

2자유도 동작범위를 고려한 reach volume의 해석적 생성

Analytic Generation of Reach Volume Based on Range of Two Degrees of Freedom Motion

기 도 형*

Dohyung Kee*

Abstract

When designing workplaces or arranging controls on panel, devices and controls should be placed within the reach of operator's arm or foot to guarantee effective performances. Most of the existing research on the reach volume were based on measurements of a few subject's arm reach, and limited to Caucasian and Chinese populations. Furthermore, reach volume considering foot or trunk motion have not been investigated. Range of human joint motion and that of two degrees of freedom motion are needed to generate reach volume analytically using the sweeping algorithm. However, range of two degrees of freedom motion has not been measured up to now. Therefore, range of two degrees of freedom motion was measured in this research, where 47 college students were participated voluntarily as subjects. The results showed that the motion of one joint can be limited by the motion of another motion, that is to say, the shoulder flexion was decreased significantly when the shoulder was adducted or abducted. Second, new approximate algorithms generating reach volumes were suggested, in which range of two degrees of freedom motion was used as input data. Depending upon the body segment included such as trunk, arm and leg, three types of reach volume were provided, in which the human body was modeled as a multi-link system based on the robot kinematics and the sweeping method was employed. Reach volume generated analytically in this study showed statistically reasonable results when compared with that obtained from direct measurement.

Keywords : 동작범위, 로봇트 가구학, reach volume

* 계명대학교 산업공학과

1. 서론

작업장을 설계할 때 시스템의 효율적인 운용(operation)을 위해서는 여러 조종장치들이 운용자들의 팔 혹은 다리로 닿을 수 있는 범위 내에 배치되어야 한다. 항공산업과 자동차산업은 좁은 공간에 많은 계기를 배치하여야 하는 공간 최적화(space optimization)를 위해서 운용자의 인체측정 자료, 특히 동적 혹은 기능적 인체측정 자료(dynamic or functional anthropometric data)가 요구되는 대표적인 업종이라 할 수 있다 [7]. McFarland et al.은 산업재해에 영향을 미치는 많은 요소들을 파악하기란 어렵지만, 산업재해의 감소에 직접적인 기여를 할 수 있는 요소로 적절한 공간 설계를 제시하였다 [12].

다양한 운용자들을 수용할 수 있는 작업장을 설계하기 위해서는 '평균적'인 운전자만을 위한 계획을 하는 것은 충분하지 못하다. 예를 들어 비행기 조종석에서 모든 조종사는 피달에 발이 닿을 수 있고 계기를 조작할 수 있어야 하나, 평균적 혹은 어느 일정 계층의 운전자만을 기준으로 설계하면 이를 달성할 수 없어 비행기의 불안전 상태를 초래할 수 있다. 정적 인체측정 자료는 인체 치수에 관한 필요한 정보를 제공하지만, 이러한 자료는 표준화된 자세에서 측정된 것이어서 비행기 조종석과 같은 동적 상황에 직접 적용할 수 없다 [7]. 인간은 강체(rigid body)가 아니기 때문에 팔이 어디까지 닿을 수 있는가는 팔길기와 같은 정적 자료뿐만 아니라, 몸통과 어깨의 회전, 등(back)의 굴곡(flexion) 등의 다양한 동적 인체측정 자료에 영향을 받는다. 따라서 어떤 집단에 적합한 작업공간

을 설계하기 위해서는 도달 가능한 공간에 대한 동적 인체측정 자료가 요구된다 하겠다. 이러한 도달 가능한 공간에 대한 용어로 3차원에서는 reach volume, 작업영역(workspace), 2차원에서는 reach envelope 등의 여러 가지가 사용되고 있으나, 본 연구에서는 좀 더 일반적인 의미를 가지는 reach volume을 사용하기로 한다. 현재까지 reach volume에 대한 연구는 주로 직접적인 측정을 통하여 이루어져 왔으며, 그 내용을 정리하면 다음과 같다. Kennedy는 20명의 남자의 arm reach를 [9], Bullock은 75명의 남자와 35명의 여자 오스트리아 조종사에 대한 기능적 arm reach를 [7], 그리고 Nowak은 폴란드의 226명의 남자와 204명의 여성 작업자의 기능적 arm reach를 측정하였다[13]. Case et al.은 sweeping algorithm을 이용하여 거의 구(sphere)에 가까운 reach volume을 SAMMIE라는 인간공학적인 CAD 모델을 이용하여 제시하였으나 [8], 관절 동작범위의 한계때문에 실제 인간이 취하는 reach volume은 제시한 구와 같은 모양은 불가능한 것으로 생각된다. 동양인에 대한 측정으로는 Li et al.이 20명의 중국 청년 남자의 기능적 arm reach를 측정하는 것이 유일하며 [11], 한국인에 대한 신체 어떤 부위의 reach volume 혹은 reach envelope의 측정 연구는 없는 실정이다. 이러한 여러 측정에 의한 연구는 서로 측정 방법이 상이하여 비교와 실제 사용에 제한을 가지고 있다. 또한 위에서 본 바와 같이 주로 팔의 reach volume에 대한 연구가 이루어져왔으나, 실제로는 몸통을 포함한 상지와 다리의 reach volume도 작업공간의 인간공학적인 설계를 위하여 요구되고 있다. 기 [1]은 reach volume을 직접 측

