

동작한계 예측을 위한 해석적 알고리즘의 개발

Development of an Analytic Algorithm for Reach Prediction

정의승*, 정민근*, 기도형**

Abstract

Today, rapid development and timeliness of introducing a new product becomes a more influencing factor of determining its competitive power due to a shortened product cycle, while rapid improvement of manufacturing technology makes product design and manufacturing fuse together. This implies that product usability evaluation and improvement starts right from its design phase, resulting in less development time and cost. To make this possible, proper assessment of human reach is one of essential functions for ergonomic product usability evaluation, specifically in the platform of computer-aided ergonomic evaluation models or any CAD system with a built-in man model. In this study, an analytic reach prediction algorithm ensuring the posture that human naturally takes, is presented by employing the methods developed for robot kinematics. Among robot kinematic methods for solving the multi-link system, the resolved motion method was found to be effective to solve human reach as a redundant manipulator model. Also, the joint range availability was used as a performance function to guarantee human naturalness. The result is expected to be directly applicable to product usability evaluations.

I. 서 론

기술의 발달로 시스템이 복잡해지고 보다는 설계(Design)에 대한 사회적, 경제적,

법률적 요구의 증가로 인하여, 작업장이나 모든 제품의 설계초기 단계에서 인간-기계 상호작용에 대한 인간공학적 고려를 필요로 하고 있다. 그러나 고려할 요소가 다양해지

본 연구는 1992년도 한국과학재단 특정기초 연구비 지원을 받아 수행되었음

* 포항공과대학 산업공학과

**동의대학교 산업공학과

고 복잡해짐에 따라, 전통적 공학의 배경을 가진 설계자는 제품 설계시 여러 인간공학적 요소를 간과하기 쉽다. 이러한 상황에서 인간공학의 역할은 제품의 설계초기 단계에서 부터 인간공학적 평가의 적용을 통하여 비용의 절감과 최종 사용자의 만족을 높이는 데 있다고 하겠다. 인간공학을 적용하는 전통적 방법으로는 시제품(Prototype)이나 모형(Mock-ups)을 제작하여 제한된 집단에 대해 모의실험을 하는 것이 일반적이나, 이러한 방법은 인간공학적 요소의 고려 여부를 확인하는 데는 도움이 되지만, 다음과 같은 단점을 가지고 있다.

첫째, 설계의 결함이 모의실험 전까지 발견되지 않는 경우가 빈번하다. 때로는 시제품이 제작된 후 Field test 단계에 이를 때까지 문제점을 발견하지 못하기도 하며, 설계의 최종단계에 평가가 이루어지기 때문에, 결함이 발견되어 수정이 필요한 경우에는 추가적인 설계 및 제작비용을 감수해야 한다. 둘째, 한정된 수의 피실험자에 의해 모의실험이 이루어지므로, 대상자 전체를 고려한 평가가 되기 어려우며, 따라서 평가 결과의 신뢰성이 떨어진다.

이러한 평가방법의 단점을 보완하고 설계 활동의 효율성을 증대시키기 위하여 인간공학적 CAD모델이 요구된다. CAD는 전통적 설계 방법에 비해 설계자에게 높은 융통성을 제공해 주며, 다음과 같이 여러 설계 활동 단계에 사용될 수 있다.

- (1) 설계계획(Design scheming),
- (2) 설계평가(Design evaluation),
- (3) 설계대안의 비교(Design comparison),
- (4) 설계결과의 시각적 제시(Design visualization/presentation)

그러나 대부분의 CAD를 이용한 방법은 인간과 기계의 상호작용을 다루지 않았으며, 주로 제품설계 그 자체에 많은 관심을 기울여 왔다. 제품이나 장비, 작업장 설계등

에 사용되어 온 전통적 CAD방법에 인체모형을 통합한 인간공학적 CAD모델을 개발함으로써 시제품이나 모형을 만들지 않고서도 컴퓨터 모의실험을 통하여 인간-기계 상호작용(Man-machine interaction)을 평가할 수 있다. 현재까지 다수의 인간공학적 CAD모델이 개발되었으며, 그 중 가장 많이 사용되고 있는 것으로 SAMMIE등을 들 수 있다[3]. 인간공학적 CAD모델은 그림 1에 나타난 바와 같이 다음과 같은 요소로 구성되어야 한다.

