

Reach 동작예측 모델의 개발

A Trajectory Prediction of Human Reach

최재호, 정의승

포항공과대학교 산업공학과

ABSTRACT

A man model is a useful design tool for the evaluation of man machine systems and products. An arm reach trajectory prediction for such a model will be specifically useful to present human activities and, consequently, could increase the accuracy and reality of the evaluation. In this study, a three-dimensional reach trajectory prediction model was developed using an inverse kinematics technique. The upper body was modeled as a four link open kinematic chain with seven degrees of freedom. The Resolved Motion Method used for the robot kinematics problem was used to predict the joint movements. The cost function of the perceived discomfort developed using the central composite design was also used as a performance function. This model predicts the posture by moving the joints to minimize the discomfort on the constraint of the end effector velocity directed to a target point. The results of the pairwise t-test showed that all the joint coordinates except the shoulder joint's showed statistically no differences at $\alpha = 0.01$. The reach trajectory prediction model developed in this study was found to accurately simulate human arm reach trajectory and the model will help understand the human arm reach movement.

1. 서 론

인체의 형태 또는 동작을 컴퓨터 상에서 표현하는 인체모델은 인간-기계 시스템 또는 제품의 설계단계에서 부터 인간공학적 요소를 효과적으로 반영할 수 있는 유용한 도구이다. 그러나 기존의 3차원 인체모델은 인체의 자세를 자동적으로 표현해주는 기능을 제공하지 못하여 사용하기에 매우 불편할 뿐만 아니라 정확한 자세의 표현이 어려운 형편이다. 이러한 이유로 기존의 인체모델이 제품설계에 널리 사용되지 못하고 있으며 인체모델을 이용한 제품의 정밀한 평가도 이루어지지 못하고 있다(Kuusisto and Mattila, 1990).

인체모델이 효과적으로 이용되기 위해서는 제품이나 설비내에서 실제 작업자가 취

하는 자세를 예측할 수 있는 자세예측모델이 제공되어야 하며, 특히 인간-기계 시스템에서 가장 많이 사용되어지는 인체부위인 팔과 상체의 동작인 Reach 자세의 예측이 우선적으로 요구된다. 그러나 인체는 관절의 여유자유도로 인한 Redundancy 때문에 동일한 작업을 수행하는 데도 수많은 가능한 자세들을 취할 수 있어 실제 인간이 취하는 자세를 예측하는 것은 쉽지 않으며, 이러한 자세예측 문제를 해결하기 위하여 최적화기법, Robotics, Neural Networks 및 Heuristics 등을 이용한 다양한 기법이 연구되었다.

SAMMIE, BOEMAN, COMBIMAN, PLAID/TEMPUS 등과 같은 인체모델들이 Reach 기능을 제공하고는 있으나, 이들은 모두 Reach의 가능성 여부만을 판단할 수 있는 Heuristic 알고리즘을 사용하고 있다(Jung, Kee and Chung, 1992). 최근에는 Korein(1985)이 Reach Hierarchy Method를 발표하였으며, Jung(1992) 등은 Robotics의 Inverse Kinematics 기법인 Resolved Motion Method와 JRA Performance Function을 사용하여 Reach 동작을 표현하는 방법을 제시하였다. Jung et al(1994)은 심물리학적 안락도(Psychophysical discomfort)를 비용함수로 사용하여 Reach 자세를 비교적 정확하게 예측하였으며, 이는 인간이 특정 작업을 수행하는데 취할 수 있는 가능한 자세들 중에서 가장 안락하게 느끼는 자세를 취한다는 것을 의미한다.

그러나 이러한 방법들은 주어진 목표지점에 손을 위치시켰을 때의 자세, 즉 Reach 동작이 완료된 상태의 최종 자세를 예측하는 것으로 Reach가 이루어지는 과정상의 동작을 표현하지는 못하였다. Reach가 이루어진 후의 최종자세 뿐만 아니라 움직이는 과정상의 동작을 예측하는 것은 인체모델을 이용한 제품 평가시 현실감을 제고시킬 수 있으며 동작의 제한성 여부도 평가할 수 있어 평가의 정확도를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 기존의 Reach 자세예측에서 더 발전하여 Reach 동작시 인체의 움직임 예측하여 표현할 수 있는 모델을 개발하였다.

