

인간-기계 인터페이스 모형의 개발을 위한 Reach posture의 예측

기 도형, 정 의승, 정 민근
포항공과대학 산업공학과

요약문

Reach posture의 정확한 예측은 인간 모형이 구현되어있는 CAD시스템에서 인간공학적 평가를 하는 데 있어서 중요한 역할을 한다. 인간 골격구조의 복잡성과 그 행위의 특성에 대한 연구의 부족으로 인해 연구성과가 미미한 어려운 분야라 하겠다. 본 연구에서는 인간을 로봇과 같은 Multi-link system으로 간주하고, 로봇 Kinematics를 적용하여 Reach posture를 예측하고자 한다. 상지는 Hip, 어깨, 팔꿈치와 손목관절로 구성된 8자유도의 Redundant manipulator가 되고, 하지는 Hip, 무릎과 발목관절의 6자유도 link system이 된다. 상지의 Reach posture는 Resolved motion method를 이용하고, 하지는 Pieper's method를 사용하여 예측한다. 상지에 대한 Reach posture예측결과를 인간이 실제로 취하는 자세를 Motion Analysis system으로 검증해 본 결과 유사한 결과를 보였다.

I. 서 론

기술의 발달로 시스템이 복잡해지고 좋은 설계(Design)에 대한 사회적, 경제적, 법률적 요구의 증가로 인하여, 작업장이나 모든 제품의 설계 초기단계에서 인간-기계 상호작용에 대한 인간공학적 고려를 필요로 하고 있다. 설계 초기단계에서의 인간공학적 고려는 제품을 다 만들고 난 후의 시제품에 대한 평가에 비해 시간과 비용을 절감할 수 있는 잇점이 있다[6]. 이러한 평가방법의 단점을 보완하고 설계활동의 효율성을 증대시키기 위하여 인간공학적인 CAD 상호작용모형(Ergonomic CAD interface model)에 대한 연구가 요구되어지고 있다. 상호작용 모형은 3차원 작업공간의 기하학적 모형, 3차원 인체모형, 평가모형, 인체 측정치 데이터 베이스, 사용자 Interface 모형을 요구한다[8]. 이 중 평가모형은 SAMMIE(System for Aiding Man-Machine Interaction Evaluation)에와 같이 크게 Vision과 Reach나 특정 두 기능을 가지고 있다. 본 연구에서는 Reach 평가모형을 다루고자 한다. 기존에 나와있는 인간공학적 상호작용 모형에서는 Reach와 어떤

작업을 수행하는 자세를 예측하는데 있어서 발견적 기법(Heuristic algorithm)을 주로 사용하고 있다. 이러한 발견적 기법은 가능한 수 많은 자세 중에서 하나를 선택하는 것이다. 따라서 발견적 기법은 선택된 자세가 인간이 실제로 취하는 자세와의 유사성이나, 또는 역학적인 면에서의 최적화 등을 보장해 주지 못하고 있다. 이것은 인간의 자세를 예측하는 것의 복잡하고 어려운 속성에 기인한다고 생각된다. 그러나 정확한 자세의 예측은 역학적인 측면에서 보면, 자세에 따라서 신체 각 부위에 걸리는 부하가 달라지므로 주어진 과제에 대한 정확한 평가를 위해서 자세에 대한 예측이 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다. SAMMIE의 예를 들어보면, 가능한 중립적 위치(Neutral position)을 취하고 몸에서 먼 지체(Distal links)부터 움직임으로써 자세를 예측하고 있다[8]. 또한 SAMMIE는 단지 주어진 위치나 목표물에 손이나 발이 닿을 수 있는 지 없는 지만을 보여 줄 따름이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 부분적으로나마 해결하고자 인체를 Link system으로 간주하고, 로봇틱스의 운동학(Kinematics)의 개념을 도입하여 오른쪽 상지(Right upper limb)와 하지(Lower limb)의 Reach 자세를 예측하는 기법을 제시하고자 한다.

II. Link system

1. 상지(Upper limb)의 모형화

인체를 로봇트와 같이 Link system으로 보고, 모형화를 용이하게 하기 위하여 다음의 가정을 한다.

- 1) 상지와 하지(Lower limb)는 Sagittal plane에 대해 좌우 대칭이다.
- 2) Hip joint는 상지에 대해서는 3자유도를 가진 Virtual joint로 작용하고, 하지에 대해서는 3자유도의 Real joint로 작용한다.
- 3) 손목의 Adduction과 Abduction은 Reach 동작에서 거의 취해지지 않는 동작이기 때문에 여기에서는 고려하지 않는다.