- (1) 장비와 작업장을 컴퓨터 스크린에 모의화할 수 있는 3차원 작도기능,
- (2) 다양한 인체 모형을 형상화할 수 있는 3차원 인체 작도기능,
- (3) 인체모형에 기초하여 인간공학적 요소의 고려를 평가해 볼 수 있는 평가기능,
- (4) 사용자의 사용성을 높여주는 Interactive user interface.

이 인간공학적 CAD모델은 설계초기에서 부터 제품의 사용성 평가를 위하여 효율적으로 이용될 수 있으며, 특히 인간공학을 전공하지 않은 설계자도 쉽게 이용할 수 있다는 장점을 가진다. 본 연구에서는 이러한 모델을 개발하기 위하여 중요한 인간공학적 평가기능인 인체의 동작한계(Reach)알고리즘을 개발하였다.

II. 동작한계(Reach)의 평가

동작한계(Reach)는 팔이나 다리가 어떤 지점에 닿는가로 간단히 평가된다. 그러나 인간의 신체는 수백개의 자유도(Degrees of freedom)으로 구성되어 있어서, 즉, 어떤 한 지점에 닿는 자세가 무수히 많이 존재하여 이 Reach 자세를 예측하기가 어렵다[12]. 따라서 인간공학적 CAD모델에 Reach 기능을 구현하기 위해서는, 수 많은 가능자세 중에서 우리 사람이 취하는 최적

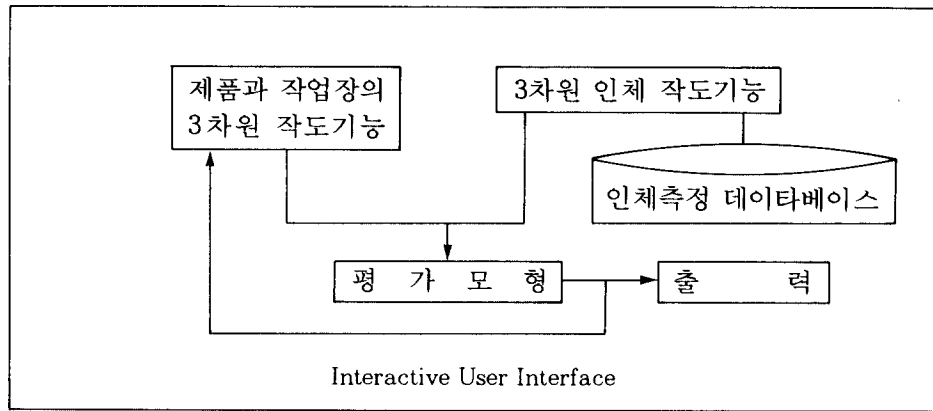


그림 1. 인간공학적 CAD모델의 구조

의 자세를 취하는 기준을 요구한다. 최근에는 로봇기구학(Robot kinematics)을 이용한 해석적(Analytic)방법이 도입되고 있다[10].

기존의 인간공학적 CAD 또는 상호작용 모델에서는 동작한계 또는 어떤 작업을 수행하는 자세를 예측하는데 있어서 발견적 기법(Heuristic algorithm)을 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[2]. 이것은 인간의 자세 자체가 복잡하고 어렵다는 속성에 기인한다고 생각된다. 그러나 정확한 자세의 예측은 역학적인 측면에서 보면, 자세에 따라서 신체 각 부위에 걸리는 부하가 달라지므로 주어진 작업에 대한 정확한 평가를 위해서 자세에 대한 예측이 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다. SAMMIE의 예를 들어보면, 가능한 중립적 위치(Neutral position)를 취하고 몸에서 먼 지체(Distal links)부터 움직임으로써 자세를 예측하고 있다[3]. SAMMIE의 방법은 단지 주어진 위치나 목표물에 손이나 발이 닿을 수 있는 지 없는 지만을 보여 줄 따름이다. 본 연구에서는 이러한 문

제점을 부분적으로나마 해결하고자 인체를 Multi-link system으로 간주하고, 로봇틱스의 기구학(Kinematics)의 개념을 도입하여 국소적 최적화(Local optimality)를 보장해 주는 상지(Upper limb)의 re-ach 자세를 예측하는 기법을 제시하였다.

