한국공작기계학회 '99년도 추계학술대회 논문집 pp.22~26

산업용 로봇의 정밀한 방향성 생성

이 승 황* 이 건 희** 이 진 현*** 양 승 한****

Generation of Precise Orientation in an Industrial Robot

Seung-Hwang Yi*, Gun-Heai Lee**, Jin-Hyeon Lee***, Seung-Han Yang****

ABSTRACT

In general, there are many degrees of freedom (DOF) in industrial robots. That can generate several special end-effector's positions and orientations. For that reason, industrial robots are used in a wide scope of industrial applications such as welding, spray painting, deburring, and so on. In this research, new method is presented which safely maintain the desired constant end-effector's orientation and minimize the numbers of segments in path. These algorithms may apply to welding, painting, and assembling. The simulation study of straight line and circular motions in arc-welding operations is carried out to show the sure proof of these algorithms

Key Words : End-effector's Position and Orientation (엔드-이펙터의 위치와 방향), Interplolation (보간법)

1. 서 론

로봇은 경제적인 측면으로 인건비 절약과 작업환경의 개선, 제품 사양의 변화에 대한 유연성의 향상, 제품의 질적 향상 및 생산성의 향상을 가져오며, 작업 환경이 열악하고 위험한 곳에서의 사용에서 인간을 대신하여 작업을 수행할 수 있음으로 산업현장의 자동화에서 그 위치가 높아지고 있다. 그러나, 로봇의 운동 특성은 비선형이고 각축이 연계가 되어 있어 상당히 풀기 어려운 문제이다. 이러한 문제에 대해서 많은 연구가 되었다.

Paul[1]는 로봇의 엔드-이펙트의 공간상 경로에 대해 반복적으로 역기구학(Inverse Kinematic)을 구하여서 공간상의 직선경로를 생성하였고, Whitney[2]는 "Resolved motion rate control"에서 역자코비안 행렬(Inverse Jacobian Matrix)을 반복적으로 구하고 공간상의 경로에서 벗어나지 않도록 각 샘플링 시간마다 공간상의 위치를 계산하여서 그 오차를 줄이도록 하였다. Luh 와 Lin[3]은 공간상의 경로에 대응하는 조인터 좌표를 안다는 가정하에서 조인터 공간상을 여러 다항식으로 보간함으로서 각 보간함수에 따른 오차를 보여주고 있다. Taylor[4]는 직선경로에 대해서 한정된 오차를 만족하면서 직선을 따라가도록 직선을 반분법으로 나누어서 직선상의 노트점을 구하는 알고리듬을 제안하였다. Markus Varsta, Pasi Koikkalainen[7]은 CAD data를 바탕으로 Neural Network을 사용하여 페인팅 작업 방법을 제시하고 있다. 그러나 이들 연구들은 구체적으로 작업경로상에서 발생하는 세부적인 엔드-이펙터의 방향은 고려하고 있지 못했다. 실제로 엔드-이펙트의 방향성은 여러 산업현장에서-용접, 페인팅, 조립등- 중요시 되고 있다. 본 연구에한 방향을 유지하는 방법과 허용 오차를 만족하는 최소 segment의 수를 만족하는 경로 생성방법을 제시하고 있다.

따라서 본 연구에서는 파라메트릭 직선과 곡선경로에 대하여 연속적인 아크 용접시 혹은 위에서 언급한 많은 작업들에서 일정한 엔드-이펙터

의 방향을 생성할 수 있는 알고리듬과 최소 segments 수를 가진 경로을 생성할 수 있는 알고리듬들을 소개하고, 이 알고리듬들의 타당성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 뒷받침 하고자 한다

2. 엔드-이펙터의 경로 생성

2.1 로봇의 위치와 방향 표현

로봇의 엔드-이펙터의 위치와 방향은 4×4 균질 변환 행렬에 의해서 표시된다.

$$H(t)=\begin{bmatrix} \bar{n}(t) & \bar{s}(t) & \bar{a}(t) & \bar{p}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1)$$

$\bar{n}(t)$: normal vector, $\bar{s}(t)$ slide vector,

$\bar{a}(t)$ approach vector,

$\bar{p}(t)$ position vector.

