

## 관절의 한계 각도를 고려한 인체모델의 Workspace 생성 알고리즘

윤석현\*

### An Algorithm for Workspace of Human Model using the joint limit angle

Seok-Hyun Yoon\*

#### 요약

본 논문에서는 Forward Kinematics의 개념을 이용하여 각도변화에 따른 좌표계산 방법을 설명하고, Workspace 생성을 위한 반복적 방정식 (Recursive Equation)을 동차좌표계를 이용하여 수식으로 표현한다. 그리고 이 반복적 방정식(Recursive Equation)과 인체모델 관절의 한계 각도를 접목시켜 인체모델의 Workspace생성을 위한 알고리즘을 제시하고, 제시한 알고리즘을 이용하여 인체모델의 Workspace 생성결과를 그래픽으로 표현하였으며 알고리즘의 적절성을 보였다.

#### Abstract

This paper describes the method of calculating coordinate using Forward Kinematics and expresses the recursive equation as the numerical formula using a homogeneous coordinate for creating workspace. This paper proposes an algorithm for the workspace of human model using the recursive equation and the joint limit angle of human model, and describes the results of workspace of the human model as computer graphics.

▶ Keyword : workspace(작업공간), forward kinematics, human model(인체모델)

---

• 제1저자 : 윤석현  
• 접수일 : 2005.10.10, 심사완료일 : 2005.10.29  
\* 청강문화산업대학 컴퓨터소프트웨어과 교수

## I. 서론

CAD시스템을 이용하여 설계자가 기계를 설계하는데 있어서 사람이 조작할 대상물의 상대적 위치의 결정과 작업장의 Layout문제의 해결이 중요한 요소가 된다. 이를 위해 기본적으로 수반해야 할 점은 인체모델의 Workspace를 생성하는 것이다.

지금까지 Workspace에 대한 연구는 로봇학 분야에서 많이 이루어져 왔다. Kumar와 Waldron[1]은 Manipulator Workspace의 표면을 알아내기 위한 이론과 알고리즘을 제시하였고, Derby[2]는 3개 이상의 Revolute Joint로 구성된 Manipulator의 최대 도달점을 알아내어 작업공간을 형성하는 Workspace에 대해 연구하였다. Lee와 Yang[3]은 Workspace의 경계선을 나타내고 그 Workspace성능평가를 위한 알고리즘을 제시하였으며, Tsai와 Soni[3]는 선형최적화기법과 n-R 로봇의 Kinematics변수들과 관련된 좌표변환 방정식을 적용하여 Workspace를 생성하는 알고리즘을 제안하였다. 그리고 Yang과 Lee[4]는 Manipulator Workspace의 분석적 고찰을 시도하였다.

본 논문에서는 Yang과 Lee에 의해 제안된 Mechanical Manipulator의 Workspace생성방법과 인체관절의 한계 각도를 검토하여 새로운 Workspace생성 방법을 제안한다.

II 장에서는 Kinematics의 개념을 알아보고, III 장에서는 인체모델의 구성을 위한 구조체를 정의하여 그래픽으로 표현하며, IV 장에서는 인체모델의 Workspace생성을 위한 반복적 방정식(Recursive Equation) 및 Workspace 생성 방법을 알아본다. V 장에서는 IV 4에서 제시한 Workspace 생성방법을 이용하여 인체모델의 Workspace생성결과를 그래픽으로 표현하고, VI 장에서 결론을 맺는다.

## II. Kinematics

Kinematics는 로봇 모델 표현하는데 많이 사용되는 개념으로써 Forward Kinematics와 Inverse Kinematics로 나눌 수 있다.

Forward Kinematics는 로봇 관절들의 각도와 그 지체들의 길이를 먼저 설정해 주면 각 지체의 위치 및 방향을 결정하여 원하는 형태의 로봇 형상을 나타내는 방법이다.