인체 팔의 움직임에 관한 연구는 손, 즉 End effector의 경로와 각 관절 움직임의 조절(Control)에 관한 것으로 대별될 수 있다. 한 지점에서 다른 지점으로 손이 움직이는 경로는 직선 경로를 따른다는 연구들이 여러차례 발표되었으나(Morasso, 1981, Soeching and Lacquaniti, 1981, Abend et al, 1982, Hollerbach and Flash, 1982), Atkeson과 Hollerbach(1985)는 수직적인 움직임에서는 곡선 경로를 나타낸다는 연구 결과도 제시되었다. 팔 움직임의 조절에 관해서는 기존의 자세예측 모델들이

주로 사용해왔던 비용함수의 개념으로, 각 관절에는 독립적인 비용함수가 설정되어 있고 전체 비용함수의 값을 가능한한 최소화하도록 팔을 움직인다는 가정이 제시되었으며 (Cruse, 1986), 이를 토대로 팔의 움직임에 관한 모델을 제시하였다(Cruse and Bruwer, 1987).

그러나 이러한 팔의 동작에 관한 연구들은 모두 2차원 평면상의 움직임으로 제한된 상태에서의 동작에 관한 것으로, 공간적 제약이 없는 3차원 상에서의 움직임에 확대 적용하기에는 무리가 있으며, Cruse와 Bruwer(1987)의 모델 또한 3차원으로 확장하기는 어렵다. 본 연구에서는 3차원 공간상에서의 팔의 동작과 Jung et. al.(1994)이 제시한 심물리학적 안락도(Psychophysical discomfort)를 비용함수로 사용하여 팔의 움직임을 예측할 수 있는 모델을 제시하였다.

2. Reach 동작예측 모델

본 연구에서는 손의 움직이는 경로는 3차원 공간상에서 직선 경로를 따르며, 사람은 자신이 느끼는 심물리학적 불편함(Psychophysical discomfort)을 최소화하도록 동작을 취한다는 가정을 전제로 Reach 동작예측 모델을 개발하였다.

상체 모델링

Reach자세의 예측을 위해 상체를 Open Kinematic Chain으로 모델링하였으며, 상체를 몸통, 상완, 하완과 손 4개의 Rigid Link로 구성된 3차원 Multi-link System으로 표현하였다. 이 Multi-link System은 모든 관절을 Revolute Joint로 가정하였으며, Hip Flexion(HF), Hip Lateral Bending(HB), Shoulder Flexion(SF), Shoulder Abduction(SA), Shoulder Rotation(SR), Elbow Flexion(EF)과 Wrist Flexion(WF)의 총 7개 자유도를 지닌 Manipulator로 표현된다. 3차원 상에서 7개의 자유도를 갖는 4 Link Open Kinematic Chain으로 구현된 상체모델은 정해진 위치에 손을 위치시키기 위해 필요한 수의 자유도보다 더 많은 자유도를 지닌 Redundant 시스템이며, 오른쪽 상지에 대한 Link System은 그림 1과 같다.

기술한 상체 Multi-link System 각 Link간의 위치와 방향, Kinematic

Relationship을 표현하기 위해서는 Robotics에서 사용하는 4X4 행렬의 D-H (Denavit-Hartenberg) Notation을 사용하였다.