정이 아닌 로봇트 기구학을 이용하여 포함된 신체 부위에 따라 3종류의 reach volume-몸통과 팔로 파악할 수 있는 Type I reach volume, 팔로 닿을 수 있는 영역을 나타낸 Type II reach volume, 다리로 파악되는 영역의 Type III reach volume을 제시하였으나, 각각의 reach volume을 생성할 때 입력 자료로 인체의 각 관절의 독립적인 동작범위(range of motion)를 적용하였기 때문에 실제 사람이 취하는 reach volume과 차이를 보이는 부분도 있었다. 예를 들어, Type II reach volume은 어깨 관절을 주어진 양만큼 외전시킨 상태에서 어깨를 굴곡하는 과정을 어깨의 외전 동작범위 한계까지 반복하면서 생기는 궤적에 의하여 생성된다. 여기서 어깨 관절에서 외전과 굴곡의 동시에 일어나면 서로의 동작에 영향을 미쳐, 각 동작의 동작범위가 감소하게 된다. 그러나 이러한 2자유도 동작의 동작범위에 대한 연구 자료가 없어, 어깨의 외전과 굴곡의 수준에 관계없이 각각의 동작범위를 사용하였기 때문에 실제 사람이 취하는 reach volume과 차이를 보였다 [1]. 이와 같이 reach volume 혹은 reach envelope를 직접 측정이 아닌 해석적으로 생성하기 위해서는 인체 관절의 동작범위가 필수로 요구되고 있으나, 현재까지는 주로 미국을 중심으로 인체의 각 관절의 독립적인 동작범위에 대한 측정 결과만 나와 있는 실정이다 [4]. 한국인에 관한 자료는 이 등[4]에 의한 20대 남자 대학생의 팔 관절의 동작범위가 발표되어 있으며, 기 [2]는 20대 전후의 남자 대학생의 몸통 동작의 기준이 되는 가상 hip 관절과 하지 관절-hip, 무릎, 발목 관절-의 동작범위를 측정, 제시하였다. 그러나 인간이 어떤 작업

이나 동작을 취할 때는 대부분의 경우 2개 이상의 자유도의 동작이 발생하거나 2개 이상의 관절이 동원되며, 2개 이상의 자유도의 동작이 일어나거나 2개 이상의 관절이 동원되면 서로의 동작범위에 영향을 주어 각 자유도나 관절의 동작범위가 감소 혹은 증가하는 경향을 보이고 있다 [14]. 예를 들어, 팔꿈치가 굴곡되어 있을 때 어깨의 굴곡은 약 47° 정도 감소하며, 무릎이 굴곡되면 hip의 굴곡 각도는 감소한다.

본 연구에서는 먼저 reach volume의 해석적 생성을 위해 필요한 한국인의 2자유도 동작범위(range of 2 degrees of freedom motion)를 측정하여, 2자유도 동작이 일어날 때 서로의 동작범위에 미치는 영향을 나타내는 관계식을 제시하고자 한다. 여기서 2자유도 동작이라 함은 2자유도, 예를 들어 어깨의 굴곡과 내.외전(adduction-abduction)의 동작이 동시에 일어나는 동작을 의미한다. reach volume을 sweeping algorithm을 이용하여 해석적으로 생성할 때에는, 회전의 기준이 되는 신체 부위의 관절에서 2자유도 동작이 일어나므로, 본 연구에서는 이에 대한 측정을 하고자 한다. 여기서 sweeping algorithm이란 기하 모델링(geometric modeling)에서의 rotational sweeping method를 말하며, 팔이나 다리 등의 지체를 어깨, hip 관절 등의 기준점을 중심으로 회전하는 것을 의미한다. 따라서, 2자유도 동작의 측정 대상은 본 연구에서 생성하고자 하는 3종류의 reach volume의 입력 자료로 사용되는 어깨의 내.외전에 따른 굴곡, 가상 hip 관절의 lateral bending에 따른 굴곡, 그리고 hip 관절의 내.외전에 따른 굴곡을 포함한다. 두 번째, 로봇트 기구학

(robot kinematics)과 sweeping algorithm을 이용하여 동원되는 인체 부위에 따른 3종류의 reach volume을 해석적으로 생성하는 알고리즘을 제시하고자 한다. Reach volume의 생성에는 이미 제시되어 있는 한국인의 팔 관절의 동작범위, 몸통과 하지의 동작범위와 본 연구의 2자유도 동작의 동작범위를 입력 자료로 사용한다. 본 연구에서는 인체를 몇 개의 link로 연결된 multi-link 시스템으로 가정하며, 이들의 공간적 관계를 표현하기 위하여 로보트 기구학을 이용하였다.

2. 2자유도 동작의 동작범위

2.1 피실험자

47명의 건강한 20대 전후의 남자 대학생이 2자유도 동작의 동작범위 측정 실험에 참여하였으며, 47명의 피실험자들의 인체측정 자료는 다음 표1과 같다. 피실험자들의 연령은 평균 23.0세, 신장은 평균 171.7cm, 그리고 체중은 평균 62.5kg을 보였다. 피실험자의 신장과 체중은 '92 국민표준체위조사 보고서[5]의 구분에 따른 25% 미만, 25%-50%, 50%-75%, 75% 이상의 4개 백분위수 구간에 걸쳐 고른

분포를 보였다. 백분위수에 따른 피실험자의 신장과 체중의 분포는 다음 표 2에 나와 있다.

표 1. 피실험자의 인체측정 자료

	평균	표준편차	최대	최소
연령(세)	23.0	2.4	26.0	18.0
신장(cm)	171.7	5.8	185.0	162.0
체중(kg)	62.5	7.5	82.5	50.5

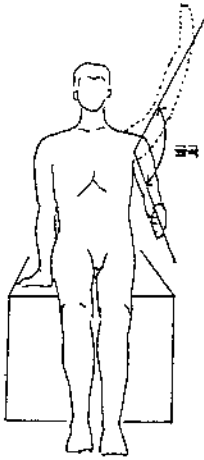
2.2 측정항목 및 방법

본 연구에서는 reach volume의 생성에 필요한 2자유도 동작의 동작범위를 측정하며, 이에는 어깨의 내.외전이 일어날 때의 어깨 굴곡, 가상 hip 관절의 lateral bending 시의 몸통의 굴곡과 hip 관절이 내.외전할 때의 hip 관절의 굴곡을 측정하였으며, 측정방법은 다음 그림 1과 표 3에 나와 있다. 일반적으로 몸통의 움직임은 흉추(thoracic)와 요추(lumbar)를 이루는 여러 개의 뼈들의 움직임의 합으로 나타나나, 이들 개개의 동작범위를 측정하기 어려울 뿐만 아니라 외견상으로 몸통의 움직임이 L5/S1을 기준으로 일어나는 것

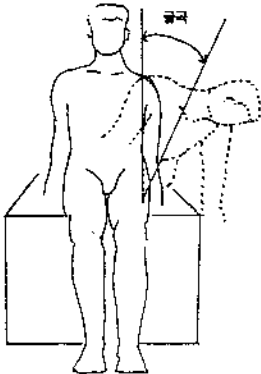
표 2. 인체측정 변수의 등급

측정변수	등 급			
	25% 미만	25-50%	50-75%	75% 이상
신 장	166.0 cm 미만 (9)	166.0-173.1 cm (9)	169.6-173.1 cm (13)	173.1 cm 이상 (16)
체 중	58.0 kg 미만 (13)	58.0-62.0 kg (12)	62.0-68.5 kg (13)	68.5 kg 이상 (8)