Inverse Kinematics는 Forward Kinematics와 반대 개념으로 모델이 도달할 목표지점을 설정해 주었을 때 모델의 관절들의 각도를 계산하여 형상화하는 방법이다.

본 논문에서는 Forward Kinematics의 개념을 이용하여 인체모델의 Workspace를 생성하고 그 결과를 그래픽으로 표현한다.

## III. 인체모델의 구성

### 3.1 Wireframe Model

현재의 많은 상업용 CAD 시스템의 모체가 되어온 기법인 Wireframe 모델은 기본적으로 점과 선에 의해 물체를 표시하던 2차원 시스템을 3차원 공간상으로 확대한 것이다[5].

Wireframe 모델은 데이터 구조가 간단하여 메모리공간을 적게 차지할 뿐만 아니라 모델을 처리하는 데 소요되는 시간도 짧기 때문에, 예전의 3차원 CAD 시스템들은 대부분 이 모델을 사용하였다[1]. 그러나 최대의 단점은 물체를 구별하기가 어렵다. (그림 1)은 인체 모델을 Wireframe 모델로 표현한 예이다.

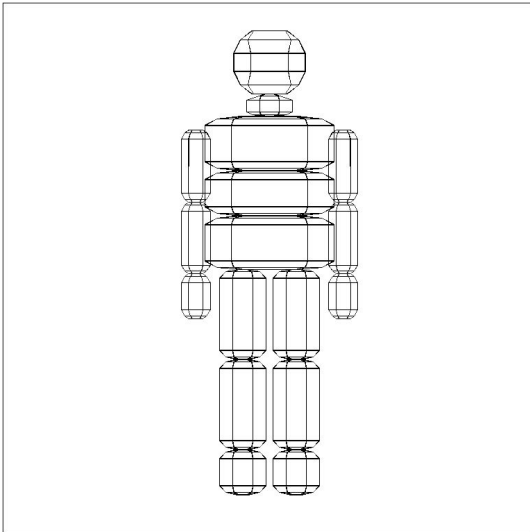


그림 1. Wireframe 모델링 기법을 이용한 인체모델  
Fig 1. Human model using Wireframe Modeling

- 방대한 데이터와 많은 계산시간이 필요하다.
- 복잡한 물체의 표현이 어렵다.
- Solid 모델의 복잡한 데이터를 다루기 위해서는 기하학적인 분석이 필요하다[5].

(그림 2)는 Solid 모델링 기법을 이용한 인체모델의 표현을 나타낸 것이다.

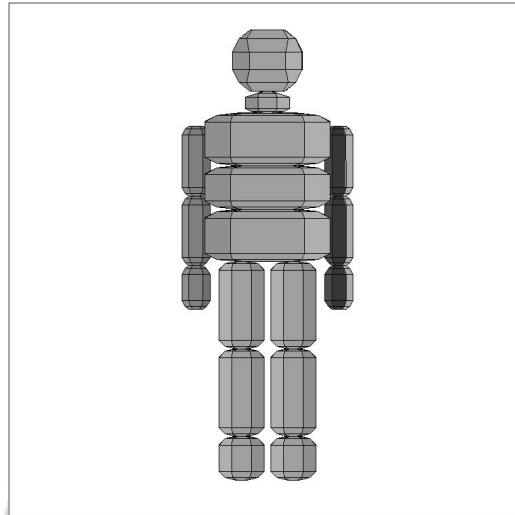


그림 2. Solid 모델링 기법을 이용한 인체모델  
Fig 2. Human model using Solid Modeling

### 3.2 Solid Model

Solid 모델은 위의 Wireframe 모델이 가지고 있는 문제점 즉, 물체의 기하학적 정보가 충분하지 못하고, 실제감을 높이기 위한 기법의 사용에 한계가 있다는 것을 극복하기 위한 방법이다. Solid 모델은 대상을 "Solid 형태", 즉 공간상의 임의의 점이 물체 내에 존재하는지 그렇지 않은지를 알 수 있는 형태로 나타낸 모델이다[5].