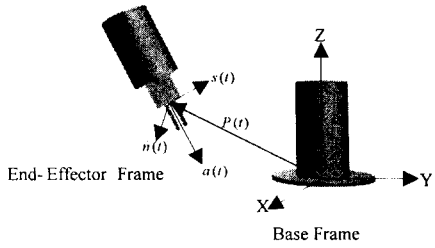


Fig. 1. End-effector's 위치와 방향

여기서 (1)식으로 정의된 행렬을 손행렬(hand matrix)라 하며, 이 행렬은 축의 개수와 같은 행렬의 곱이며, 기준 좌표계에 대한 엔드-이펙터의 최종적인 위치와 방향을 나타낸다. 그림(1)은 손행렬를 도식화한 것으로서 로봇의 기준좌표계에서 최종적인 엔드-이펙터의 방향과 위치를 나타낸 것이다. 엔드-이펙트의 방향과 위치는 순기구학식과 역기구학식을 이용하여 구할 수 있다.

파라메트릭 곡선이 $P_d(t)=[x(t),y(t),z(t)]$으로 주어진다면 위의 H의 $\bar{p}(t)$와 $\bar{p}_d(t)$가 일치한다면 로봇은 정확하게 곡선을 따라갈 것이다. 그렇게 하기 위해서는 무한히 많은 곡선의 점데이타를 조인터 좌표상으로 변환하여야 하지만 그것은 비현실적이다.

Segment란 로봇이 허용오차를 만족하는 가운데 이동할 수 있는 길이로 정의한다. 임의의 길이를 가진 경로에서 허용오차를 만족하는 segment의 수가 많아지면 동작 속력은 작아진다. 그러므로 최소한의 segment 수는 최대한의 작업 성과를 달성할 수 있다.

로봇의 보간에 사용되는 여러 보간 함수들은 각각의 장단점을 가지고 개선되어 왔다. 보간 함수들에게 있어서 특징은 로봇의 운동을 부드럽고 연속적으로 진행되게 만드는 것이다.

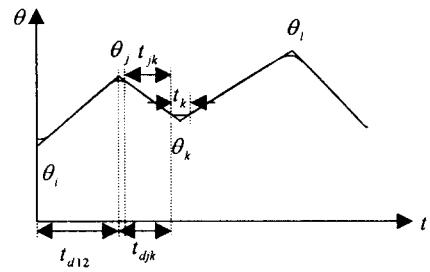


Fig 2 Multisegment linear path with blends.

이러한 함수중에서 보다 개선된 로봇의 경로계획에 사용되는 함수로서 경유점을 가진 경로에 포물선을 혼합한 직선 함수(그림2)가 사용되고 있다.

2.2 엔드-이펙터의 일정한 방향생성

일정한 방향성을 가진 경로을 생성하기 위한 이러한 방법은 속도와 가속도를 제한조건으로 포함하여 개발되었다. 먼저 일정한 방향성을 생성하기 위하여 2축 로봇에 대하여 고려해보자.

Fig. 3에서 첫 번째와 두 번째의 조인트의 각을 각각 θ_{10}, θ_{1i}, θ_{11}와 θ_{20}, θ_{2i}, θ_{21}로 각각 정의하였다. 여기서 아래 첨자 i는 초기각(0)과 최종각(1)와의 임의의 시간대에 있는 각각의 축에서의 각을 말한다. 먼저 첫 번째 조인트의 포물선이 포함된 부분의 시간이 두 번째 조인트의 시간보다 작다고 가정하자. 만약 조인트의 변화량 $\Delta\theta_2$이 $\Delta\theta_1$가 같다면 엔드-이펙트의 방향성이 변하지 않는다. 그렇지 않을 경우에는 중간지점에서의 방향성은 아래에 보여줄 식으로 구할수

있다.

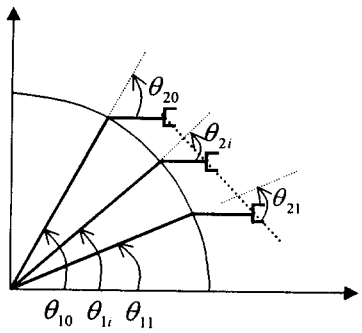


Fig. 3 Basic strategy of orientation interpolation

그림(4)에서 직선 보간 함수(a)를 이용한 것과 임의의 보간 함수(b)를 이용하여 보간하는 것을 도식화 하였다. 시간의 변화에 따라 각각의 조인트가(1, 2 조인터) $\theta_0(t)$, $\theta_1(t)$ 로 변하고, 이러한 변화는 θ_{10}, θ_{11}, t_{dab}와 t의 항으로 표현할 수 있다.