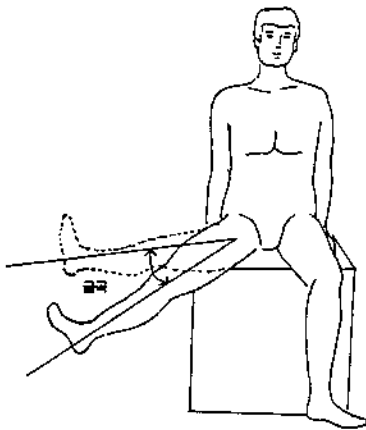
* 괄호안의 수치는 피실험자의 수임



(a) 어깨 관절



(b) 가상 hip 관절



(c) hip 관절

그림 1. 2자유도 동작의 동작범위 측정방법

처럼 보이므로, 본 연구에서는 L5/S1을 가상 hip 관절이라 하여 몸통 운동의 기준 관절로 가정한다. 현재까지 본 연구와 같은 2자유도의 동작범위에 대한 측정은 없었으므로, 본 연구에서는 Laubach[14]와 Kroemer et al.[10] 등이 사용한 1자유도 동작범위의 측정 방법을 결합하여 사용하였다. 예를 들면, 어깨 관절의 내.외전과 굴곡의 측정 방법은 Laubach에 의해 제시되어 있으므로, 이 방법에 따라 어깨를 주어진 수준만큼 내전 혹은 외전한 상태에서 최대 굴곡 각도를 측정한다. 어깨 관절에서는 팔과 손을 곧게 뻗은 상태에서 표 3에 나와 있는 수준에 따라 어깨 관절을 내.외전함에 따른 최대 굴곡 각도를 측정하였으며, 가상 hip 관절에서는 몸통을 표 3의 수준대로 lateral bending할 때의 최대 굴곡 각도를 측정하였다. 그리고 hip 관절에서도 다리와 발을 곧게 펼친 상태에서 표 3의 수준과 같이 hip 관절을 내전 혹은 외전할 때의 최대 굴곡 각도를 측정하였다. 어깨 관절에서 내전을 최대로 하면 팔이 목과 머리에 가려 굴곡을 할 수 없으므로, 내전은 20° 에 대해서만 측정하였다. 측정 기준점과 자세한 측정 방법은 기 [3]의 자료에 자세하게 설명되어 있다.

2.3 측정결과

위에서 측정한 3가지—어깨, 가상 hip 관절, hip 관절—의 2자유도 동작의 동작범위는 다음 표 4에 정리되어 있으며, 표의 수치는 47명의 피실험자의 동작범위의 평균값이며, 표준편차를 병기하였다. 본 연구에서 측정된 인체 각 부위에서의 독립변수인 내.외전 혹은 lateral bending이 0° 일 때를 중립자세

표 3. 2자유도 동작의 동작범위의 측정항목

인체 관절	측정 항목	
	측정 변수	독립 변수
어깨 관절	굴 곡	내전(0°, 20°) 외전(30°, 60°, 90°, 최대*)
가상 hip 관절	굴 곡	lateral bending(30°, 60°, 최대*)
hip 관절	굴 곡	내전(0°, 10°, 최대*) 외전(20°, 40°, 최대*)

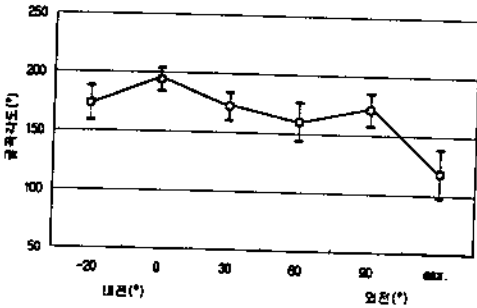
* 주어진 동작에 대한 피실험자의 동작범위 한계를 말함

(neutral position)라 할 때, 표에서 보는 바와 같이 중립자세에서 벗어남에 따라 측정 변수인 각 부위의 굴곡 각도가 감소함을 보이고 있다. 어깨 관절의 경우는 60°까지의 외전이 일어남에 따라 굴곡 각도가 감소하다가, 여기에서 90°까지는 증가 추세를 보이다가 다시 90° 이후의 외전이 일어나면 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 가상 hip과 hip 관

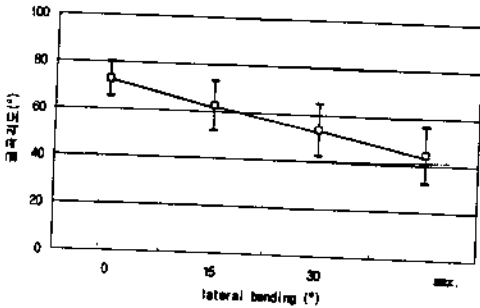
절에서는 lateral bending 혹은 내.외전이 일어남에 따라 단조 감소 추세를 보이고 있다. 측정한 각 부위의 2자유도 동작의 동작범위의 내.외전 혹은 lateral bending의 독립변수에 따른 경향은 다음 그림 2에 나와 있다. 그림에서 보는 바와 같이 hip 관절의 내전 혹은 외전에 따른 굴곡 각도의 감소 정도는 크지 않은 것으로 나타났다.

