

3차원 스캐너의 측정 자동화를 위한 수직 다관절로봇의 역기구학 해석

육경환*(연세대 기계공학과), 한성준(연세대 기계공학과),
양현석(연세대 기계공학과), 장민호(㈜솔루션닉스)

Inverse kinematics analysis of 6R serial manipulator
for the automation of 3D scanner measurement

G. H. Yuk(Mech. Eng. Dept., Yonsei Univ.), S. J. Han(Mech. Eng. Dept., Yonsei Univ.),
H. S. Yang(Mech. Eng. Dept., Yonsei Univ.), M. H. Jang(Solutionix)

ABSTRACT

As 3D scanner develops, it can be used in measurement. To accomplish complete 3D measurement, the scanner has to view different sides of the target. It can be done by moving the scanner and fix it at every measuring point. By human, it would take so much time. However, by using robot, measuring time can be reduced and the procedure can be automated. It is suitable for 6R serial manipulator to do this kind of work in which the scanner should go any position in arbitrary orientation. We did inverse kinematics analysis by analytical and graphical methods. Then, we compared two methods.

Key Words : Inverse kinematics (역기구학 해석), Serial robot (수직다관절로봇), 3D scanner (3차원 스캐너)

1. 서론

3D 스캐너의 성능이 좋아짐에 따라 활용할 수 있는 범위가 넓어지게 되었다. 단순히 물체의 3차원 캐드 데이터를 얻어내는 것이 아니라 측정된 데이터로 제품을 검사할 수 있는 수준에 이르게 되었다. 캐드 데이터를 기반으로 제품을 만들게 되면, 3D 스캐너로 만들어진 제품을 측정하여 측정 데이터를 얻고 이를 원래의 캐드 데이터와 비교하여 제품의 완성도를 평가할 수 있다.

그러나 현재의 3D 스캐너는 측정하는데 시간이 걸린다. 측정 위치마다 스캐너를 옮겨가며 고정시키는 작업을 수행하여야한다. 따라서 한 물체를 완전히 측정하기 위해서는 많은 시간이 필요하며, 모든 측정 과정 동안 사람이 있어야한다. 측정 과정을 자동화 할 수 있다면 시간과 인력을 절약할 수 있으리라 생각한다.

본 연구에서는 측정 과정의 자동화를 위해서 측정 위치마다 스캐너를 옮겨줄 수 있는 로봇을 사용

한다. 공간상에 임의의 위치에 임의의 자세로 End-effector를 이동시킬 수 있으려면 6자유도를 가진 로봇이어야 한다. 로봇을 크게 분류하면 직렬형 로봇과 병렬형 로봇이 있다. 본 연구에서는 넓은 작업 영역을 필요로 하기 때문에 직렬형 로봇을 선택하였다. 따라서 본 연구에서는 6축 수직 다관절 로봇을 사용하였다.

로봇의 조인트를 회전시켜서 End-effector가 공간상의 어떤 위치로 가게 될지 계산하는 것은 단순한 행렬들의 곱으로 구할 수 있다. 그러나 역으로 공간상의 임의의 위치에 가기 위해서 조인트를 얼마나 회전시킬지를 계산하는 것은 간단한 일이 아니다. 삼각함수들의 곱으로 이루어진 비선형 연립 방정식을 풀어야 하기 때문이다. 이를 해결하는 방법으로 수치해석을 할 수도 있고, 해석적으로 방정식을 풀 수도 있으며, 도식적으로 해석하기도 한다. 해석적인 방법과 도식적인 방법은 마지막 세 조인트의 축이 만나는 wrist point가 존재하는 로봇의 경우에만 가능하다. 본 연구에 사용한 로봇은 wrist point가 존재하

는 로봇이기 때문에 해석적인 방법과 도식적인 방법 모두 사용 가능하다. 따라서 본 연구에서는 두 가지 방법으로 해석하고 실험해보았으며 해석 과정 및 특징을 바탕으로 두 방법을 비교해보았다.

2. 로봇의 구조

2.1 Robot system

로봇 시스템은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 6축 수직다관절 로봇과 로봇을 구동하기 위한 MMC (Multi-Motion Controller), 로봇 제어 프로그램의 세 가지이다.