물체를 Solid 모델로 정의함으로써 나타나는 장점은 모델의 범용성(General Applicability)과 표현의 정확성으로 인해 모델에 대한 다양한 연산과 해석을 할 수 있다는 것이다 [1]. Solid 모델을 나타내는 방법으로는 물체를 겉모양을 중심으로 해서 표현하는 B-Rep(Boundary Representation) 과, 물체를 그래픽 기본요소와 집합연산의 결합으로 나타내는 CSG-Rep(Constructive Solid Geometry Representation) 이 있다[5].

Solid 모델은 3차원 형상을 가장 정확히 모델링할 수 있기 때문에 그 응용분야가 매우 넓다. 물체 간의 간섭검사, 부피나 면적의 계산, 그리고 컴퓨터 비전의 물체 인식 등 다양한 분야에 적용되고 있으며 요즘에는 애니메이션이나 항공기 시뮬레이션과 같은 분야로 영역이 점점 확대되어 가고 있다.

그러나 이러한 장점들을 갖고 있는 Solid 모델은 물체를 형상화하는 가장 좋은 방법이지만 다음과 같은 몇 가지 단점을 가지고 있다.

### 3.3 인체모델을 표현하기 위한 구조체

다음은 인체모델의 각 지체를 표현하기 위한 구조체와 각 지체들간의 연결성 및 움직임을 나타내기 위한 Class를 나타내고 있다.

```

struct SEGMENT
{
    int seg_num;
    XYZ w_distance;
    ANGLE ang_default;
    ANGLE ang_current;
    ANGLE ang_from;
    ANGLE ang_end;
    ANGLE ang_ratio;
    int point_num;
    XYZ *point3d;
    XYZ *wpoint3d;
    int poly_num;
    FACE *poly3d;
    int cal_flag;
};
    
```

### 3.4 인체모델의 그래픽 표현

(그림 3)은 3.3절에서 나타낸 구조체 및 Class 와 Solid Modelling 기법을 이용하여 인체모델을 X축, Y축, Z축 그리고 임의의 방향에서 관찰한 것이다. 본 연구에서의 인체 모델은 기본적으로 17개의 지체로 이루어져있지만 상체만을 이용하여 Workspace의 생성을 구현한다.

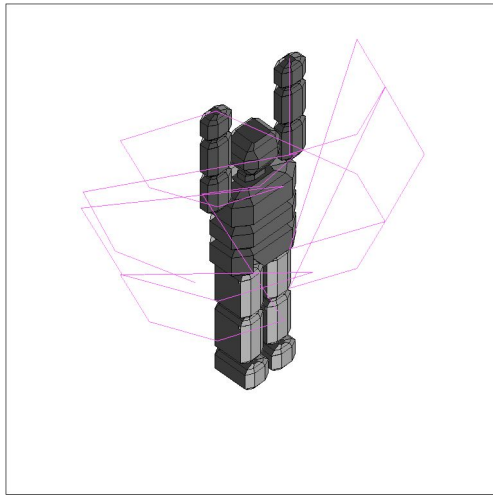


그림 3. 인체모델의 그래픽 표현  
Fig 3. Graphic of Human model

## IV. Workspace 생성

### 4.1 Workspace의 일반적 고찰

Workspace는 로봇틱스 분야에서 많이 이용하는 개념으로써 로봇트를 이용한 작업장에서의 작업도구들의 배치, 또는 작업공간의 최적화 등에 많이 이용된다. 그리고 Workspace의 표현은 모델의 성능평가에 중요한 요소일 뿐만 아니라 기하학적인 평가에 있어서 중요한 기준을 제공한다[1].