표 4. 2자유도 동작의 동작범위

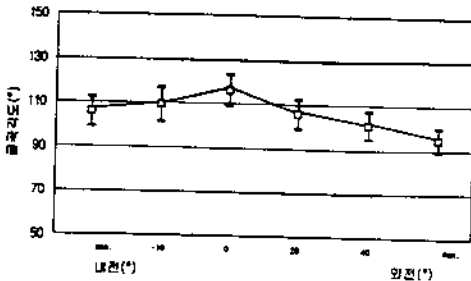
어깨 굴곡	내전 ←		→ 외전				
	20°	0°	30°	60°	90°	최대	
	173.4° (14.6)	194.0° (9.0)	172.0° (12.0)	160.1° (16.2)	171.5° (14.1)	118.4° (20.5)	
가상 hip 굴곡	lateral bending						
	0°		15°		30°		최대
	72.8° (7.4)		62.5° (10.6)		53.7° (11.0)		44.4° (11.9)
hip 굴곡	내전 ←		→ 외전				
	최대	10°	0°	20°	40°	최대	
	105.7° (6.6)	109.2° (7.7)	115.9° (7.2)	105.7° (6.6)	101.1° (6.2)	94.9° (5.3)	



(a) 어깨 관절



(b) 가상 hip 관절



(c) hip 관절

그림 2. 2자유도 동작의 독립변수에 따른 동작범위

2.4 회귀분석

2자유도 동작에서 독립변수로 선정한 어깨의 내·외전, 가상 hip 관절의 lateral bending 과 hip 관절의 내·외전이 각 부위의 굴곡 각도에 미치는 영향의 정도를 알아보기 위하여 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석 결과는 표

5에 정리되어 있으며, 표에서 보는 바와 같이 모든 회귀식이 유의수준 1%에서 통계적으로 유의함을 보이고 있다. 위의 그림 2에서 본 바와 같이 어깨 관절의 경우는 중립위치에서 내전, 중립위치에서 90° 외전할 때까지와 90°에서 최대 외전 각도까지의 3구간으로 굴곡 각도의 증감이 나누어져 있으므로, 회귀분석도 이러한 3구간으로 나누어 각 구간의 식을 구하였다. 그림 2에서 중립자세에서 외전을 90° 할 때까지는 60°를 중심으로 감소하다가 증가하는 추세를 보이고 있으므로, 이 구간에서는 2차식으로 회귀식을 추정하였다. hip 관절은 중립자세를 기준으로 내전과 외전 부분으로 나누어 2구간에 대하여 회귀분석을 실시하였다.

3. reach volume의 생성

본 연구에서는 서론에서 언급한 바와 같이 이 등[4]의 팔 관절의 동작범위, 기 [2]에 의한 가상 hip 관절과 하지 관절의 동작범위와 위에서 제시한 회귀식을 이용하여 2자유도 동작의 영향을 고려한 3종류의 reach volume을 제시하고자 한다. 3종류의 reach volume은 다음과 같으며, 각 reach volume은 초기자세를 취한 다음 해당되는 지체를 굴곡, 신전하는 과정을 지체를 외전 혹은 lateral bending 시켜 가면서 반복하여 생기는 궤적으로 reach volume을 생성한다.

Type I reach volume : 몸통, 팔과 손 등의 상지(upper body)로 파악할 수 있는 reach volume을 의미하며, 여기서는 등뼈의 움직임이 일어난다.

Type II reach volume : 팔과 손으로 파악

표 5. 2자유도 동작의 회귀분석

동원 관절	회 귀 식		회귀식의 p value	R ² (%)
어깨	20° 내전 - 0°	어깨굴곡=195-1.0*어깨내전	0.000	60.0
	0° - 90° 외전	어깨굴곡=164+0.009*(어깨외전-60) ²	0.000	61.0
	90° - 외전한계	어깨굴곡=211-0.67*어깨외전	0.000	78.0
가상 hip	가상 hip 굴곡 = 74.3 - 0.67*lateral bending		0.000	65.5
hip	내전한계 - 0°	hip 굴곡=115.5 - 0.76*hip내전	0.000	38.0
	0° - 외전한계	hip 굴곡=114.8 - 0.40*hip외전	0.000	66.2

할 수 있는 reach volume을 말하며, 몸통 부분은 벨트 등의 장구로 고정되어 있는 것과 같이 움직임이 없다.

Type III reach volume : 앉아 있는 사람의 다리와 발로 파악할 수 있는 영역이며, hip, 무릎과 발목 관절의 움직임이 일어난다.

3.1 인체의 모형화

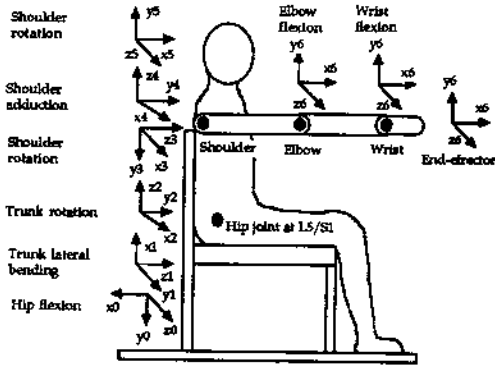
인체는 수백의 자유도(degree of freedom)를 가지고 있어 다양한 자세를 표현할 수 있으나, 이를 해석적으로 다루기는 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 다음의 가정을 도입하여 인체를 몇 개의 link로 연결된 multi-link 시스템으로 간주하여 단순화하고자 한다.

- 1) 인체는 상지와 하지(lower body)의 2부분으로 구성되어 있다.
- 2) 상지와 하지는 좌우 대칭으로 되어 있어, 이는 다시 오른쪽과 왼쪽의 2부분으로 나누어진다.
- 3) L5/S1을 몸통 움직임의 기준이 되는 가상 hip 관절로 가정하고, hip 관절은 하지 동작의 기준이 된다.

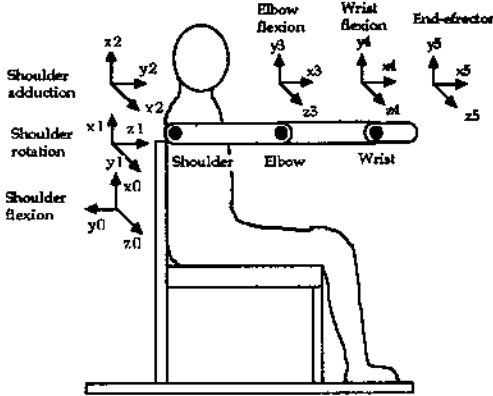
이러한 가정을 바탕으로 상지는 몸통, 상완(upper arm), 전완(lower arm)과 손 등의 5

개의 link로 구성된 multi-link 시스템으로 가정하며, 동작의 자유도는 가상 hip 관절의 굴곡, lateral bending, 내전과 외전(medial-radial rotation), 어깨 관절의 굴곡, 내,외전, 내선과 외전, 팔꿈치의 굴곡, 그리고 손목의 굴곡 등의 8개의 자유도를 가진다. 마찬가지로 하지는 upper leg, lower leg, 발 등의 3개의 link로 구성되며, 동작은 hip 관절의 굴곡, 내,외전, 내선과 외전, 무릎의 굴곡, 발목의 굴곡 등의 5자유도를 가지는 link 시스템이 된다. 상지와 하지의 link 시스템은 그림 3에 나와 있으며, 모든 관절은 revolute joint로 가정한다.