위의 가정을 따르면 상지는 좌우의 두 부분으로 나눌 수 있고, 좌우 각각은 몸통(Trunk), 상완(Upper arm), 전완(Lower arm)과 손으로 이루어진 Link system으로 볼 수 있다. 각 Link의 관절(Joint)은 Hip joint가 3자유도, Shoulder가 3자유도, 그

리고 손목이 1자유도를 가진 8자유도의 Link system이 된다. Link system이 6자유도를 넘기 때문에 로보틱스에서의 여유자유도 메니플레이터(Redundant manipulator) 문제가 되어 Exact solution이 존재하지 않게 된다[7]. 상지에 대한 Link system을 그림으로 나타내면 다음 그림1과 같다. 가정에서 상지는 좌우 대칭이라 하였으므로 Link system도 좌우가 같다.

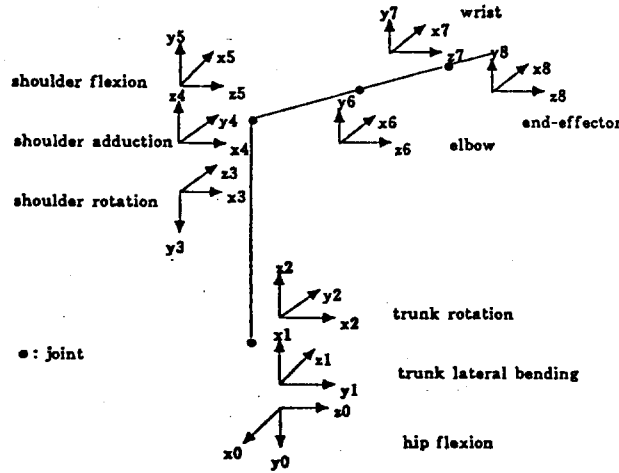


그림 1. 상지의 Link system

2. 하지(Lower limb)의 모형화

하지는 Hip, 무릎과 발목(Ankle) 관절로 이루어진 Link system으로 볼 수 있다. Hip 관절은 Flexion, Abduction-adduction과 Rotation운동이 일어나는 3자유도, 무릎관절은 Flexion과 Rotation운동의 2자유도, 그리고 발목관절은 Flexion-extension의 1자유도를 가지는 Link system이라 간주한다. 세 관절은 Revolute 관절이며, 모두 6자유도를 이루므로 상지와는 달리 Exact solution을 구하는 해법이 나와 있다. 하지에 대한 Link system도 좌우가 같으며, 다음 그림 2와 같다.

III. Link system의 매개변수(Parameters)

로보틱스에서는 각 Link의 위치와 방향을 나타내고 운동학적 관계(Kinematic relationship)을 표현하기 위하여 4 x 4 행렬의 D-H(Denavit-Hartenberg) Notation을 사용하고 있다. 로봇의 운동학을 설명하는 데는 4개의 매개변수가 필요한데, 그림 3에 나타나 있으며, 그 내용은 다음과 같다.

a_i : Common normal의 길이

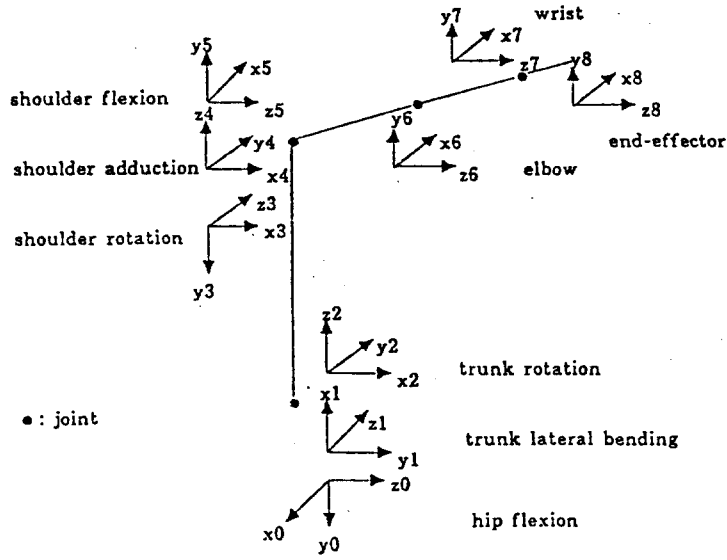


그림 2. 하지의 Link system

d_i : 원점 O_{i-1} 과 점 H_i 까지의 거리

α_i : Joint axis i 와 Z_i 축 사이의 오른쪽 방향으로의 각도

θ_i : Z_{i-1} 축 주위로 측정한 X_{i-1} 축과 Common normal $H_i O_i$ 사이의 각도

여기서 a_i 와 α_i 는 Link의 모양에 따라 결정되는 상수 매개변수 (Constant parameter)이고, d_i 와 θ_i 는 Joint가 움직임에 따라 변하는 변수이다. 특히 θ_i 는 Revolute joint에서는 변수 역할을 하지만 Prismatic joint에서는 상수로 작용하며, d_i 는 그와 반대의 역할을 한다.