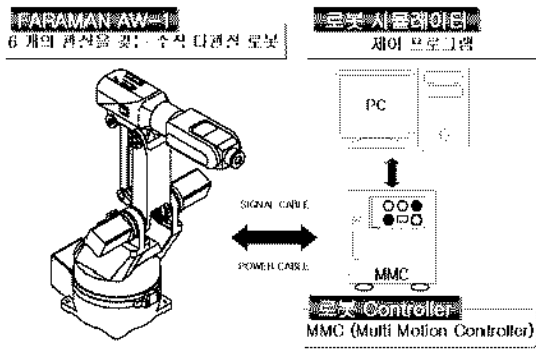


Fig. 1 Robot system

로봇은 삼성 FARAMAN-AW1을 사용하였다. 이 로봇은 6개의 회전 조인트로 이루어져 있으며, 각 조인트에는 8192 P/R Absolute encoder가 장착되어있다. MMC는 삼성의 MMC 보드를 사용하였으며 PC와 연결하여 사용하였다. 제어 프로그램은 MMC가 제공하는 library를 사용하여 C언어로 작성하였다.

2.2 DH parameters

로봇을 해석할 때 각 링크의 정보를 표현할 때 Denavit-Hartenberg의 방법을 많이 쓴다. 본 연구에서도 이 방법을 택하여 해석에 사용하였다. 해석 대상 로봇의 링크 구조를 간략하게 표현하면 Fig. 2와 같다.

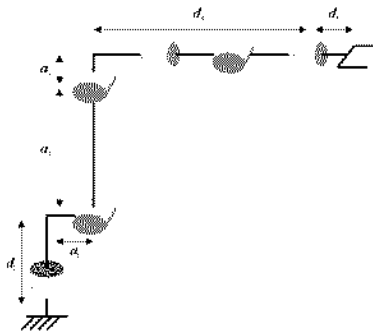


Fig. 2 Free body diagram of the robot

위의 그림으로부터 FARAMAN-AW1의 DH parameter를 구하면 Table 1과 같다.

Joint #	α (degree)	a (mm)	d (mm)
1	-90	150	500
2	0	450	0
3	90	-115	0
4	-90	0	750
5	90	0	0
6	0	0	95

Table 1 DH parameters of FARAMAN-AW1

3번째 조인트를 제외한 나머지 조인트는 모터가 직접 축에 연결되어 구동된다. 하지만 3축은 4-bar 메카니즘을 사용하여 2축 구동 모터에 대칭되는 위치에 놓인 모터로 구동된다.

3. 역기구학 해석

3.1 Analytical Method

수직 다관절 로봇의 순기구학 해석을 수행하여 End-effector의 위치를 조인트의 회전각으로 표현하면 사인과 코사인으로 이루어진 비선형 함수가 얻어진다. 역기구학 해석은 End-effector의 위치를 알고 그에 상응하는 조인트의 값을 구하는 것이다. 따라서 역기구학 해석을 위해서는 연립 비선형 방정식을 풀어야한다. 일반적인 경우에는 해석적인 해가 없지만, 로봇의 세 축이 만나는 점인 wrist point가 있다면 해석적인 해가 존재한다. 따라서 본 연구에서 해석적 해를 구해보았다.

3.1.1 DH Transform matrices

DH Transform matrix는 두 연속적인 링크의 좌표계의 상관관계를 나타내 준다. $i-1$ 번째 링크와 i 번째 링크의 관계를 나타내면,

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -ca_i s\theta_i & sa_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & ca_i c\theta_i & -sa_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & sa_i & ca_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이와 같이 나타낼 수 있다. 이 행렬을 사용하여 End-effector의 위치를 고정좌표계에서의 값으로 표현하면 매우 복잡한 식이 된다. 따라서 wrist point를 구하여 이 점을 기준으로 풀어나간다.

3.1.2 Wrist center position

Fig. 3에서와 같이 마지막 세 조인트의 축이 만나는 점을 wrist center point P라고 잡는다. 이렇게 하면 마지막 세 축의 회전은 점P의 위치에 영향을 주지

않는다.