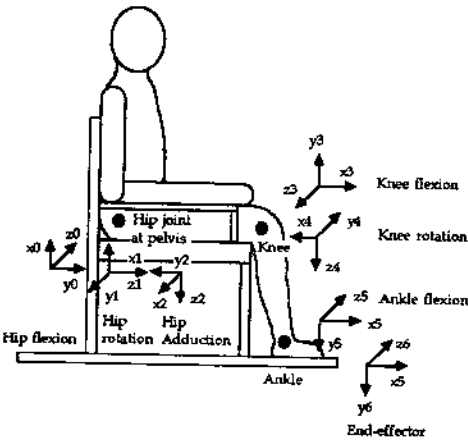
이렇게 정의된 link 시스템에서 각 link의 공간상의 상대적 위치를 표현하기 위하여 로보트 기구학의 표기법(notation)을 사용하였으며, 발표되어 있는 여러가지 기법 중 계산량이 가장 작은 D-H(Denavit-Hartenberg) notation을 사용하였다. 각 자유도를 D-H notation의 4개의 매개변수(parameter)로 표현하면, 손 혹은 발 끝의 위치는 4×4 transformation matrix의 곱으로 나타내진다 [6]. D-H notation의 4개 매개변수는 다음 그림 4에 나와 있다. 인체 모형의 D-H notation의 매개변수는 다음



(a) 몸통을 포함한 상지



(b) 팔



(c) 하지

그림 3. 인체 link 시스템

표 6에 나와 있으며, 4개의 매개변수 중 θ 만이 변수가 되며 나머지는 상수이다. 표 6에서 θ , 옆의 괄호 안의 수치는 link 시스템이 그림 3과 같은 자세일 때의 θ_i 의 값들이다.

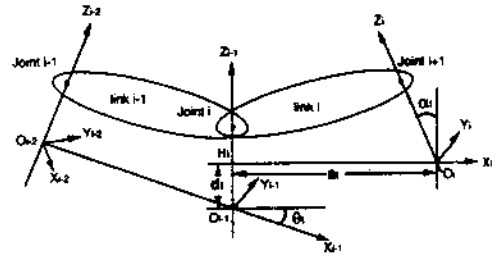


그림 4. D-H notation의 매개변수

표 6. 인체 link 시스템의 매개변수

(a) 몸통을 포함한 상지

관절	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	$\theta_1(-90^\circ)$	90°	0	0
2	$\theta_2(90^\circ)$	90°	0	0
3	$\theta_3(0^\circ)$	-90°	0	l_1
4	$\theta_4(0^\circ)$	90°	0	0
5	$\theta_5(90^\circ)$	90°	0	0
6	$\theta_6(0^\circ)$	0°	l_2	0
7	$\theta_7(0^\circ)$	0°	l_3	0
8	$\theta_8(0^\circ)$	0°	l_4	0

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

(b) 팔

관절	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	$\theta_1(0^\circ)$	90°	0	0
2	$\theta_2(90^\circ)$	90°	0	0
3	$\theta_3(90^\circ)$	90°	l_1	0
4	$\theta_4(0^\circ)$	0°	l_2	0
5	$\theta_5(0^\circ)$	0°	l_3	0

* l_1 : 상완의 길이, l_2 : 전완의 길이
 l_3 : 손의 길이

(c) 하지

관절	θ_i	α_i	a	d_i
1	$\theta_1(0^\circ)$	-90°	0	0
2	$\theta_2(90^\circ)$	-90°	0	0
3	$\theta_3(-90^\circ)$	-90°	l_1	0
4	$\theta_4(180^\circ)$	-90°	0	0
5	$\theta_5(180^\circ)$	90°	0	l_2
6	$\theta_6(0^\circ)$	0°	l_3	0

* l_1 : upper leg의 길이, l_2 : lower leg의 길이

l_3 : 발의 길이

3.2 Type I reach volume

Type I reach volume은 몸통과 팔을 위로 바르게 펼친 상태에서 팔꿈치를 한계만큼 몸통 뒷쪽으로 굴곡시키며, 다시 팔을 위로 바르게 펼친 다음 가상 hip 관절을 최대로 굴곡시켜 얻어지며, 한번 가상 hip 관절을 굴곡하고 난 다음에는 가상 hip 관절을 5° 씩 lateral bending시켜가면서 위의 과정을 반복한다. 본 연구에서는 lateral bending을 5° 씩 증가시켰으나, 좀 더 세밀한 reach volume을 생성하려면 이를 작게 하면 된다. 이 때 몸통의 굴곡 각은 외전 각도에 따라 표 5에서 지시한 회귀식에 의해 구해진다. 이 과정을 가상 hip 관절의 lateral bending 자유도의 동작범위까지 반복하며, 다음에는 어깨의 굴곡과 외전으로 파악할 수 있는 영역을 구한다. 즉, 몸통의 외전 동작범위까지 외전한 상태에서 팔을 바르게 위로 뻗어 한계만큼 팔을 굴곡, 신전하는 과정을 어깨의 외전 동작범위까지 반복한다. 이상의 알고리즘은 다음과 같으며, C 프로그램과 AutoCAD을 이용하여 자동차 운전공간에 reach volume을 나타낸 것은 다음 그림 5에 나와 있다.