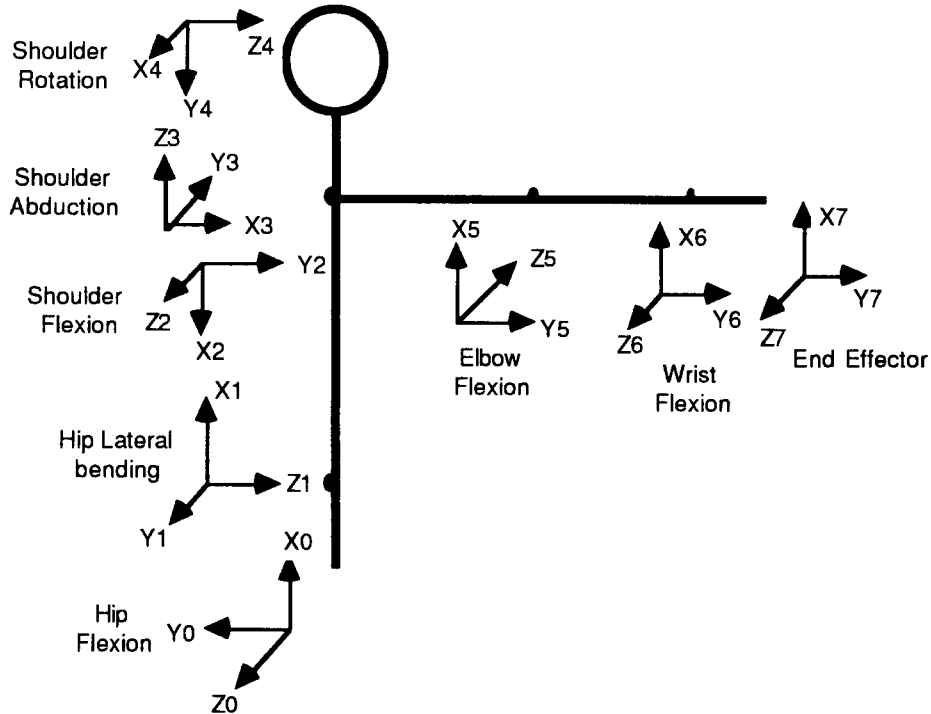


그림 1. 상체의 Multi-link System

Resolved Motion Method를 이용한 Reach 동작예측 모델

본 연구에서는 Reach 동작예측을 위하여 Robotics Inverse Kinematics에서 Redundant manipulator의 해법에 사용하는 Resolved Motion Method기법을 사용하였다. Redundant manipulator에 관한 해법으로는 크게 Kinematic control of local optimization과 Kinematic control of global optimization의 두가지 방법이 있으며(Liegeois, 1977, Tsai and Soni, 1981), 전자는 계산량은 적지만 최적해(Global optimality)를 보장해 주지 못하고, 후자는 반대로 최적해를 보장해 주지만 계산량이 많다는 장단점이 있다. 본 연구의 목적은 인체모델에서의 Reach동작을 On-line으로 표현하고자 하는데 있으므로 Local optimization 기법을 사용하였다. Local optimization 기법에는 Pseudo-inverse control, Resolved motion method, Task-priority based kinematic control, Extended Jacobian method, Inverse

kinematic method, Inverse function method 등의 기법이 있으며, 이 중 본 연구에서는 가장 인체의 동작과 유사한 Resolved motion method를 사용하였다(Klein and Huang, 1983).

Resolved Motion Method는 End effector의 속도(Velocity)가 일정할 때 각 관절의 각속도를 구하는 방법으로, 식은 다음과 같다.

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

$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$: Joint vector

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$: 손(End effector)에 대한 위치 Vector

\mathbf{J} : Manipulator Jacobian

\mathbf{J}^+ : Moore-Penrose pseudoinverse

\mathbf{I} : nxn identity matrix

$\nabla \mathbf{H}(\theta)$: Performance function $\mathbf{H}(\theta)$ 의 Gradient

위 식이 의미하는 바는 End effector가 도달해야 하는 목표지점(\mathbf{x})가 주어지고 End effector가 초기위치에서 목표지점으로 일정속도($\dot{\mathbf{x}}$)로 움직일때 각 관절의 이동변위 ($\dot{\theta}$)를 구하는 것으로 Inverse kinematics에 해당한다. 위 식의 앞부분 $\mathbf{J}^+ \dot{\mathbf{x}}$ 은 End effector가 공간상에서 이동하는 실제 움직임을 의미하며, 뒷부분 $(\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \nabla \mathbf{H}(\theta)$ 은 End effector의 실제 움직임은 아니나 관절의 다양한(Redundant)움직임으로써, 물리적으로는 Internal motion(Self motion)의 의미를 가진다. 즉, End effector의 위치를 고정시킨 채 여타 관절들을 움직여서 다른 자세(Configuration)을 취하는 것을 의미하며, End effector의 위치에 의해 주어진 제약하에서 Performance function $\mathbf{H}(\theta)$ 를 최소화하는 각 관절의 이동변위를 구하는 것이다. 따라서 위 식을 이용하여 인체의 동작을 예측하기 위해서는 Performance function $\mathbf{H}(\theta)$ 가 자세예측에서 사용되는 비용함수의 역할을 하게되며, 사람의 움직임을 설명할 수 있는 Performance function $\mathbf{H}(\theta)$ 를 선정하는 것이 중요하다. Performance function $\mathbf{H}(\theta)$ 에는 Manipulability measure, Condition number, Minimum singular value, Joint range availability(JRA), Compatibility index, Minor measure, Winding number 등이 Manipulator의 움직임을 융통성있고 자연스럽게 하기 위하여 제시되어 있으나(Klein and Blaho, 1987,