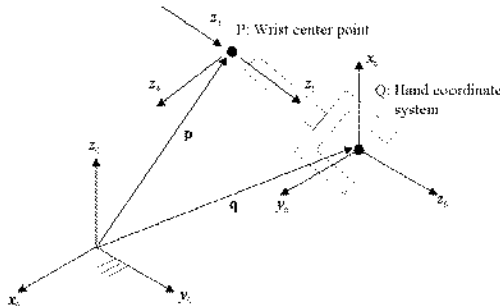


Fig. 3 Wrist center point P

End-effector 좌표계에서 표현된 점P의 위치는

$$p_6 = \overline{QP} = [0, 0, -d_6, 1]^T$$

라고 표현할 수 있다. 고정 좌표계에서 표현된 점P의 위치는

$$p_0 = \overline{OP} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_x - d_6\omega_x \\ q_y - d_6\omega_y \\ q_z - d_6\omega_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

라고 표현할 수 있다. 따라서 주어진 End-effector의 위치로부터 점P의 위치를 찾아낼 수 있다. 3축에서 표현된 점P의 위치는

$$p_3 = [0, 0, d_4, 1]^T$$

와 같이 표현할 수 있다. 이를 고정 좌표계에서의 위치로 변환시키기 위해

$$p_0 = {}^0A_3 p_3 \quad (1)$$

의 관계식을 이용하여 세 개의 미지수를 가진 세 개의 방정식을 구할 수 있다. 따라서 이를 통해 위치와 자세를 분리하여 생각할 수 있다.

3.1.3 Solutions of Θ_1 , Θ_2 and Θ_3

0A_1 의 역행렬을 식(1)의 양변에 곱한 후 정리하면 아래와 같은 연립 방정식을 얻을 수 있다.

$$p_x c\theta_1 + p_y s\theta_1 - a_1 = a_2 c\theta_2 + a_3 c\theta_{23} + d_4 s\theta_{23} \quad (2)$$

$$d_1 - p_z = a_2 s\theta_2 + a_3 s\theta_{23} - d_4 c\theta_{23} \quad (3)$$

$$p_y c\theta_1 - p_x s\theta_1 = 0 \quad (4)$$

식(4)로부터 θ_1 의 값을 구하면,

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{p_y}{p_x} \quad (5)$$

를 얻을 수 있다. 식(2), 식(3), 식(4)의 양변을 제곱하여 세 식을 모두 더하여 정리하면,

$$k_1 s\theta_3 + k_2 c\theta_3 = k_3 \quad (6)$$

를 얻을 수 있다. 여기서 k_1, k_2, k_3 는 모두 아는 값들

로 이루어져있어 θ_3 만의 식이 된다. 식(6)을 θ_3 에 대하여 풀면,

$$\theta_3 = 2 \tan^{-1} \frac{k_1 \pm \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}}{k_2 + k_3} \quad (7)$$

을 얻을 수 있다. θ_1 과 θ_3 을 알게 되었으므로 식(2)와 식(3)을 전개하여 정리하면,

$$A c\theta_2 + B s\theta_2 = E$$

$$C c\theta_2 + D s\theta_2 = F$$

의 연립방정식을 얻을 수 있다. 여기서 $c\theta_2$ 와 $s\theta_2$ 에 대해 방정식을 풀면,

$$\theta_2 = A \tan 2(s\theta_2, c\theta_2) \quad (8)$$

을 얻을 수 있다.

3.1.4 Solutions of Θ_4 , Θ_5 and Θ_6

1, 2, 3축의 각을 위와 같이 구하였다. 따라서 0A_3 행렬의 원소는 모두 아는 값이다. 나머지 세 축의 각을 구하기 위해 아래와 같은 관계식을 쓴다.

$$({}^3A_6) = ({}^0A_3)^{-1} ({}^0A_6) \quad (9)$$

식(9)를 정리하면 우변은 모두 아는 값이고 좌변은 미지수 3개로 이루어진 연립방정식이 만들어진 다. 3A_6 을 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} c_4 c_6 c_6 - s_4 s_6 & -s_4 c_6 - c_4 c_6 s_6 & c_4 s_6 & d_6 c_4 s_6 \\ s_4 c_6 c_6 + c_4 s_6 & c_4 c_6 - s_4 c_6 s_6 & s_4 s_6 & d_6 s_4 s_6 \\ -s_6 c_6 & s_6 s_6 & c_6 & d_4 + d_6 c_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