Step 1 Initialize posture

; hip flexion = -75°

hip adduction = 81.1° (98.9° for left body)

hip rotation = 0°

shoulder rotation = 0°

shoulder adduction-abduction = 90°

shoulder flexion = 90°

elbow flexion = 0°

wrist flexion = 0°

Step 2 Flex elbow joint backward until angle of elbow flexion reaches limit of range of elbow joint

Step 3 Flex hip joint forward until angle of hip flexion reaches limit of range of hip joint

Step 4 If hip abduction \leq limit of range of hip abduction then hip flexion = -75°

hip abduction = hip abduction + 5°
(hip abduction = hip abduction - 5° for left body) and goto step 2

Step 5 Flex shoulder joint forward until angle of shoulder flexion reaches limit of range of shoulder joint

Step 6 If shoulder abduction \leq limit of range of shoulder abduction then shoulder flexion = 105°

shoulder abduction = shoulder abduction - 10°
(shoulder abduction = shoulder abduction + 10° for left body) and goto step 5

Step 7 End

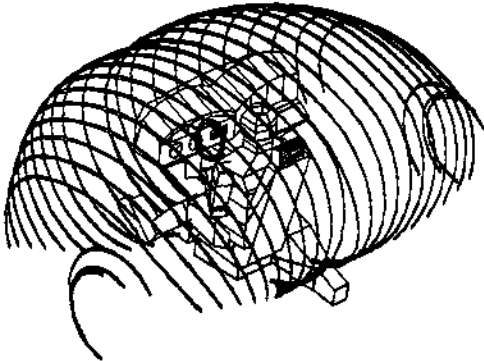


그림 5. Type I reach volume

3.3 Type II reach volume

Type II reach volume도 Type I과 같이 어깨 관절을 내전, 외전시켜 가면서 어깨의 굴곡과 신전을 동작범위 한계까지 하여 생성한다. 생성 과정은 먼저 팔을 위로 곧게 뻗은 상태에서 팔꿈치를 최대한 몸통 뒷쪽으로 굴곡하고, 다시 팔을 수직 상방으로 바르게 뻗은 상태에서 팔을 어깨를 회전점으로 하여 최대한 굴곡, 신전한다. 이 과정을 어깨의 외전 한계까지 5° 씩 외전시켜 가면서 반복한다. 여기서도 어깨의 내, 외전에 따른 어깨의 굴곡 각은 표 5에서 제시한 회귀식에 의해 계산된다. 위의 알고리즘은 다음과 같으며, 생성된 reach volume은 그림 6에 나와 있다.

Step 1 Initialize posture

- ; shoulder flexion = 105°
- shoulder rotation = 90°
- shoulder adduction = 104.9° (75.1° for left body)
- elbow flexion = 0°
- wrist flexion = 0°

Step 2 Flex elbow joint backward until angle of elbow flexion reaches limit of range of elbow joint

Step 3 Flex shoulder joint forward until angle of shoulder flexion reaches limit of range of shoulder joint

Step 4 If shoulder abduction \leq limit of range of shoulder abduction then shoulder flexion = 105°

shoulder abduction = shoulder abduction + 5°

(shoulder abduction = shoulder abduction - 5° for left body) and goto step 2

Step 5 End

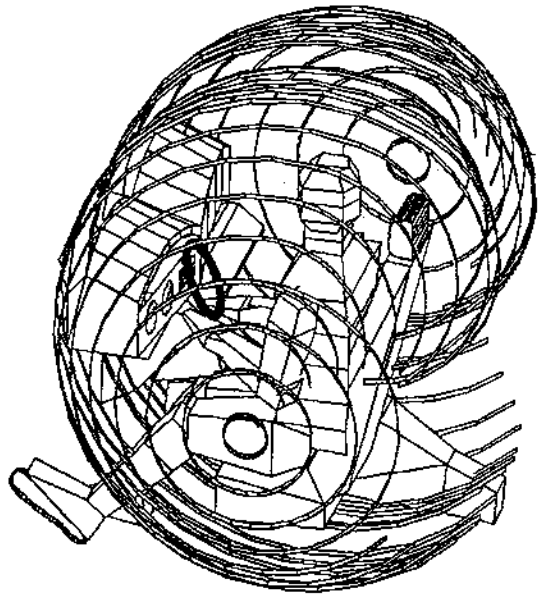


그림 6. Type II reach volume

3.4 Type III reach volume

Type III reach volume은 운용자가 의자에 앉아서 파악할 수 있는 영역이다. 이는 의자에 앉아 다리와 발을 몸의 정중앙 앞으로 곧게 펼친 채로 굴곡의 동작한계만큼 위쪽으로 굴곡한 다음, 다리를 아래로 의자의 좌판에 닿을 때까지 굴곡한다. 이 상태에서 무릎을 동작범위만큼 뒷쪽으로 최대로 굴곡하여 생기는 궤적을 그린다. 다음으로 다리를 5°만큼 외전한 후에 위의 과정을 외전 동작범위 한계까지 반복한다. 여기에서 hip 관절의 굴곡 동작범위는 표 5에서 제시한 회귀식에 의해 내전 혹은 외전함에 따라 줄어든다. 이러한 알고리즘을 정리하면 다음과 같으며, 생성된 reach volume은 다음 그림 7과 같다.

5° for left leg) and goto step 2
Step 5 End

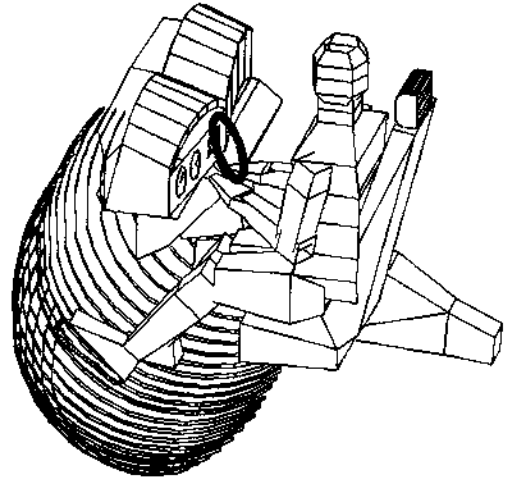


그림 7. Type III reach volume

Step 1 Initialize posture

- ; hip flexion = -25°
- hip rotation = 90°
- hip adduction = -101.2° (78.8° for left leg)
- knee rotation = 180°
- knee flexion = 180°
- ankle flexion = 0°

Step 2 Flex hip joint downward until angle of hip flexion reaches seat pan

Step 3 Flex knee joint backward until angle of knee flexion reaches limit of range of hip joint

