

# Complex Method 를 이용한 자세 예측

## Application of the Complex Method to Posture Prediction

박우진\*, 최재호\*\*, 정의승\*

\*포항공과대학교 산업공학과

\*\*대진대학교 산업공학과

### Abstract

Human posture prediction and motion simulation methods try to solve inverse kinematic problems based on the optimization concept. It is of great concern to develop an optimization method which solves complicated optimization models in an efficient way in order for the models to be biomechanically sound. In this study, a new optimization method for posture prediction, which is named the Complex Method, is presented. The Complex Method demonstrates more flexibility in a way that it can deal with various forms of objective functions with constraints. This is because the method is a function-value-based approach. A two-dimensional whole-body lifting task was selected as an example of posture prediction, and a comparison study with the incrementation method was conducted in order to evaluate the accuracy of the Complex Method.

#### 1. 서론

인간의 신체는 수백개의 자유도를 갖는 Open Kinematic Chain 으로 모델링할 수 있으며, 대단히 유연한 구조인 동시에 Kinematic Redundancy 를 갖게 된다. 즉, 손이나 발이 어떤 한 지점에 위치될 때, 무수히 많은 가능한 자세가 존재하며, 이 자세를 예측하기가 난이한 것으로 알려져 있다. 이러한 정적인 자세의 예측(Posture Prediction)과 동적인 동작 시뮬레이션(Motion Simulation)은 주로 인간공학 분야와 컴퓨터 애니메이션 분야에서 주로 연구되어 왔는데, 애니메이션이 인간의 자연스러운 동작을

모사하는 것에 초점을 둔 반면, 인간공학 분야의 연구는 인체의 특성을 고려한 모델을 개발하여, 이를 작업환경의 평가 및 개선과 같은 응용 분야 적용하기 위한 것이다.

인간공학 분야에서는 오래 전부터 Manual Materials Handling 시 인체에 부과되는 Stress 를 평가하기 위해 인체역학적 모델들이 개발되었다. 그러나, 인체역학적 분석을 위해서는 작업시의 인간의 자세에 대한 데이터, 즉 정역학 모델의 경우 관절각, 그리고 동역학적 분석인 경우 관절각의 시간에 대한 변화를 미리 알고 있어야만 한다는 문제점이 있다. 실험을 통해 이러한 자

료를 얻는 방법은 시간적으로 비경제적이며, 피 실험자를 구하기가 어려우므로, 이론적으로 인간의 자세를 예측하기 위한 연구들이 수행되어 왔다 (Hsiang and Ayoub, 1994). 또한, 응용을 위한 목적이외에도, 인체의 자세나 동작을 인공적으로 재구성하여, 이의 원리를 밝히려는 학문적인 관심도 있었다. 자세 예측 및 동작 시뮬레이션은 Ergonomic CAD System의 사용성 평가 기능으로서도 대단히 중요하다. Ergonomic CAD System은 전통적 CAD System에 인체모형을 통합한 인간공학적 CAD System이며, 제품 설계시 시제품이나 모형대신 컴퓨터 모의실험을 통한 인간-기계 상호작용의 평가를 그 목적으로 한다. 따라서, 인체 모형의 손이나 발이 어떤 지점에 닿을 때, 그 자세 및 동작의 궤적을 예측하는 Reach Prediction Model의 개발은, Ergonomic CAD System의 중요한 평가 기능 중의 하나이다 (Kee, 1993).

자세 예측 및 동작 시뮬레이션을 위한 기존의 연구들을 살펴보면, 대부분 Nubar와 Contini(1961)가 제시한 Minimum Principle에 기본 가정을 두고 있다. Minimum Principle에 따르면, 인간은 그의 자세나 동작을 취함에 있어, 내부적인 목적함수를 가지고 있어서, 주어진 제약 조건내에서 이를 최소화 또는 최대화하는 방식으로 행동한다는 것이다. 따라서 인체의 동작원리를 반영하는 목적함수와 제약조건을 수리적으로 모델링하여, 이를 최적화 기법으로 해결하려는 노력이 계속되어 왔다. Byun(1994)은 Lifting 작업시의 자세예측을 위하여, 인체의 2차원 모델을 설정하고, Minimum Energy Expenditure, Minimum Back Compression Force, Minimum Perceived Stress Level, Minimum Stress Level의 4가지 목적함수와 인체의 특성을 반영한 제약조건들을 사용하였다. 비선형 최적화 문제를 해결하기 위하여 Incrementation