Liegeois, 1977). 인간의 실제 동작을 표현하는데 적합하지는 않다. 본 연구에서는 Performance function $H(\theta)$ 로 Jung et al(1994)이 제시한 비용함수인 심물리학적 안락도(Psychophysical discomfort)를 사용하여 팔의 움직임을 예측할 수 있는 모델을 제시하였다.

3. 동작예측 결과

본 연구에서 개발된 Reach 동작예측 모델로 예측된 움직임의 예를 그림 2에 제시하였다. 그림 2에서 좌측은 모델에 의해 예측된 동작이며 우측은 실제 사람이 움직인 자세로, 실제 사람이 취한 자세와 상당히 유사하게 예측하였다.

모델의 예측도를 통계적으로 평가하기 위하여 모델에 의해 예측된 동작과 실제 사람이 움직인 동작에서의 각 관절의 좌표를 Pairwise t-test로 비교하였다. 4개의 목표지점에 대하여 실제 사람이 Reach동작을 행한 모습을 3차원 Motion Analysis System을 사용하여 각 관절의 위치를 측정하였으며, 각 관절이 움직인 경로상의 4개 지점에서 측정된 관절위치의 x, y, z 좌표에 대해 모델에 의해 예측된 관절좌표와 Pairwise t-test를 수행하였다. Pairwise t-test 결과는 표 1과 같다. Pairwise t-test 결과 Hand와 Wrist의 좌표는 유의수준 0.05에서, Elbow는 유의수준 0.01에서 통계적으로 차이가 없는 것으로 나타났으나, Shoulder는 유의수준 0.01에서 통계적인 차이가 있는 것으로 분석되었다.

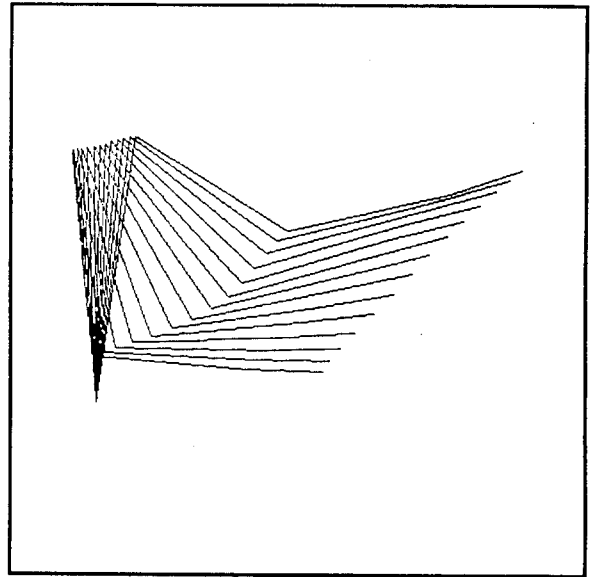
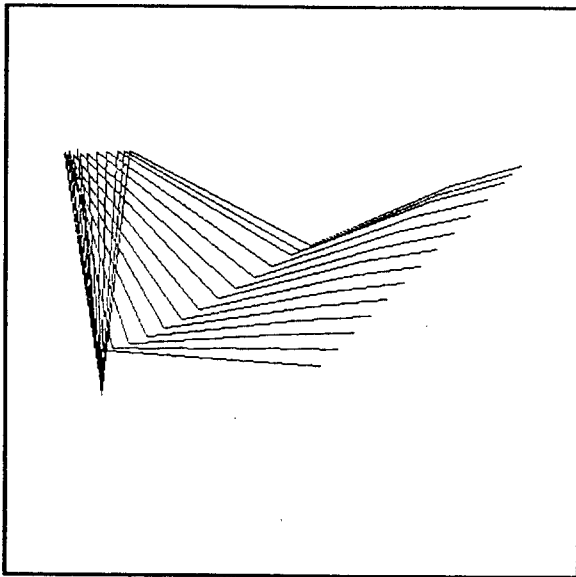
표 1. Pairwise t-test 결과