III. 모 델

3-1. 상지의 모델링

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

(1) 상지와 하지(Upper and lower limbs)는 Sagittal plane에 대해 좌우 대칭이다.

(2) 엉덩이의 관절(Hip joint)은 상지에 대해서는 3자유도를 가진 Virtual joint로 작용하고, 하지에 대해서는 3자유도의 Real joint로 작용한다.

(3) 손목의 Adduction과 Abduction은 Reach동작에서 거의 취해지지 않는 동작이기 때문에 이를 최소화한다.

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 엉덩이(Hip joint)가 3자유도, 어깨(Shoulder)가 3자유도, 그리고 팔꿈치와 손목(Wrist)이 1자유도를 가진 8자유도의 Link system이 된다. Link system이 6자유도를 넘기 때문에 로봇틱스에서의 여유자유도 메니플레이터(Redundant manipulator)문제가 되어 유일해(Exact solution)가 존재하지 않게 된다[5]. 오른쪽 상지에 대한 Link system을 그림으로 나타내면 그림2와 같다.

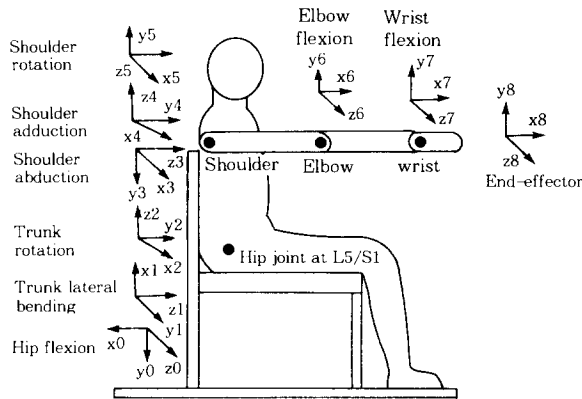


그림2. 오른쪽 상지의 Link system

3-2. 인체 Link system의 매개변수 (Parameters)

로봇틱스에서 각Link의 위치와 방향을 나타내고 운동학적 관계(Kinematic relationship)를 표현하기 위하여 4×4 행렬의 D-H(Denavit-Hartenberg)notation을 사용하고 있다[1,6]. 로봇의 기구학 또는 운동학을 설명하는 데는 4개의 매개변수가 필요한데, 그림 3에 나타나 있으며, 그 내용은 다음과 같다[7].

a_i : common normal의 길이

d_i : 원점 O_{i-1} 과 점 H_i 까지의 거리

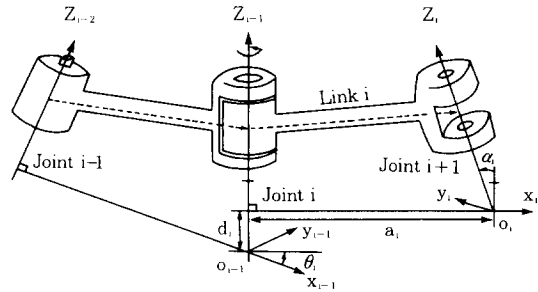


그림 3. Denavit-Hartenberg notation

α_i : joint axis i 와 Z_i 축 사이의 오른쪽 방향으로 각도

θ_i : Z_{i-1} 축 주위로 측정한 X_{i-1} 축과 common normal H_{i-1} 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[1].

그림 3에서와 같이 좌표축은 Link i 의 왼쪽에 i 번째 좌표축을, 오른쪽에 $i+1$ 번째의 좌표축을 배정한다. 본 연구에서 다루고자 하는 오른쪽 상지의 8자유도 Link system에 대한 매개변수는 표1과 같다.