Workspace는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 Reachable Workspace이고 다른 하나는 Dextrous Workspace이다. Reachable Workspace는 인체모델의 손끝이 도달할 수 있는 모든 공간을 말하며, Dextrous Workspace는 인체모델의 손끝이 도달할 수 있으면서 임의의 Orientation

이 가능한 모든 공간을 말한다[1]. 본 논문에서 사용하는 인체모델의 Workspace는 Reachable Workspace만을 다룬다.

Workspace를 생성하는 방법에는 크게 두 가지로 나뉜다. 하나는 Extension 방법이고 다른 하나는 Sweeping 방법이다. Extension 방법은 서로 다른 방향으로 체인(Chain)을 뻗음으로써 그 때 생성되는 점들의 집합으로 나타내는 방법이다[8]. 그리고 Sweeping 방법은 먼저 손끝에서 Sweeping을 시작하여 이것을 아래 팔, 위 팔 그리고 몸통으로 Sweeping을 확장하면서 생기는 점들의 집합으로 나타낸다[5].

본 논문에서는 다음절에서 설명할 인체모델의 한계 각도를 이용한 Workspace의 생성알고리즘을 제시하고 그 알고리즘에 따른 Workspace를 생성한다.

### 4.2 인체모델의 한계각도

인체모델 관절의 회전각도는 로봇트 관절의 회전각도와는 다른 구조를 갖고 있다. 로봇트의 관절은 그 목적에 따라 다양하게 각도를 부여할 수 있다. 그러나 인체모델의 경우는 각 관절마다 수평, 수직, 그리고 자체회전을 위한 각도가 각각 다르기 때문에, 각 관절마다 다른 한계 각도를 부여하여 계산이 이루어져야 한다. 이러한 이유로 해서 로봇트의 Workspace와는 다른 형태의 Workspace가 생성된다.

<표 1>은 인체의 각 지체에 대한 각 관절의 한계 각도를 나타내고 있다[6].

표 1. 관절의 한계각도  
Table 1. limits angle of joint

	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
손 목	0	45,80	0
팔꿈치	0	0,142	-77,113
어 개	-45,134	0,180	0

### 4.3 Workspace의 분석적 표현

Forward Kinematics의 개념을 이용하여 인체모델의 Workspace를 생성하기 위해서는 각도변화에 따라 그 때의 좌표를 알아내는 것이 중요하다.

본 논문에서는 Forward Kinematics의 개념을 보다 쉽게 이용하기 위하여 절대좌표계와 상대좌표계를 적용하였다.

(그림 4)는 절대좌표계와 상대좌표계의 관계를 나타내고 있다. 그림에서처럼 기준이 되는 지체(Reference Link)의 좌표는 그에 인접한 이전의 지체를 절대좌표로 하여 상대적인 좌표로 나타내고 있다.

이와 같이 절대좌표와 상대좌표를 이용함으로써 모든 지체에 대해 Local 좌표만을 기억하고 있으면 되기 때문에 각 지체들의 모양을 쉽게 표현할 수 있다. 반면 상대좌표를 절대좌표로 변환해야하는 부가적인 계산절차가 필요하다는 것이 단점이다.

인접한 두 개의 좌표계 사이의 기하학적인 관계는 동차변환  $[A]_n$ 에 의해 표현될 수 있다. n좌표계의 Z축을 기준으로  $\gamma$ , X축을 기준으로  $\beta$ , Z축을 기준으로  $\alpha$ 만큼 차례로 n좌표계를 회전한다. 그런 후 서로 떨어져있는 거리 즉,  $X_d, Y_d, Z_d$ 만큼  $X, Y, Z$ 축으로 이동함으로써 동차변환  $[A]_n$ 을 구할 수 있다.

$$5. [A]_n = R(\gamma_n)_z R(\beta_n)_x R(\alpha_n)_z T(d_n)$$

위에서 구한 동차변환  $[A]_n$ 을 이용하여 다음과 같이 각도변화에 따른 Workspace의 좌표를 구할 수 있다.