Step 4 If hip abduction ≤ limit of range of hip abduction then hip flexion = -25°

hip abduction = hip abduction + 5°
(hip abduction = hip abduction -

3.5 reach volume의 검증

직접 측정이 아닌 로봇트 기구학으로 인체를 표현한 다음, 컴퓨터 프로그램을 통하여 해석적으로 생성된 reach volume을 실제 측정된 reach volume과 비교하고자 한다. 서론에서 살펴 본 바와 같이 현재까지 팔에 관한 reach volume만 측정, 발표되어 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 3종류의 reach volume 중 팔의 도달 가능 공간을 다른 Type II만이 비교 가능하여, 이를 Woodson et al.[15]이 제시한 reach volume과 비교한다. Woodson et al.이 제시한 자료는 다음 그림 8과 같이 의자에 앉은 운용자의 SRL(seat reference level)에서부터 위로 5"씩 증가하여 45" 높이까지의 수평 단면에 대한 reach envelope를 제시하고 있다. 이 중 어깨 높이인 25"와 어깨 아래의 15"의 두 지점의 reach envelope를 본 연구에서 제시한 Type II reach volume과 비교하였

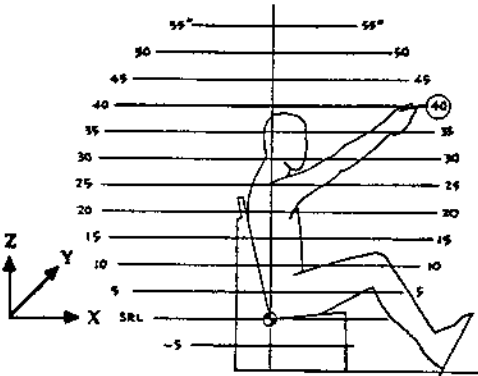


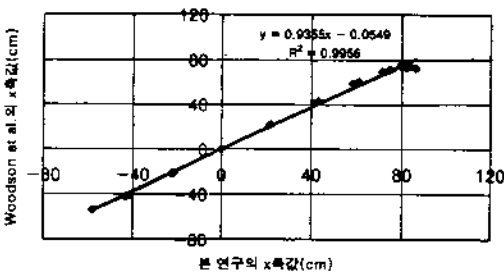
그림 8. Woodson et al.의 reach volume 제시 단면

다. 두 reach volume이 공통으로 제시한 부분도 있고, 어느 한쪽 reach volume에서만 제시하는 부분도 있으나, 본 연구에서는 공통으로 제시된 부분을 비교한다.

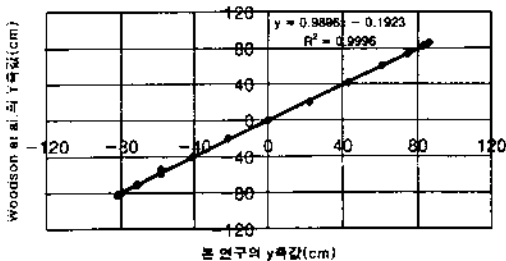
비교 대상은 높이는 같으므로 몸통 전면으로 나오는 x축 값과 몸의 오른쪽에서 왼쪽으로 향하는 y축 값이 되며 (그림 8), 두 reach volume의 좌표값들의 쌍체비교(pairwise T-test) 결과는 다음 표 7에 나와 있다. 표에서 보는 바와 같이 x축 값은 유의수준 5%에서 차이를 보이고 있지 않으나, y축 값은 통계적으로 유의한 차이를 보이고 있다. 그러나

표 7. Woodson et al.과 본 연구의 reach volume의 쌍체비교

	N	Mean	Std. Dev.	T value	P value
x축값의 차이	19	1.879	4.350	1.88	0.076
y축값의 차이	19	-0.795	1.153	-3.01	0.0076



(a) x 축 값



(b) y 축 값

그림 9. Woodson et al.과 본 연구의 reach volume의 비교

Woodson et al.의 reach volume과 본 연구에서 생성한 reach volume의 y축 값의 차이를 보면 -0.795cm에 불과하여, 통계적으로는 차이를 보이나 실제 차이는 매우 작음을 알 수 있다. 이러한 현상은 다음 그림 9에 나와 있는 Woodson et al. 자료의 각 축의 값과 본 연구에서 해석적으로 생성한 자료의 축 값들을 그려놓은 그림에서도 알 수 있다. 그림에서 두 자료의 값들은 거의 일치함을 보이고 있고, 회귀식의 기울기 또한 거의 1.0에 가까운 수치를 보이고 있다. 또한 회귀식의 결정계수(R²)가 거의 1.0에 가까운 높은 수치를 보여 이를 뒷받침해 주고 있다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 직접 측정이 아닌 로봇

기구학으로 인체를 표현하여 해석적으로 손쉽게 reach volume을 생성할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 직접 측정에는 많은 비용과 시간이 수반되나, 제시한 알고리즘을 이용하여 운용자 개인 혹은 집단의 인체측정 자료만 입력하면 컴퓨터 프로그램을 통하여 빠른 시간 안에 reach volume을 구할 수 있는 장점을 가지고 있다. 전술한 바와 같이 본 연구에서 제시한 알고리즘으로 생성한 reach volume은 실제 측정된 reach volume과 큰 차이가 없는 것으로 나타나, 그 효용성을 더욱 높였다 할 수 있다.

또한 측정을 통하여 제시한 연구 결과에는 몸통을 포함한 상지의 reach volume과 다리의 reach volume은 현재까지 포함되어 있지 않다. 반면에 본 연구의 해석적 알고리즘을 이용하면, 이러한 인체 부위의 reach volume도 지체의 길이만 입력하면 구할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 sweeping을 이용하여 로봇틱스에서 다루어지는 workspace를 생성할 때, boundary의 정의가 어려운 문제가 발생한다. 그러나 본 연구에서는 지체를 5° 씩 내전 혹은 외전시켜 가면서, 이 단면에서 팔 혹은 다리의 회전에 의하여 하나의 궤적만 생성하며, boundary 점은 transformation matrix의 곱에 의하여 계산하고 이 과정을 지체를 조금씩 회전시켜 가면서 반복하기 때문에 위의 문제점은 일어나지 않는다. 그림 10에 나와 있는 실제 측정에 의한 Woodson et al.의 reach volume은 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. Woodson et al.의 reach volume은 수평 단면에 대한 수치 자료를 제시하고 있으나, 본 연구와의 비교를 위하여 그림 10과 같이 수직

단면의 형태로 reach volume을 나타내었다.