표 1. 오른쪽 상지 Link System의 매개변수

Link	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

* l_1 : length of trunk,

l_2 : length of upper arm,

l_3 : length of lower arm,

l_4 : length of hand

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

$$T^{i-1}_i = \begin{pmatrix} c\theta_i & -s\theta_i s\alpha_i & -s\theta_i c\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i s\alpha_i & c\theta_i c\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

표1에 나와 있는 매개변수의 값을 적용하여 각 관절마다의 Transformation matrix를 정의하면 다음과 같다.

$$T^0_1 = \begin{pmatrix} c1 & 0 & s1 & 0 \\ s1 & 0 & -c1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

여기서 $c1 = \cos(\theta_1)$, $s1 = \sin(\theta_1)$

$$T^1_2 = \begin{pmatrix} c2 & 0 & s2 & 0 \\ s2 & 0 & -c2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T^2_3 = \begin{pmatrix} c3 & 0 & -s3 & 0 \\ s3 & 0 & c3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T^3_4 = \begin{pmatrix} c4 & 0 & s4 & 0 \\ s4 & 0 & -c4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T^4_5 = \begin{pmatrix} c5 & 0 & s5 & 0 \\ s5 & 0 & -c5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T^5_6 = \begin{pmatrix} c6 & -s6 & 0 & 12*c6 \\ s6 & c6 & 0 & 12*s6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T^6_7 = \begin{pmatrix} c7 & -s7 & 0 & 13*c7 \\ s7 & c7 & 0 & 13*s7 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T^7_8 = \begin{pmatrix} c8 & -s8 & 0 & 14*c8 \\ s8 & c8 & 0 & 14*s8 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

3-3. 해 법

Rduntant manipulator에 관한 해법으로 크게 두 가지-Kinematic control of local optimization과 Kinematic control of global optimization-가 있다 [11,13]. 전자는 계산량은 적지만 최적해(Global optimality)를 보장해 주지 못하고, 후자는 반대로 최적해를 보장해 주지만 계산량이 많다는 각각의 장단점을 가지고 있다. 이러한 장단점으로 인해 전자는 센서에 의한 장애물 충돌회피와 같은 실시간 제어에 사용되고, 후자는 복잡한 작업공간에서의 반복적인 동작을 요구하는 Off-line trajectory planning에 사용되고 있다. 본 연구의 목적이 인간공학적 CAD 모델에서의 동작한계 평가기능을 On-line으로 구현하고자 하는데 있으므로 전자의 Local optimization 기법을 사용하고자 한다. 이 기법에는 Pseudo-inverse control, Resolved motion method, Task-priority based kinematic control, Extended Jacobian method, Inverse kinematic method, Inverse function method 등 여러가지가 발표되어 있는 데, 이 중 가장 인체의 동작과 유사한 Resolved motion method를 사용하기로 하였다[9]. 그 식은 다음과 같이 주어진다.

$$\theta = J^+X - (I - J^+J) \nabla H(\theta)$$

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
 $X = dx/dt$, $\theta = d\theta/dt$
 J 는 Manipulator Jacobian,
 J^+ 는 Moore-Penrose pseudoinverse,
 I 는 $n \times n$ identity matrix,
 $\nabla H(\theta)$ 는 최소화되어야 하는 Performance function $H(\theta)$ 의 Gradient

이 식이 의미하는 바는 도달해야하는 위치(x)를 주었을 때 이로부터 우리 인체의 이동변위(θ)을 구하는 것으로 Inverse Kinematics에 해당한다. 위식의 첫번째 부분은 손의 실제 움직임을 의미하며, 두번째 부분은 손은 실제 움직임을 아니나 여타 관절의 다양한(Redundant)움직임으로써, 물리적으로는 Internal motion(Self motion)의 의미를 가진다. 즉, 손(End-effector)을 가만히 둔 채 나머지 관절들만 움직여서 다른 자세(Configuration)을 취하는 것을 의미한다. 따라서 Performance function $H(\theta)$ 를 사람의 움직임과 유사하도록 선정하는 것이 중요하며, Singularity방지나 장애물 충돌 회피와 같은 극단적인 움직임을 방지하는 목적으로 이용될 수 있는 기준이 된다. 이러한 Performance function $H(\theta)$ 에도 Manipulability measure, Condition number, Minimum singular value, Joint range availability(JRA), Compatibility index, Minor measure, Winding number 등이 Manipulator의 움직임을 융통성 있고 자연스럽게 하기 위하여 제시되어 있다[8, 11]. 이러한 Measure들도 각기 장단점과 용도를 가지고 있으나, 본 연구에서는 각 관절이 Range of motion끝에 이르는 현상을 막기 위하여 JRA를 사용하였다. 이 식

은 다음과 같이 주어진다.