위 그림에서와 같이 로봇트의 좌표축은 Link i 의 왼쪽에 i 번째 좌표축을, 오른쪽에 $i+1$ 번째의 좌표축을 배정한다. 본 연구에서 다루고자 하는 상지의 8자유도 Link system과 하지의 6자유도 Link system에 대한 매개변수는 다음 표1.2와 같다.

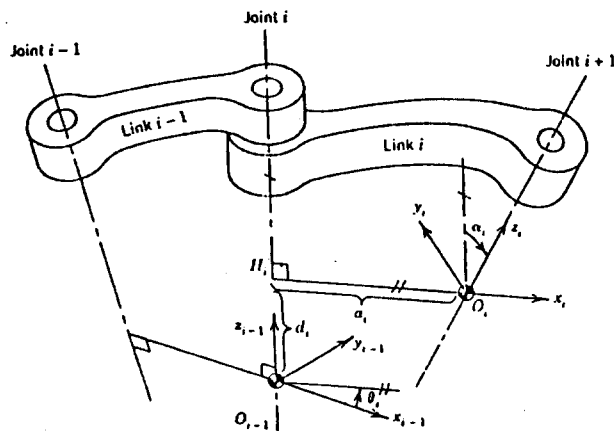


그림 3. Denavit-Hartenberg notation

표 1. 상지의 Link system 매개변수

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	90°	0	0	θ_1
2	90°	0	0	θ_2
3	-90°	0	l_1	θ_3
4	90°	0	0	θ_4
5	90°	0	0	θ_5
6	0°	l_2	0	θ_6
7	0°	l_3	0	θ_7
8	0°	l_4	0	θ_8

여기서 l_1 : 몸통의 길이, l_2 : 상완의 길이, l_3 : 전완의 길이, l_4 : 손의 길이

표 2. 하지의 Link system 매개변수

link	a_i	d_i	α_i	θ_i
1	0	0	-90°	θ_1
2	0	0	90°	θ_2
3	0	l_1	90°	θ_3
4	0	0	-90°	θ_4
5	0	l_2	-90°	θ_5
6	l_3	0	90°	θ_6

여기서 l_1 : Upper leg의 길이, l_2 : Lower leg의 길이, l_3 : 발의 길이

이웃하는 좌표축의 관계는 Transformation matrix에 의해 나타내지며, Frame $\{i-1\}$ 에 대해 Frame $\{i\}$ 를 결정해 주는 Transformation matrix는 다음 그림4와 같이 정의된다.

IV. 해 법

1. 상지의 해법

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow
n o a p

- where n : Normal vector
o : Osculation vector or Sliding vector
a : Approach vector
p : Position vector

그림 4. Transformation Matrix

Redundant manipulator에 관한 해법으로는 크게 두 가지- Kinematic control of local optimization과 Kinematic control of global optimization-가 있다[3,7]. 전자는 계산량은 적지만 Global optimality를 보장해 주지 못하고, 후자는 반대로 Global optimality는 보장해 주지만 계산량이 많은 각기 장단점을 가지고 있다. 이러한 장단점으로 인해 전자는 센서에 의한 장애물 충돌회피와 같은 Real-time control에 사용되고, 후자는 복잡한 Workspace에서 반복적인 동작을 요구하는 곳에서의 충돌회피와 같은 Off-line trajectory planning에 사용되고 있다. 본 연구에서 개발하고자 하는 인간공학적 상호작용 모형은 Reach 자세를 예측하는 기능을 On-line으로 구현하고자 하는 데 있으므로 전자의 Local optimal control 기법을 사용하고자 한다. Local optimal control 기법은 다시 Pseudoinverse control, Resolved motion method, Task-priority based kinematic control, Extended Jacobian method, Inverse kinematic method, Inverse function method등 여러가지가 발표되어 있는데, 이 중 가장 많이 사용되고 있는 Resolved motion method를 사용하기로 한다. 그 식은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\theta} = J^+ \dot{x} - (I - J^+ J) H(\theta)$$

여기서 $\theta = [\theta_1 \theta_2 \dots \theta_n]^T$ 는 Joint vector,

$x = [x_1 x_2 \dots x_n]^T$ 는 손(End-effector)에 대한 위치 Vector,

$$\dot{x} = dx/dt, \quad \dot{\theta} = d\theta/dt,$$

J 는 Manipulator Jacobian,

J^+ 는 Moore-Penrose pseudoinverse,

I 는 $n \times n$ identity matrix,

$H(\theta)$ 는 Gradient of a performance function $H(\theta)$ to be minimized이다.