Joint	N	Mean	S.D.	SE Mean	T	P-value
Shoulder	48	1.550	2.273	0.315	4.42	0.001
Elbow	48	-0.864	2.702	0.417	-2.07	0.044*
Wrist	48	-0.110	1.590	0.230	-0.48	0.63**
Hand	48	0.168	0.802	0.116	1.46	0.15**

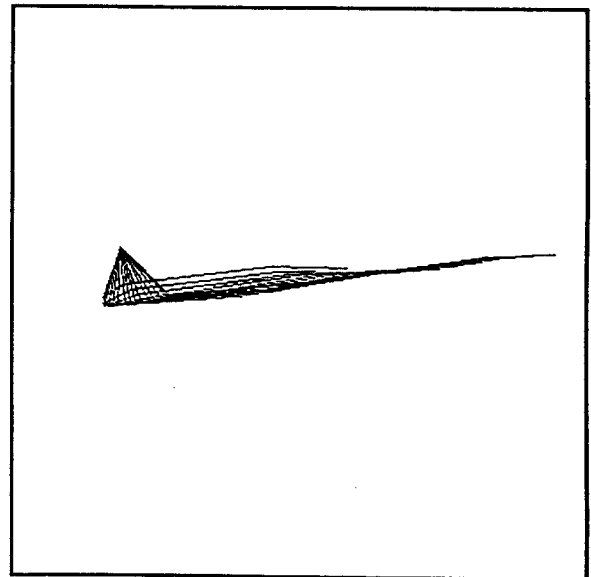
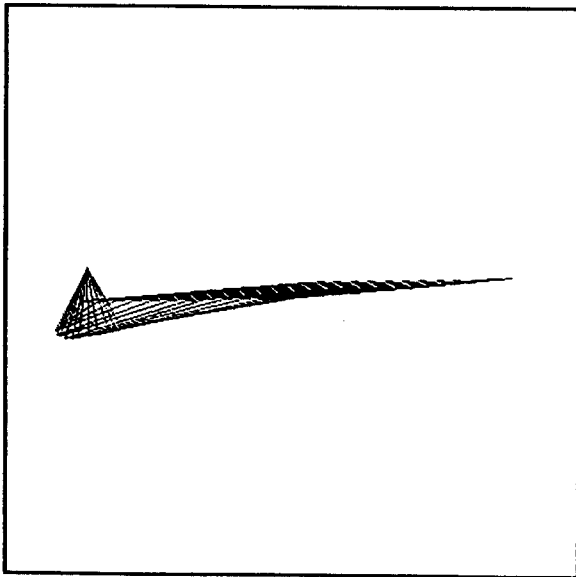
* 유의수준 0.01에서 차이없음

** 유의수준 0.05에서 차이없음

Sagittal view



Horizontal view



모델 예측 결과

실제 측정 결과

그림 2. Reach 동작예측 결과의 비교

4. 토 의

본 연구에서 개발된 Reach 동작예측 모델로 예측된 관절의 좌표와 실제 사람의 동작시 측정된 좌표간의 Pairwise t-test 결과 Hand와 Wrist의 좌표는 유의수준 0.05에서, Elbow는 유의수준 0.01에서 통계적으로 차이가 없는 것으로 나타났으나, Shoulder는 유의수준 0.01에서 통계적인 차이가 있는 것으로 분석되었다. Shoulder 좌표가 차이가 나는 주된 이유는 인체의 몸통(Torso)을 1개의 Rigid body로 모델링했기 때문인 것으로 생각된다. 실제 인체의 몸통은 유연성을 가지고 있는 척추로 이루어져 있어 동작시 1개의 Rigid body와는 다른 형태를 보이게 된다. 또한 인체는 Sternoclavicular joint를 가지고 있어 팔 동작시 상체의 동작에 참여하고, 따라서 Shoulder joint의 위치가 Sternoclavicular joint의 움직임에 의해 변화하게 된다. 이러한 이유로 인해 한개의 Rigid body로 모델링한 것과 실제 인체와는 몸통의 Link length 및 Hip joint의 움직임에서 주된 차이가 나타나 Shoulder joint의 위치가 모델 예측치와 차이가 발생한다. 이러한 차이를 보정하기 위해서는 몸통을 자유도를 지닌 Link system으로 구분하여 모델링하는 것이 필요할 것이다.