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

여기서 θ_{ci} 는 i^{th} joint의 center angle,
 ω_i 는 각 관절의 운동량에 따른 가중치,
 $\Delta \theta_i$ 는 i^{th} joint의 최대단측치(maximum one-sided excursion)이다.

IV. 결 과

인체의 Reach 기능을 예측하기 위한 알고리즘에는 Link system에 대한 초기 상태와 목표지점의 위치를 필요로 하며 다음은 그 한 예이다.

$l_1=48.7, l_2=31.4, l_3=24.7, l_4=18.3(\text{cm})$
 $\theta_1=-90^\circ, \theta_2=90^\circ, \theta_3=0^\circ, \theta_4=0^\circ$
 $\theta_5=-90^\circ, \theta_6=-90^\circ, \theta_7=90^\circ, \theta_8=0^\circ$
 목표지점의 위치 : $x=-51.8, y=-30.4,$
 $z=10.6(\text{cm})$

그리고 본 연구에서 사용한 JRA식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} JRA_2 = & 25 * [\theta_1 + 2.355] / 0.785]^2 + 2100 * \\ & [(\theta_2 - 1.57) / 0.785]^2 \\ & + 1500 * [(\theta_3 - 0) / 1.05]^2 \\ & + [(\theta_4 - 0.5495) / 1.14]^2 \\ & + [(\theta_5 - 0.82) / 1.58]^2 + 150 * \\ & [(\theta_6 + 0.46) / 2.17]^2 \\ & + [(\theta_7 - 1.24) / 1.24]^2 \\ & + [(\theta_8 - 0.079) / 1.649]^2 \end{aligned}$$

여기서 JRA는 Laubach의 동작범위(Range of motion)에 대한 연구결과를 사용하였다(4).

이 Reach동작을 100ms간격으로 구한 각 관절의 θ 가 표 2 및 그림 4와 같다.

표 2. 시간대별 상지의 Joint angle θ

(단위 : Radian)

time interval \ joint	Hip			Shoulder			Elbow	Hand
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1.571	1.571	0.000	0.000	1.571	1.571	1.571	0.000
1	1.570	1.572	0.007	0.006	1.563	1.530	1.555	0.007
2	1.571	1.573	0.001	0.019	1.547	1.489	1.539	0.013
3	1.573	1.569	0.007	0.028	1.537	1.448	1.523	0.018
4	1.576	1.578	0.001	0.039	1.524	1.408	1.506	0.023
5	1.581	1.561	0.010	0.048	1.513	1.367	1.490	0.028
6	1.583	1.591	0.008	0.058	1.499	1.328	1.474	0.032
7	1.593	1.539	0.023	0.066	1.489	1.287	1.455	0.036
8	1.590	1.627	0.032	0.077	1.474	1.251	1.444	0.041
9	1.610	1.478	0.063	0.084	1.467	1.209	1.422	0.043
10	1.573	1.723	0.10	0.096	1.447	1.186	1.432	0.051

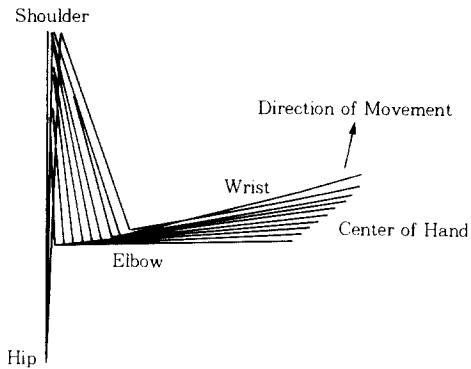


그림 4. 오른쪽 상지의 시간대별 궤적

V. 알고리즘의 검증

본 알고리즘의 타당함을 보이기 위하여 한 명의 피실험자의 실제 동작을 Motion Analysis System을 통하여 촬영하여 분석하였다. 피실험자의 전방 3지점과 측면 3지점을 선정하여 촬영하였으며, 모델에서 생성된 동작궤적과 피실험자의 동작궤적을 시간대별로 비교하였다. 비교를 위한 통계적 방법으로 Pairwise T-test가 이용되었으