위식의 두번째 부분은 물리적으로는 Internal motion(Self motion)의 의미를 가지며, End-effector를 가만히 둔 채 나머지 Joint들만 움직여서 다른 Configuration을 취하는 것을 의미한다. $H(\theta)$ 는 Singularity방지나 장애물 충돌 회피와 같은 목적으로 이용될 수 있는 하나의 기준으로 사용될 수 있다. 이러한 Performance function $H(\theta)$ 에도 Manipulability measure, Condition number, Minimum singular value, Joint range availability(JRA), MVR, Compatibility index, Minor measure, Winding number, TOMM등이 Manipulator의 움직임을 융통성 있고 자연스럽게 하기 위하여 제시되어 있다. 이러한 Measure들도 각기 장단점과 용도를 가지고 있으나, 본 연구에서는 Joint가 Range of motion에 이르는 현상을 막기 위하여 JRA를 사용하기로 한다. 그 식은 다음과 같이 주어진다.

$$JRA = \sum ((\theta_i - \theta_{c_i}) / \Delta\theta_i)^2$$

여기서 θ_{c_i} 는 Center angle for the i^{th} joint이고, $\Delta\theta_i$ 는 Maximum one-sided excursion of the i^{th} joint이다.

2. 하지의 해법

하지는 6자유도 Link system이므로 Transformation matrix에서 결정해야할 6개의 매개변수를 구하는 해법이 나와 있으며, Pieper's method를 들 수 있다[4]. 이 방법을 사용할 경우에 D-H notation상의 a_i 가 모두 0이 아니면, 16까지의 해가 존재하게 된다. 그러면 이 중에서 주어진 기준(Criterion)- Monemt의 최소화, 거리(Distance)의 최소화를 만족하는 해를 선택하면 된다. 이 방법의 장점은 위와 같이 여러 자세 중에서 우리가 원하는 것을 선택할 수 있는데 있다.

V. 결 과

본 장에서는 오른쪽 상지(Right upp-limb)에 대한 결과를 제시하고자 한다. 상

지의 Reach 문제를 풀기 위해서는 Link system에 대한 초기 상태와 목표지점의 위치, 그리고 현재의 위치에서 목표지점까지 도달하는 데 걸리는 시간을 필요로 하는 데 다음과 같이 가정한다.

$$l_1 = 5.0, l_2 = 2.5, l_3 = 3.0, l_4 = 1.0$$

$$\theta_1 = -90^\circ, \theta_2 = 90^\circ, \theta_3 = 0^\circ, \theta_4 = 0^\circ$$

$$\theta_5 = 90^\circ, \theta_6 = -90^\circ, \theta_7 = 90^\circ, \theta_8 = -30^\circ$$

$$\text{목표지점의 위치 } x = -5., y = -4.5, z = 1.$$

$$\text{도달시간} = 500 \text{ ms}$$

그리고 본 연구에서 사용한 JRA식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{JRA} = & 25 * [(\theta_1 + 2.355) / 0.785]^2 + 2100 * [(\theta_2 - 1.57) / 0.785]^2 \\ & + 1500 * [(\theta_3 - .0) / 1.05]^2 + [(\theta_4 - 0.5495) / 1.14]^2 \\ & + [(\theta_5 - 0.82) / 1.58]^2 + 150 * [(\theta_6 + 0.46) / 2.17]^2 \\ & + [(\theta_7 - 1.24) / 1.24]^2 + [(\theta_8 - 0.079) / 1.649]^2 \end{aligned}$$

여기서 JRA에서 사용하는 각 Joint의 Range of motion은 Laubach(1978)의 연구결과를 사용하였다[2].

50ms간격으로 구한 각 Joint의 θ_i 는 다음 표3,그림5와 같다(단위:radian).