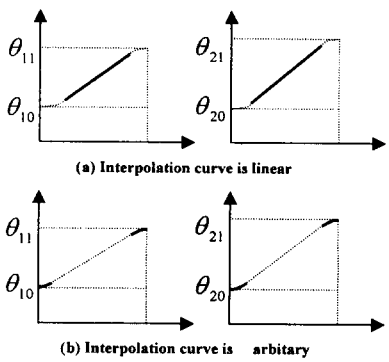


Fig. 4 The linear function with parabolic blends for a path with via points

먼저 직선 보간 함수의 경우에는

$$\theta_1(t) = \theta_{10} + \frac{(\theta_{11} - \theta_{10})}{t_{dab}} \times t \qquad (3\text{-}1)$$

$$\theta_2(t) = \theta_{20} + \frac{(\theta_{21} - \theta_{20})}{t_{dab}} \times t \qquad (3\text{-}2)$$

여기서 만약 $t = \alpha \times t_{dab}$ $(0 < \alpha < 1)$이라면, 조인트 1과 2의 각 변화량은 다음과 같이 표시되어 지고

$$\theta_{1i} = \alpha \times (\theta_{11} - \theta_{10}) + \theta_{10} \qquad (4\text{-}1)$$

$$\theta_{2i} = \alpha \times (\theta_{21} - \theta_{20}) + \theta_{20} \qquad (4\text{-}2)$$

임의의 지점에서 조인트 변화량은 아래와 같다.

$$\Delta\theta_1 = \theta_{1i} - \theta_{10} = \alpha \times (\theta_{11} - \theta_{10}) \qquad (5\text{-}1)$$

$$\Delta\theta_2 = \theta_{2i} - \theta_{20} = \alpha \times (\theta_{21} - \theta_{20}) \qquad (5\text{-}2)$$

$$\frac{\Delta\theta_2}{\Delta\theta_1} = \frac{\theta_{21} - \theta_{20}}{\theta_{11} - \theta_{10}} = K \qquad (6)$$

그러므로 직선 보간함수에 대하여 다음과 같은 식으로 2번 조인트의 각을 구할 수 있다.

$$\theta_{2i} = K \times (\theta_{1i} - \theta_{10}) + \theta_{20} \qquad (7)$$

다음으로 그림 4(b)에서와 같이 보간 함수를 3차 다항식으로 가정하면

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \qquad (8)$$

위 (8)식에서 각각의 계수를 찾기 위해서 속도와 위치에 대한 구속조건을 구한다.

$$\theta_1(0) = \theta_{10},\ \theta_2(0) = \theta_{20},\ \theta_1(t_d) = \theta_{11},\ \theta_2(t_d) = \theta_{21} \qquad (9\text{-}1)$$

$$\dot{\theta}_0(0) = 0,\ \dot{\theta}_1(0) = 0,\ \dot{\theta}_0(t_d) = 0,\ \dot{\theta}_1(t_d) = 0 \qquad (9\text{-}2)$$

직선 보간의 경우와 마찬가지로 풀면

$$\Delta\theta_{1i} = \alpha^2 \times (\theta_{11} - \theta_{10}) \qquad (10\text{-}1)$$

$$\Delta\theta_{2i} = \alpha^2 \times (\theta_{21} - \theta_{20}) \qquad (10\text{-}2)$$

$$\frac{\Delta\theta_2}{\Delta\theta_1} = \frac{\theta_{21} - \theta_{20}}{\theta_{11} - \theta_{10}} = K \qquad (11)$$

$$\theta_{2i} = K \times (\theta_{1i} - \theta_{10}) + \theta_{20} \qquad (12)$$

3차 보간함수를 이용한 보간법에서도 역시 직선 보간 함수를 사용했을때와 같은 결과를 얻었다. 이는 임의의 다른 곡선을 보간함수로 사용하여도 직선에 대하여 유도된 식과 동일한 식이 된다. 다음으로 이렇게 구해진 식(7)과 식(12)에서 아래와 같은 일반식으로 유도되어 직선과 곡선의 보간함수에 사용되어질 수 있다.