$$[x \ y \ z \ 1]^*_{n-1} = [x \ y \ z \ 1]_n [A]_n$$

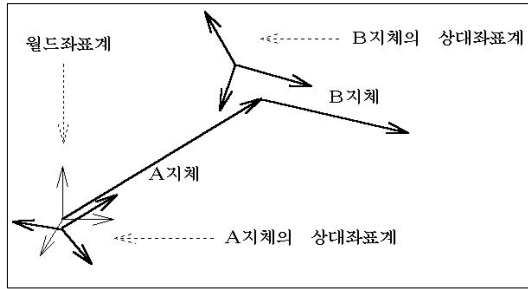


그림 4. 절대좌표계와 상대좌표계의 관계  
Fig 4. Relation of Absolute and Relative coordinates

< 동차변환에 의한 좌표계 변환 >

1. Z축을 기준으로  $\gamma$  회전.

$$R(\gamma_n)_z = \begin{bmatrix} \cos\gamma_n & \sin\gamma_n & 0 & 0 \\ -\sin\gamma_n & \cos\gamma_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2. X축을 기준으로  $\beta$  회전.

$$R(\beta_n)_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_n & \sin\beta_n & 0 \\ 0 & -\sin\beta_n & \cos\beta_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Z축을 기준으로  $\alpha$  회전.

$$R(\alpha_n)_z = \begin{bmatrix} \cos\alpha_n & \sin\alpha_n & 0 & 0 \\ -\sin\alpha_n & \cos\alpha_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. 거리 d 이동.

$$T(d_n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x'd_n & y'd_n & z'd_n & 1 \end{bmatrix}$$

4.4 Workspace 생성 알고리즘

다음은 인체의 한계 각도를 이용한 인체모델의 Workspace를 생성하는 알고리즘이다.

< Workspace 생성 알고리즘 >

1. 각 관절의 한계각도(  $\alpha, \beta, \gamma$ )를 정의한다.
2. 몸통과 팔을 고정시키고 손목을 이용하여 Wrist area를 구한다.

$$\text{while Min} \leq \text{Wr}(\alpha, \beta, \gamma) \leq \text{Max}$$

$$[x \ y \ z \ 1]_{wr} = [x \ y \ z \ 1]_h [A]_h$$

3. Wrist area를 몸통과 어깨를 고정시키고 팔꿈치관절을 이용하여 Fore area를 구한다.

$$\text{while Min} \leq \text{Fr}(\alpha, \beta, \gamma) \leq \text{Max}$$

$$[x \ y \ z \ 1]_{fr} = [x \ y \ z \ 1]_{wr} [A]_{wr}$$

4. Fore area를 몸통을 고정시킨 채 어깨관절을 이용하여 한쪽 팔에 대한 Workspace를 구한다.

$$\text{while Min} \leq \text{W}(\alpha, \beta, \gamma) \leq \text{Max}$$

$$[x \ y \ z \ 1]_w = [x \ y \ z \ 1]_{fr} [A]_{fr}$$

5. 다른 팔에 대해서 위의 과정을 수행한다.

## V. Workspace 생성 실험 결과

(그림 5)는 인체모델에 대해 43절의 각도변화에 따른 좌표계산과 4.4절의 Workspace 생성 알고리즘을 적용하여 생성한 Workspace를 X축, Y축, Z축 그리고 임의의 위치에서 관찰한 결과이다.