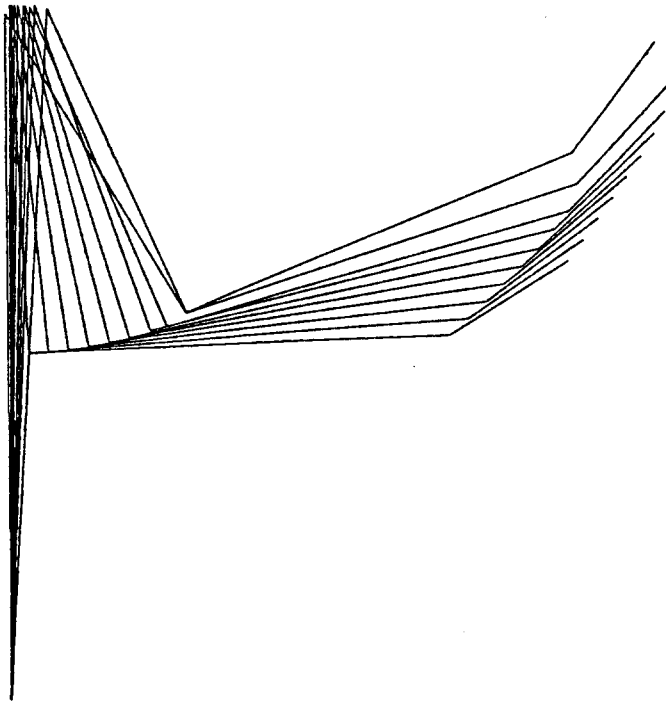
표 3. 오른쪽 상지의 Reach posture 예측 결과

joint 시간간격	1	2	3	4	5	6	7	8
0	-1.571	1.571	0.000	0.000	1.571	-1.571	1.571	0.524
1	-1.572	1.576	-0.01	-0.004	1.561	-1.519	1.558	0.526
2	-1.575	1.578	-0.005	-0.015	1.538	-1.466	1.545	0.528
3	-1.579	1.572	-0.01	-0.024	1.518	-1.412	1.531	0.529
4	-1.584	1.582	-0.001	-0.034	1.497	-1.359	1.516	0.529
5	-1.591	1.565	-0.016	-0.043	1.478	-1.304	1.499	0.529
6	-1.595	1.595	0.012	-0.053	1.457	-1.251	1.483	0.529
7	-1.608	1.543	-0.037	-0.063	1.439	-1.195	1.463	0.527
8	-1.601	1.633	0.050	-0.073	1.416	-1.145	1.449	0.527
9	-1.625	1.478	-0.103	-0.083	1.401	-1.087	1.423	0.523
10	-1.566	1.732	0.164	-0.091	1.370	-1.057	1.436	0.532

VI. 토 의

본 연구에서 제시한 기법은 Reach 자세를 일정한 시간 간격에 대한 함수 형태

그림 5. 오른쪽 상지의 시간대별 궤적



로 제공한다. 기존의 발견적 기법이 최종 자세(Final posture)만을 제공하는 데 비해, 모든 Joint에 대한 궤적(Trajectory)를 제공하는 것을 의미한다. 이것은 컴퓨터 모형에서의 시각적 효과뿐만 아니라 Reach 동작을 취하는 과정에 장애물 충돌 같은 바람직스럽지 못한 상황을 평가할 수 있는 잇점이 있다고 하겠다. 그리고 본 연구에서 제시한 기법에 의해 얻어진 자세는 Motion Analysis System으로 찍은 인간이 실제로 취하는 것과 유사한 결과를 보였다.

따라서 Redundant manipulator 기법과 Pieper's method와 같은 로봇 Kinematics 기법들이 인간공학적 상호작용 모형에서 Reach 자세를 예측하는 데 매우 유용하게 사용되어 질 수 있음을 보였다고 할 수 있다.

참고문헌

- [1]Asada,H., & Slotine,J.-J.E., Robot analysis and control, John Wiley and Sons, 1986.
- [2]Chaffin,D.B., & Andersson,G.B.J., Occupational biomechanics, John Wiley and Sons, 1984.

- [3] Chung, W.J., Kinematic and dynamic control of redundant manipulators, 포항공대 기계공학과 박사학위논문, 1992.
- [4] Craig, J.J., Introduction to robotics, Addison Wesley, 1989.
- [5] Fu, K.S., Gonzalez, R.C., & Lee, C.S.G., Robotics, McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [6] Levis, J.A., The impact of computer aided design on preconcept package design and evaluation, Transactions Research, Vol.2, 1970.
- [7] Nakamura, Y., Advanced robotics, Addison Wesley, 1991.
- [8] Porter, J.M., Case, K., & Bonney, M.C., Evaluation of human work, Taylor & Francis.