식(10)의 3행 3열에서 θ_5 를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\theta_5 = \cos^{-1} r_{33} \quad (11)$$

θ_5 의 값을 구한 후 1행 3열과 2행 3열을 연립하여 θ_4 에 대하여 정리하면,

$$\theta_4 = A \tan 2(s\theta_4, c\theta_4) \quad (12)$$

와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이와 같은 방법으로 3행 1열과 3행 2열을 연립하여 θ_6 에 대하여 정리하면,

$$\theta_6 = A \tan 2(s\theta_6, c\theta_6) \quad (13)$$

의 식을 얻을 수 있다.

식(1)에서 식(13)까지의 과정을 통해 공간상의 임의의 위치에 임의의 자세로 가기 위해서 각 축에서 필요한 회전각을 계산할 수 있다.

3.2 Graphical Method

지금까지 해석적인 방법으로 역기구학 해석을 해 보았다. 해석적인 방법에서 수행하였던 복잡한 연립 방정식의 계산을 하지 않고 로봇의 기하적 형상으로부터 역기구학 해석을 해보았다. 이 방법 또한 로봇의 wrist point를 기준으로 나누어 해석한다. Wrist point는 3.1.2절에서 사용한 방법과 같은 방법으로 구

한다.

3.2.1 Solutions of Θ_1 , Θ_2 and Θ_3

Θ_1 부터 Θ_3 까지의 값들은 End-effector의 위치를 결정해주는 역할을 한다.

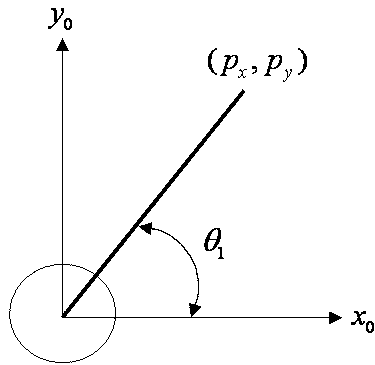


Fig. 4 Diagram for joint 1

Fig. 4에서 Θ_1 의 값을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\theta_1 = \text{Atan2}(p_y, p_x) \quad (14)$$

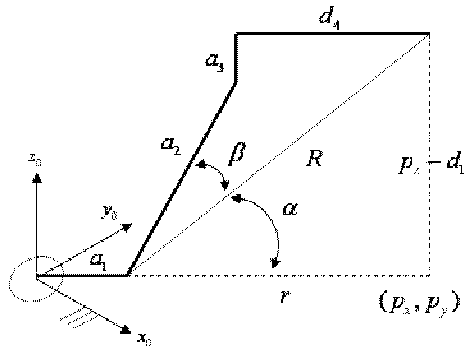


Fig. 5 Diagram for joint 2

Fig. 5에서 정의하고 있는 여러 값들은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{p_x^2 + p_y^2} - a_1 \\ R &= \sqrt{r^2 + (p_z - 500)^2} \\ \sin \alpha &= -\frac{p_z - 500}{R} \\ \cos \alpha &= \frac{r}{R} \\ \cos \beta &= \frac{a_2^2 + R^2 - (d_4^2 + a_3^2)}{2a_2R} \\ \theta_2 &= \alpha - \beta \end{aligned} \quad (14)$$