$$\theta_{ji} = K \times (\theta_{ri} - \theta_{r0}) + \theta_{j0} \qquad (13)$$

여기서 $K = \frac{\Delta\theta_j}{\Delta\theta_r}$, i는 순차적으로 변화는 중간 지점, r는 기준 조인트, 즉 이전의 조인트이며 j는 1, ..., 6조인트로 각 노트의 초기 조인트 각을 나타내며 j는 r과 일치하지 않으며, 최종적으로 (13)식은 로봇 엔드-이펙터의 방향을 일정하게 유지할 수 있는 방법이 된다

2.3 최소 segment 수의 경로 생성

파라메트릭 곡선(직선포함)에 대한 최소 segment수를 가진 경로를 생성하는 방법은오차를 정의하고 정의된 최대 오차범위내에 엔드-이펙트의 경로가 지나도록 하는 것이다.

먼저 오차의 정의는 공간상의 곡선에 대해서 원통형 오차(cylinderical error)를 정의한다. 오차를 계산하기 위해서 Taylor[4]에 따르면 각 segment의 중간지점 또는 그 근처에서 최대 오차가 발생한다. 본 연구에서는 이 가정을 이용하여서 최대 오차점을 찾아냈다.

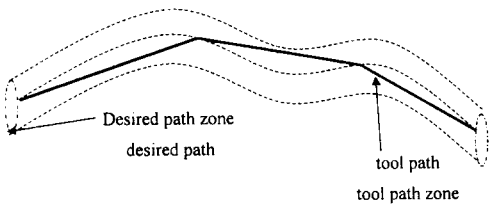


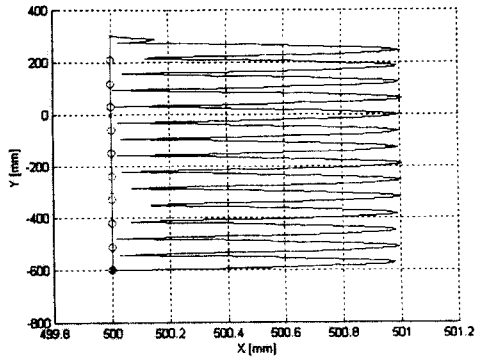
Fig. 5 cylinderical error

오차가 정의되고 그 계산법이 결정되었으므로 곡선상에서 파라메트를 변화시켜 가면서 반복법을 이용하여서 최대 오차를 만족하는 노트점을 찾았다.

3. 시뮬레이션

대상 로봇은 PUMA 560[8] 로봇을 이용한 공간상의 직선경로에 대한 시뮬레이션을 보여주고 있다. (1) 직선경로(500, -600, 0)에서 (500, 300, 0)[mm], 최대 허용 오차 : 1 [mm]인 것과 (2) (430, 500, 0), (480, 500, 0), (530, 450, 0), (530, 400,0)의 4점을 제어점으로 하는 베이지어 곡선에 대해서 같은 오차를 적용하여 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

방향성 오차를 계산하기 위해서, 파라메터가 0인 값에서의 방향성을 구하고 그 방향을 고정 좌표로 하여서 파라메트의 값이 1까지 변할때 변화량을 고정 좌표계에 대한 Roll, Pitch, Yaw의 값을 degree로 나타내었다.



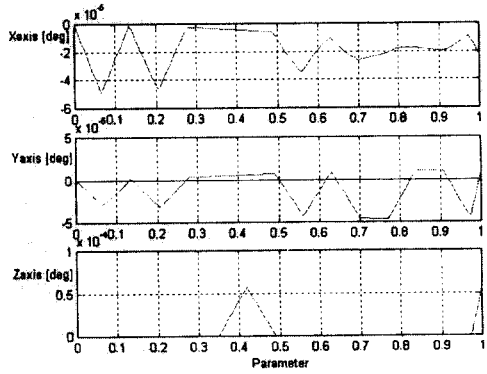
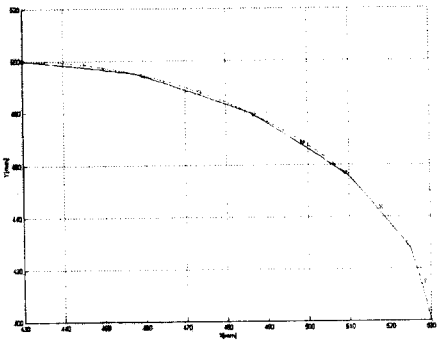