Resolved Motion Method는 End effector의 속도(Velocity)를 일정하게 주고 각 관절의 각속도를 구하는 방법으로, 이는 End effector, 즉 손이 시작점에서 목표지점까지 직선경로로 움직인다는 가정하에 동작을 예측하는 것이다. 이는 한 지점에서 다른 지점으로 손이 움직이는 경로는 직선 경로는 따른다는 연구들(Morasso, 1981, Soeching and Lacquaniti, 1981, Abend et al, 1982, Hollerbach and Flash, 1982)과 일치하는 가정이다. 또한 본 연구결과에서도 손의 움직임은 직선 경로와 통계적으로 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 Atkeson과 Hollerbach(1985), Cruse와 Bruwer(1987)는 곡선 경로를 따른다는 연구 결과도 제시되었으나, 이는 2차원 상에서 동작이 제한된 상태에서 나타나는 현상으로 생각된다. 즉, 3차원 공간상에서는 움직임의 제한이 없는 상태에서는 여유도가 커 직선경로를 유지하는 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서 Resolved Motion Method와 심물리학적 안락도의 비용함수를 사

용하여 개발한 Reach 동작예측 모델이 3차원 공간상에서 상체의 Reach 동작의 움직임 을 비교적 정확하게 예측하였다. 따라서, 심물리학적 안락도에 근거하여 인간의 동작을 예측하는 것이 타당하다고 할 수 있으며, 이는 인간의 동작을 이해하는데 도움이 될 것으로 생각된다. 또한 본 연구에서 개발된 Reach 동작예측 모델은 인체모델에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Abend, W., Bizzi, E. and Morasso, P.(1982) Human arm trajectory formation, Brain, 105, pp. 331-348.
- Atkeson, C.G. and Hollerbach, J.M.(1985) Kinematic features of unrestrained vertical arm movements. J. Neuroscience, 5, pp. 2318-2330.
- Cruse, J. and Bruwer, M.(1987). The human arm as a redundant manipulator: The control of path and joint angles. Biological Cybernetics, 57, 137-144.
- Jung, E.S., Kee, D. and Chung, M.K.(1992). Reach posture prediction of upper limb for ergonomic workplace evaluation. In Proceedings of the Human Factors Society 36th Annual Meeting(pp. 702-706). Santa Monica, CA: Human Factors Society.
- Jung, E.S., Choe, J. and Kim, S.H.(1994) Psychophysical cost function of joint movement for arm reach posture prediction. In Proceedings of the Human Factors Society 36th Annual Meeting. Santa Monica, CA: Human Factors Society.
- Hollerbach, J.M. and Flash, T.(1982) Dynamic interactions between limb segments during planar arm movement. Biological Cybernetics, 44, pp. 67-77.
- Kaminski, T. and Gentile, A.M.(1986) Joint control strategies and hand trajectories in multijoint pointing movements. J. of Motor Behavior, 18, pp. 261-278.
- Klein, C.A. and Blaho, B.E.(1987). Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators, Int. J. Robotics Research, 6, 72-83.
- Klein, C.A. and Huang, C.H.(1983). Review of pseudoinverse control for use with kinematically redundant mechanisms, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, SMC-13, 245-250.

- Korein, J.U.(1985). A geometric investigation of reach. MIT press.
- Kuusisto, A. and Mattila, M.(1990). Anthropometric and biomechanical man models in computer-aided ergonomic design - structure and experiences of some programs. In W. Karwowski, A. M. Genaidy and S.S. Asfour(Ed.), Computer-Aided Ergonomics (pp.31-56). London, Taylor and Francis.
- Liegeois, A.(1977). Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms. IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, SMC-17, 868-871.
- Morasso, P.(1981) Spatial control of arm movements. Experimental Brain Research, 42, pp. 223-227.
- Soechting, J.F. and Lacquaniti, F.(1981) Invariant characteristics of pointing movement in man, J. of Neuroscience , 1, pp. 710-720.