α 와 β 의 값을 구하는데 필요한 변수들의 값은 모두 알고 있는 값이다. 따라서 식(14)의 관계식으로

부터 Θ_2 를 구할 수 있다. 로봇의 자세에 따라 β 값을 더하거나

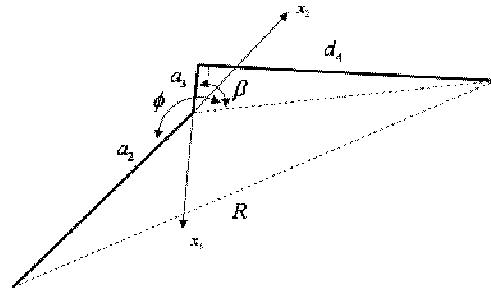


Fig. 6 Diagram for joint 3

Fig. 6에서 x_2 벡터가 x_3 벡터까지 회전하는 각이 Θ_3 가 된다. 이를 구하기 위해서는 ϕ 와 β 값을 아래와 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \sin \beta &= \frac{d_4}{\sqrt{a_3^2 + d_4^2}} \\ \cos \beta &= \frac{|a_3|}{\sqrt{a_3^2 + d_4^2}} \\ \cos \phi &= \frac{a_2^2 + d_4^2 + a_3^2 - R^2}{2a_2\sqrt{a_3^2 + d_4^2}} \\ \sin \phi &= -\sqrt{1 - \cos^2 \phi} \\ \theta_3 &= \phi - \beta \end{aligned} \quad (15)$$

β 와 ϕ 를 구하는데 필요한 변수들은 모두 알고 있는 값이다. 따라서 식(15)의 관계식으로부터 Θ_3 를 구할 수 있다.

3.2.2 Solutions of Θ_4 , Θ_5 and Θ_6

Θ_4 부터 Θ_6 까지의 값들은 End-effector의 자세를 결정해주는 역할을 한다. Θ_4 의 값을 구하기 위해서는 z_4 벡터를 알아야 한다. z_4 벡터는 z_3 벡터와 w 벡터의 외적으로 구한다. 그러나 z_4 벡터의 값은 wrist의 형상에 따라 방향이 반대로 계산될 수 있다. wrist의 두 가지 형상은 Fig. 7과 같다.

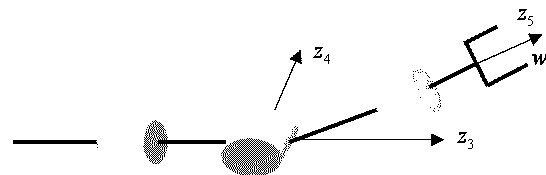


Fig. 7(a) Wrist down

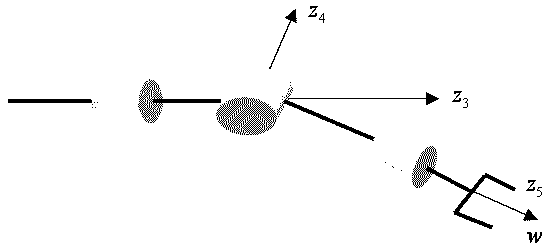


Fig. 7(b) Wrist up

원하는 형상에 맞추어 z_4 벡터를 구하면 Fig. 8 과 같이 θ_4 를 구할 수 있다.

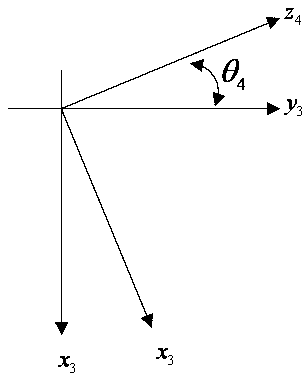


Fig. 8 Diagram for joint 4

$$\begin{aligned} \sin\theta_4 &= -(z_4 \cdot x_3) \\ \cos\theta_4 &= z_4 \cdot y_3 \end{aligned} \quad (16)$$

위와 같이 z_4 벡터가 정한 후 같은 방법으로 θ_5 , θ_6 를 구할 수 있다. Fig. 9와 같이 5번째 조인트의 좌표계와 End-effector의 좌표계의 벡터들이 이루는 각으로부터 아래와 같이 θ_5 를 구한다.

$$\begin{aligned} \sin\theta_5 &= w \cdot z_4 \\ \cos\theta_5 &= -(w \cdot y_4) \end{aligned} \quad (17)$$

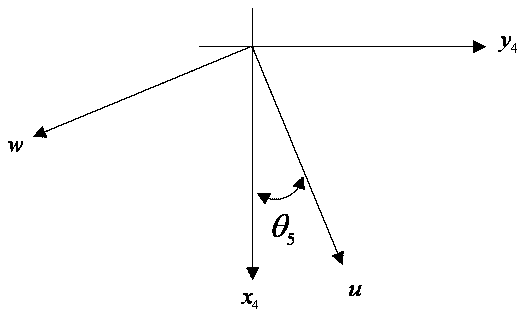


Fig. 9 Diagram for joint 5

위에서 구한 θ_5 로 6번째 조인트의 좌표계를 구할 수 있다. 좌표계를 구하면, θ_5 를 구할 때와 같은 방법으로 θ_6 를 구한다.