Fig. 6 Cartesian straight path and orientation error



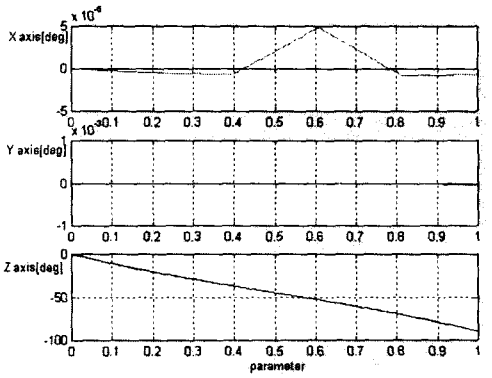


Fig. 7 Cartesian Circular path and orientation error

4. 결론

본 연구에서 경유점을 가진 경로에 포물선을 혼합한 직선 함수를 보간 함수로 사용하여 아크용 접시, 혹은 일정한 앤드-이펙터의 방향을 생성하여야 좋은 결과를 얻을 수 있는 여러 작업에서 문제점으로 제시될 수 있는 엔드-이펙터의 방향을 보다 안정되게 만들 수 있는 알고리즘을 사용하여 로봇에 대한 시뮬레이션 결과 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

① linear interpolation with parabolic blend를 기본으로 하여 엔드-이펙터의 방향을 일정하게 유지할 수 있는 조인트 공간 상에서 새로운 보간 방법을 개발하였다.

② 가변적으로 변화하는 최소 segment를 결정 방법을 유도하여 segment의 갯수를 줄일 수 있었다. 이 방법은 불필요한 계산을 줄일 수 있어 보다 단순화된 작업을 수행할 수 있다.

③ 본 연구의 컴퓨터 시뮬레이션에서 사용한 PUMA 560 로봇뿐만 아니라, 회전 조인트를 가진다른 로봇에서도 적용이 가능하다. 본 연구에서 제시한 알고리즘은 회전 조인트의 형식이고 조인트의 각변화와 상관없이 조인트의 형식이 같은 로봇은 범용적으로 사용가능하다.

5. 참고 문헌

1. R. P. Paul. "Manipulator Cartesian Path Control." IEEE Trans. on Syst. Man. Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 11, 1979

2. D. E.,Whitney, "Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prostheses." IEEE Trans. on Man-Machine Systems. Vol. MMC-10, No. 2, 1969

3. J.Y.S. Luh and C.S. Lin, "Approximate joint Trajectories for Control of Industrial Robots Along Cartesian Paths." IEEE Tran. on Syst, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-14, No. 3, 1984

4. R. H. Taylor, "Planning and Execution of Straight Line Manipulator Trajectories", IBM J. Res., Develop,. Vol. 23, No. 4, 1979

5. J.Y.S. Luh and C.S. Lin, "Formulation and Optimization of Cubics Polynomial Joint Trajectories for Industrial Robots", IEEE Trans on Automatic Control, Vol.AC-28, NO.12, 1983.

6. B. Benhabib, A. A. Golgenberg, R.G. Fenton "Optimal Continuous Path Planning for Seven-Degree-of-Freedom Robots." Journal of Engineering for industry Vol. 108 Trans. of ASME. 1986

7. Markus Varsta, pasi Koikkalainen, "Surface modeling and Robot Path Generation Using Self-Organization", Proceeedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition -Vol 4 , IEEE Computer Society

8. C.S.G. Lee, M. Ziegler, "Geometric Approach in Solving Inverse Kinematics of PUMA Robots", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Sys. ,Vol. AES-20, No. 6, 1984

9. John J, Craig, "Introduction to Robotics Mechanics and Control", Chap. 7, pp 240-244.

10. K.Feldmann, S.Krimi, "Alternative Placement Systems for Three-Dimensinal Circuit Boards", Annals of the CIRP Vol. 47. 1998.