- 1) 그림 10에서 보는 바와 같이 Woodson et al.의 자료는 SRL보다 낮은 부분과 SRL에서 45" 이상인 부분에 대한 reach volume을 포함하고 있지 않다. 그러나 실제로는 이러한 영역에도 팔이 닿을 수 있음을 알 수 있다.
- 2) SRL에서 높이가 15"-35" 정도되는 등(back) 뒷부분의 자료 - 즉, 어깨 외전이 120° 이상인 부분 - 가 나와 있지 않다. 어깨 외전이 135° 이상인 부분은 높이가 SRL에서 10" 이하와 40" 이상인 부분에만 나와 있다. 본 연구의 reach volume은 이 부분도 팔로 닿을 수 있음을 보이고 있다.
- 3) 몸통의 정면 부분, 즉 어깨 외전이 0° 인 부분의 reach volume이 작게 나타나 실제보다 underestimate하고 있다. 이는 그림 9의 (a)에서 x축이 80cm 이상인 부분(몸통의 정면을 나타냄)에서 차이를 보이고 있는 데서 알 수 있다. 또한 여러 단면에서 어깨 외전이 0° 인 부분의 자료가 제시되어 있지 않다. 그러나 몸의 정면 앞 방향이 가장 멀리 닿을 수 있음을 알 수 있다.

이상에서 본 바와 같이 Woodson et al.의 자료는 팔로 파악할 수 있는 전범위를 포함한 reach volume이라 할 수 없음을 알 수 있다. 반면에 본 연구의 reach volume은 인체 각 관절의 동작범위를 자료로 하여 이 범위 전체에 대하여 지체를 회전하여 구하므로, Woodson et al.의 자료가 가지는 단점을 극복하고 있다. 두 자료의 차이는 몸통의 정면 부분인 어깨 외전이 0°, 15° 인 부분에서 조

금 차이가 나고, 나머지 부분은 거의 같음을 보였다. 위에서 지적한 Woodson et al.의 자료가 가지는 단점은 측정을 하면서 빠뜨린 부분이 아닌가 생각된다.

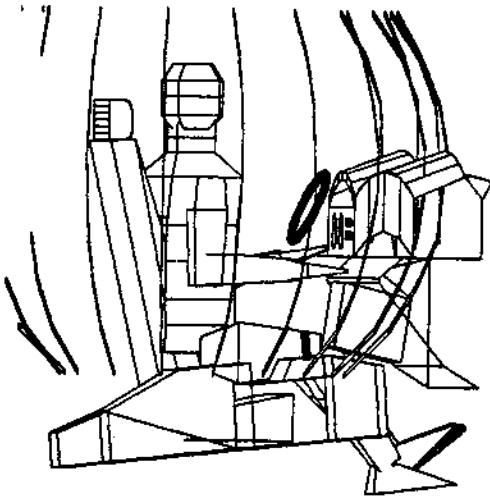


그림 10. Woodson et al.의 reach volume

이상에서 서술한 바와 같이 본 연구에서 제시한 reach volume의 해석적 생성 알고리즘은 2자유도 동작의 회귀식을 통하여 실제 인간의 동작 특성을 반영하여, 정적 길이 치수만 있으면 측정에 의한 reach volume과 차이가 없는 reach volume을, 빠른 시간 내에 쉽게 측정의 비용 부담없이 해석적으로 생성할 수 있는 장점이 있다. reach volume에 대한 측정이 전혀 이루어져 있지 않은 우리의 실정에서, 본 연구에서 제시한 알고리즘으로 생성한 reach volume은 작업장, 비행기 조종석, 자동차 운전공간 등의 설계에 중요한 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 2자유도 동작의 동작범위만 측정하였으나, 2자유도 이상의 동작이 동시

에 일어날 때의 동작범위 및 다양한 자유도의 동작이 다른 자유도의 동작범위에 미치는 영향에 대한 연구가 추후에 이루어지면, 좀 더 정확한 reach volume의 생성이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 기도형, 동작과 가시도가 개선된 인간공학 인터페이스 모델의 개발, 포항공과대학교 박사학위논문, 1993.
- [2] 기도형, "한국 대학생의 가상 hip 관절과 하지관절의 동작범위 측정", 대한인간공학회지, Vol. 15, No. 2. 1996. pp. 125-135.
- [3] 기도형, "작업영역의 해석적 생성을 위한 2자유도 동작의 동작범위 측정", 대한인간공학회지, Vol. 15, No. 2. 1996. pp. 15-24.
- [4] 이영신, 이석기, 박세진, 김철중, "한국인 20대 청년의 팔 관절 동작범위 측정 연구", 대한인간공학회 춘계학술발표대회, 1995, pp. 62-71.
- [5] 한국표준과학연구원, 산업제품의 표준치 설정을 위한 국민표준체위 조사 보고서, 공업진흥청, 1992.
- [6] Asada, H., and Slotine, J.-J.E., Robot analysis and control, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [7] Bullock, M.I., "The determination of functional arm reach boundaries for operation of manual controls", Ergonomics, Vol. 17(3), 1974, pp. 375-388.
- [8] Case, K., Porter, J.M., and Bonney, M.C., "SAMMIE : a man and workplace model-

- ling system", In : Karwowski, W., Genaidy, A.M., and Asfour, S.S.(ed.), Computer Aided Ergonomics, Taylor & Francis, London, pp. 31-56.
- [9] Kennedy, K.W., Reach capability of the USAF population, AMRL-TDR-64-59, Wright-Patterson Air Force Base, AD608-269, 1964.
- [10] Kroemer, K., Kroemer, H., and Kroemer-Elbert, K., Ergonomics : How to design for ease & efficiency, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1994.
- [11] Li, S., and Xi, Z., "The measurement of functional arm reach envelopes for young Chinese males", Ergonomics, Vol. 33(7), 1990, pp. 967-978.
- [12] McFarland, R.A., Damon, A., and Stoudt, H.W., "Anthropometry in the design of driver's workspace", American J. of Physical Anthropometry, Vol.16(10), 1958, pp. 1-23.
- [13] Nowak, E., "Determination of the spatial reach area of the arms for workplace design purposes", Ergonomics, Vol.21(7), 1978, pp. 493-507.
- [14] Webb Associates, Anthropometric Source Book, Vol. I, Ch. Vi, NASA Ref. 1024, National Aeronautics and Space Administration, 1978.
- [15] Woodson, W.E., Tillman, B., and Tillman, P., Human factors design handbook, 2nd ed. McGraw-Hill, Inc., New York, 1992.