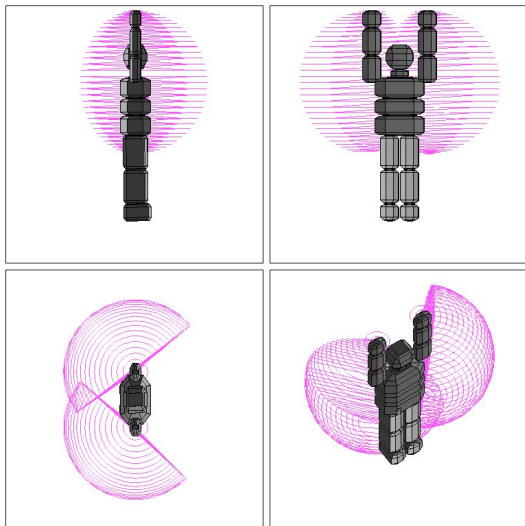


그림 5. Workspace 생성 결과  
Fig 5. Creation of Workspace

이와 같이 생성된 Workspace는 일반 작업장에서의 작업 공간을 최적화하기 위한 시뮬레이션에 적용이 가능하다. 특히 작업장 설계 시 실제 작업 도구의 배치를 CAD 시스템과 연동하여 작업도구와 작업자의 작업 공간 배치를 가능하게 할 수 있다.

## VI. 결론 및 향후 과제

CAD시스템을 이용하여 설계자가 기계를 설계하는데 있어서 사람이 조작할 대상물의 상대적 위치의 결정과 작업장의 Layout문제의 해결이 중요한 요소가 된다. 이를 위해 기본적으로 수반해야 할 점은 인체모델의 Workspace를 생성하는 것이다.

본 논문에서는 Forward Kinematics의 개념을 이용한 인체모델의 Workspace 생성방법을 제안하고 있다. 각도 변화에 따른 좌표 계산이 어떻게 이루어지는지 알아보았고, 이것을 기초로 인체모델의 Workspace를 생성하여 그래픽으로 표현하여 알고리즘의 적절성 및 적합성을 보였다.

본 논문에서는 좌우 팔만을 이용하였으나 앞으로 범위를 더 확장하여 Workspace를 구현하는 연구와 이것을 CAD 시스템에 접목하는 연구가 요구된다.

## 참고문헌

- [1] Kumar,A. and Waldron,K.J., "The Workspaces of a Mechanical Manipulator", Journal of Mechanical Design, vol.103,pp.665-672,July 1981.
- [2] Stephen Derby, "The Maximum Reach of Revolute Jointed Manipulators", Mechanism and Machine Theory, Vol.16,pp.255-261,1998.
- [3] Tsai, Y. C. and Soni, A. H., "An Algorithm for the Workspace of a General n-R Robot", Transaction of the ASME, Vol.105, pp.52-57, Mar. 2000.
- [4] Yang,D.C.H. and Lee,T.W., "On the Workspace of Mechanical Manipulators", Transaction of the ASME, Vol.105, pp.62-69, Mar. 2000.
- [5] 영수,김현석, "3차원 그래픽", 가남사, 1991.
- [6] 윤남식, "BIOMECHANICS 基礎 身體運動力學", 敎學 硏究社, 1991.

- [7] Lee,T.W.,and Yang,D.C.H, “On the Evaluation of Manipulator Workspace”, Transactions of the ASME, vol.105,pp.70-77,Mar 1983.
- [8] Robert J. Schilling, “FUNDAMENTALS OF ROBTICS ANALYSIS AND CONTROL”, Prentice-Hall International,1990.
- [9] 장석우, “다중 특징을 이용한 동작정보 측정”. 한국컴퓨터정보학회논문지, Vol. 10, No. 2, pp. 2-9, 2005.
- [10] 이용구, 최우승, “근전도 패턴인식을 위한 혼합형 LVQ 알고리즘”, 한국컴퓨터정보학회논문지, Vol. 10, No. 2, pp. 113-121, 2005.

## 저자 소개



### 윤석현

인하대학교 전자공학과 학사  
 연세대학교 전자공학과 석사  
 국민대학교 전자공학과 박사  
 1981년~동양공업전문대학 전자통신과  
 사무자동화과 교수  
 1996년~현재 청강문화산업대학  
 컴퓨터소프트웨어과 교수  
 <관심분야> ATM 네트워크, 프로토콜  
 공학, 소프트웨어 공학

K C I