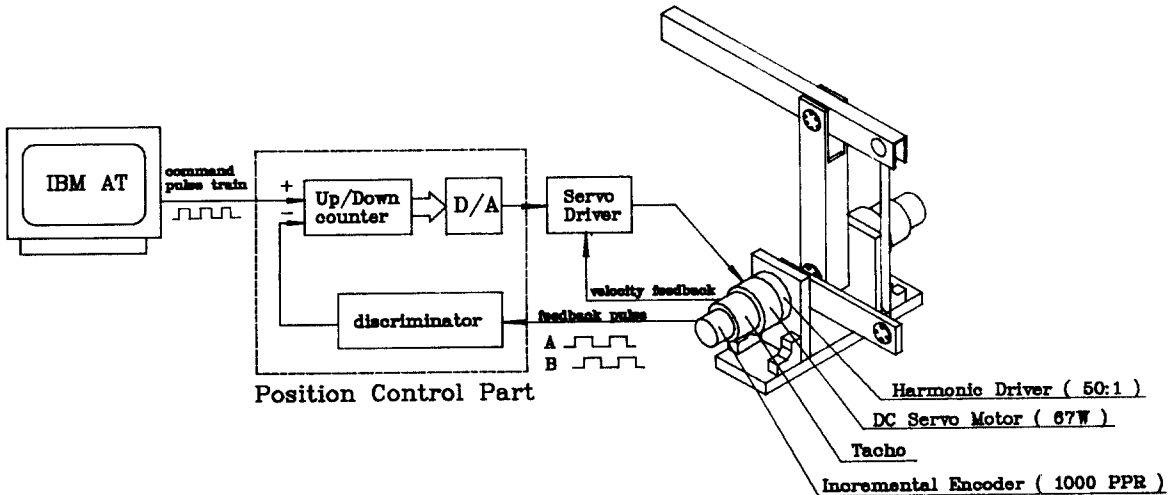


Fig.9 Schematic Diagram of Experimental System

5.3 실험결과

본 실험에 사용된 로봇의 기본해상단위(basic resolution unit)는 다음과 같다.

$$\Delta l = \frac{2\pi l}{nN} = \frac{2\pi \times (400 \text{ mm})}{1000 \times 50} = 50.265 (\mu m)$$

로봇 핸드 끝에 펜을 장착하여 이 동경로를 도시하도록 하였는데, 그림.10 은 직사각형 경로에 대해서 얻은 결과이다. 각 변당 2000 BRU 의 지령이 가해진 경우이므로, 이에 대응하여 이동한 거리는 100.512 mm 이어야 한다. 실제로 움직인 거리는, 여러번 반복한 결과 1 mm 이내의 오차를 유지하고 있었다. 모서리 부분에서 심하게 발생한 오차는 방향전환 시의 로봇 동특성에 기인한 것이다. 그림.11 은 x 및 y 축 지령의 조합에 의해 x 축에 45° 방향의 직선경로를 반복적으로 수행한 결과이다.

경로 추정오차를 알기 위해서는 광학위치 센서등을 사용하여 보다 정교하게 측정되어야 하겠지만, 본 논문에서는 좌표 역변환 알고리즘의 실현 가능성을 보여주는 위한 기초실험이므로 개괄적인 분석만을 하였다.

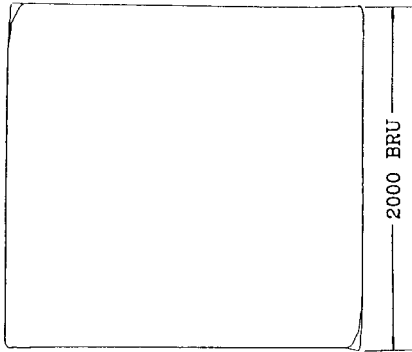


Fig.10 Experimental Result for Square Path

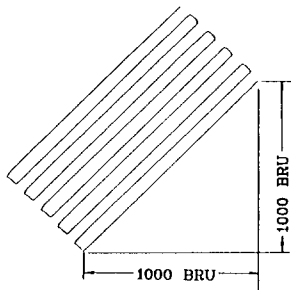


Fig.11 Experimental Result for Straight Line Path whose slope is 45°

6. 결론

링크 끝 점의 이동하는 거리를 기본해상단위(basic resolution unit)로 나누어서 무차원화 시킴으로써, 정기구학의 계산시에 삼각함수 및 곱셈의 필요성을 제거하였다. 더욱이 주어선 경로에 대해 매번 inverse Jacobian 을 계산하지 않고, 다만 몇 가지 경우에 대한 조작 테이블을 look-up 함으로써 해를 구할 수 있다. 따라서 계산속도의 향상에 많은 잇점이 있다. 이를 해는 디지털 위치제어 방식의 관절 시보에 가해질 시령필스의 형태로 얻어진다.

실제로 본 실험실에서 세척된 로봇에 적용하여 동작을 시키본 결과, 제안된 알고리즘이 유용하며 또한 구현하기가 용이함을 알 수가 있었다. 제안된 알고리즘이 좌표 역변환 문제를 풀기 위한 새로운 접근 방식이며, 전체적인 logic 이 하드웨어로 구현하기에 적절한 형태이다. 본 논문에서는 기구학적으로 단순한 형태의 로봇에 대해 적용하였지만, 이러한 방법을 보다 일반적인 형태의 로봇에 적용하기 위한 알고리즘의 연구가 계속 진행 중에 있다.

후 기

본 연구는 1988년도 과학기술처 시행, 특정연구 개발사업의 연구결과임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- [1]. Steven S. Leung, M.A. Shanblatt, "Real-Time DSK on a Single Chip," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 4, pp. 281-290, Aug. 1987
- [2]. Yusheng T. Tsai, David E. Orin, "A Strictly Convergent Real-Time Solution for Inverse Kinematics of Robot Manipulators," *Journal of Robotic Systems*, 4(4), pp. 477-501, 1987
- [3]. Wesley E. Snyder, *Industrial Robots: Computer Interfacing and Control*, Prentice-Hall, 1985
- [4]. 박시욱, 오준호 "2 관절 평면 로봇에 대한 좌표 역변환의 실시간 해법에 관한 연구," *대한기계학회 춘계학술대회*, pp. 51-54, 1988