며, 팔꿈치 관절과 어깨관절 그리고 이를 합한 전체의 공간상의 거리(Angular displacements)가 사용되었다. 이 결과가 표 3에 나타나 있으며, 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다.

표 3. 관절의 시간대별 위치의 비교

관 절	N	평 균	편 차	T	P
전 체	12	-10.513	18.332	-1.99	0.072*
팔꿈치	6	-17.981	21.539	-2.04	0.096*
어 깨	6	-3.046	11.900	-0.63	0.56*

* $\alpha=0.05$ 에서 유의하지 않음

VI. 토 의

본 연구에서 제시한 기법은 Reach 자세를 일정한 시간 간격에 대한 함수 형태로 제공한다. 기존의 발견적 기법이 최종자세(Final posture)만을 제공하는데 비해, 모든 인체의 관절별 움직임에 대한 궤적(Trajectory)를 제공하는 것을 의미한다. 이것은 컴퓨터 모형에서의 시각적 효과뿐만 아니라

Reach 동작을 취하는 과정에 있어서 장애물 충돌 같은 바람직스럽지 못한 상황을 평가할 수 있는 잇점이 있다고 하겠다. 그리고 본 연구에서 제시한 기법에 의해 얻어진 동작자세는 Motion Analysis System으로 찍은 인간이 실제로 취하는 자세와 유사한 결과를 보였다.

따라서 Redundant manipulator 기법과 같은 로봇트 기구학 기법들이 인간공학적 CAD모델에서 Reach자세를 예측하는 데 매우 유용하게 사용되어 질 수 있음을 보였으며, 이를 통하여 제품의 사용성 평가를 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Asada, H. and Slotine, J.E., Robot analysis and control, John Wiley and Sons, New York, 1986.
- [2] Byun, S.N., A computer simulation using a multivariate biomechanical posture prediction model for manual material handing tasks, unpublished Ph. D. Dissertation(Industrial Engineering), University of Michigan, Ann Arbor, MI, 1991.
- [3] Case, K., Porter, J.M., and Bonney, M.C., SAMMIE : A man and workplace modelling, in W. Karwarski, A.M. Genaidy, and S.S. Asfour (eds), computer Aided Ergonomics, Taylor and Francis, London, 1990, pp31-36.
- [4] Chaffin, D.B., and Andersson, G.B. J., Occupational biomechanics,, John Wiley and Sons, New York, 1984.
- [5] Chung, W.J., Kinematic and dynamic control of redundant manipulators, unpublished Ph. D. Dissertation (Mechanical Engineering), Pohang Institute of Science and Technology, Pohang, Korea, 1992.
- [6] Craig, J.J., introduction to robotics,, Addison Wesley, Massc-husetts, 1989.
- [7] Fu, K.S., Gonzalez, R.C., and Lee, C.S.G., Robotics, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988.
- [8] Klein, C.A., and Blaho, B.E., Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators, Int. J. Robotics Research, 6, 1987, pp72-83.
- [9] Klein, C. A., and Huang, C. H., Review of pseudoinverse control for use with kinematically redundant mechanisms, IEEE Trans, Systems, Man, and Cybernetics, SMC-13, 1983, pp245-250.
- [10] Korein, J.U., A geometric investigation of reach, MIT press, Massachusetts, 1985.
- [11] Liegeois, A., Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, SMC-17, 1977, pp868-871.
- [12] Roebuck, J.A., Kroemer, K.H.E., and Thomson, W. G., Engineering anthropometry nethod, John Wiley and Sons, New York, 1975.
- [13] Tsai, Y.C., and Soni, A.H., Accessible region and synthesis of robot arms, ASME J. of Mechanical Design, 103, 1981, pp803-811.