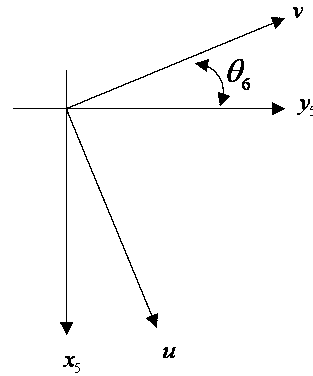


Fig. 10 Diagram for joint 6

$$\begin{aligned} \sin\theta_6 &= u \cdot y_5 \\ \cos\theta_6 &= v \cdot y_5 \end{aligned} \quad (18)$$

식(14)부터 식(18)까지의 과정을 통해 공간상의 임의의 위치에 임의의 자세로 가기 위해서 각 축에서 필요한 회전각을 계산할 수 있다.

4. 두 가지 방법의 비교

지금까지 해석적 방법과 도식적인 방법으로 역기구학 해석하는 과정을 자세히 살펴보았다. 두 방법은 해를 구하는 방법이 전혀 다르지만 같은 결과를 준다. 그러나 비록 결과는 같지만, 실제 계산 과정은 차이점이 있다.

첫째, 로봇의 형상을 결정하는 방법이 다르다. 해석적인 방법에서 쉽게 알 수 있듯이 이론적으로 8가지의 해가 존재하게 된다. 이 중 한 가지를 선택하게 되는데, 해석적인 방법에서는 8가지의 해를 구한 후 그 값을 보고 로봇의 자세와 조인트에서의 허용 회전각을 고려하여 판단한다. 도식적인 방법에서는 로봇의 자세를 먼저 정한 후 계산하게 된다.

둘째, 해석적인 방법에서는 행렬 연산을 많이 하고 도식적인 방법에서는 벡터 연산을 많이 한다. 도식적인 방법에서도 벡터를 구하는데 행렬연산을 수행한다. DH 행렬을 θ 값을 첫 번째 조인트부터 구해가며 하나씩 곱해나 가게 된다. 그러나 해석적인 방법에서는 행렬의 곱뿐만 아니라 역행렬의 연산까지 수행하게 된다. 해석적인 방법에서는 여러 가지 유도하는 과정에 따라 도식적인 방법에 비하여 연산을 많이 하게 된다.

5. 결론

지금까지 3차원 스캐너의 측정 자동화를 위하여 사용하게 되는 6축 수직다관절 로봇의 역기구학 해석을 해석적인 방법과 도식적인 방법으로 수행하였다. 두 방법이 주는 결과는 같지만 해 도출 과정에서 차이점이 있다. 해석적인 방법은 원하는 위치로 가기 위해 가능한 해가 몇 가지가 존재하며 그 중 어느 것이 조인트의 허용 범위를 벗어나는지 알기 쉽다. 도식적인 방법은 로봇의 원하는 형상을 지정해준 후 그에 따른 해를 구해내는 방식으로 해석이 진행된다. 따라서 본 연구와 같이 물체의 위치와 스캐너의 이동 범위가 주어진 경우 도식적인 방법으로 역기구학 해석을 수행하는 것이 효율적이다.

후기

본 연구는 산업자원부 중기거점기술개발사업 "Full 3D 자동 측정 기술 개발"의 위탁과제로 수행되었음.

참고문헌

1. Tsai, L. W., "Robot Analysis," John Wiley & Sons, Inc., pp. 77-85, 1999.
2. Fu, K. S., Gonzalez, R. C., Lee, S. G., "Robotics," McGraw Hill, pp. 60-75, 1989.