Method를 사용하였다. Lee(1988)와 Hsiang(1992)은 Lifting 작업시 인체의 동작 시뮬레이션을 2차원 인체모형을 이용하여 구현하였다. 목적함수는 각 관절에 걸리는 모멘트와 관절이 낼 수 있는 최대 모멘트의 비율 제공한 것이며, Kinetic, Kinematic, 그리고 작업장의 Layout을 반영한 Constraint를 사용하였다. 최적화 기법으로는 Lee(1988)가 Dynamic Programming을, Hsiang(1992)은 Generalized Reduced Gradient Method를 이용하였다. Kee(1993)는 Reach 동작의 3차원 시뮬레이션을 구현하기 위하여, Redundant Manipulator의 해법 중 하나인 Resolved Motion Method를 사용하였으며, 관절 각이 Range of Motion의 극단에 이르는 현상을 막기 위하여, Joint Range Availability를 목적함수로 사용하였다. Choe(1995)는 Reach 동작의 시뮬레이션을 위해 Psychophysical Discomfort를 반영하는 목적함수를 개발하였다.

Minimum Principle에 기반을 둔 자세 예측 및 동작 시뮬레이션의 정확성은 목적함수와 제약조건식을 얼마나 인간의 동작원리에 가깝게 모델링하는가에 달려있다. 기존 연구들의 경우, 목적함수와 제약식은 인체계측자료, 역학공식, 작업환경등에 관련된 것이었으며, 비선형의 복잡한 수식으로 표현되었다. 또한, 사실적인 모델의 개발을 위해, 근육과 같이 수학적으로 복잡하게 표현되는 대상체를 모델에 포함시키고자 하는 경우, 최적화 문제는 더욱 풀기 힘든 형태를 취하게 된다. 따라서, 생리학적, 해부학적 특성들을 고려하여 인간의 동작원리에 가까운 발전된 모델을 개발하기 위해서는, 복잡한 비선형 최적화 문제들을 능률적으로 해결하는 최적화 기법의 개발이 절실히 요구된다.

본 연구에서는 자세예측 및 동작시뮬레이션시 발생하는 복잡한 최적화 문제를 유연하게 해결하기 위한 방법으로서, Complex Method를 도

입하였으며, 실제 자세예측을 수행하였다. Complex Method의 적용 타당성을 검증하기 위하여 Enumeration Approach인 Incrementation Method와의 비교평가를 수행하였다.

## 2. 기존 최적화 기법에 대한 고찰

Byun(1994)이 사용한 Incrementation Method는 Solution Space를 작은 크기의 격자로 나누어 격자상의 모든 점에 대해 목적함수값과 제약조건의 만족여부를 체크한 후, 이들 중 최적해를 찾아내는 방법이다. 격자의 크기가 충분히 작으면, Global Optimum을 찾을 수 있다는 장점이 있으나, Enumeration Approach이므로, 결정변수(Decision Variables)가 늘어남에 따라 문제해결에 걸리는 시간이 폭발적으로 증가하게 된다. 따라서 문제의 Size가 큰 경우나, 실시간에 해를 구하고 싶을 경우, 적용이 곤란하다는 문제점이 있다. Lee(1988)는 Lifting 작업의 동작 시뮬레이션을 구현하기 위하여, Heuristic Dynamic Programming을 사용하였다. 그러나 이 방법은 초기해에 대한 민감성이 커서, 매 Iteration마다 관절각의 변화가 너무 크거나 너무 작을 경우, 최적해로의 수렴을 보장하지 못하는 것으로 알려져 있다 (Hsiang, 1992). Hsiang(1992)는 Lifting 작업의 동작 시뮬레이션을 위한 최적화기법으로서 Generalized Reduced Gradient Method를 사용하였다. 이 방법은 매 Iteration마다 목적함수를 증가 또는 감소시키기 위해, 목적함수의 Gradient를 이용하며, Local Optimum을 보장한다. 그러나, 미분이 불가능한 목적함수나, 매우 복잡하여 도함수의 전개가 까다로운 목적함수에는 적용하기가 어렵다는 단점이 있다. Kee(1993)와 Choe (1995)는 3차원 Reach 동작의 시뮬레이션을 구현하기 위하여, Resolved Motion Method를 사용하였다. Local Optimum을 실시간에 구해내는 해석적 방법으

로서, Ergonomic CAD System의 On-Line 평가 기능 구현시 적절한 방법이다. 그러나, 제약조건을 다룰 수 없다는 단점도 존재한다.

자세예측 및 동작 시뮬레이션 구현을 위해 사용되었던 기존의 방법들을 고찰해 볼 때, 바람직한 최적화 기법은 다음과 같은 세가지 특징을 가져야 하는 것으로 생각할 수 있다. 첫째, 인체의 모델링이 생리적, 해부학적인 사실성을 반영하기 위해 복잡화되더라도, 간단한 알고리즘을 바탕으로 이를 해결할 수 있어야 한다. 둘째, Global Optimum을 보장하거나, 최소한 이에 근접해야 한다. 셋째는 해를 찾기 위해 소요되는 시간이 너무 길어서는 안된다는 것이다.

## 3. The Complex Method

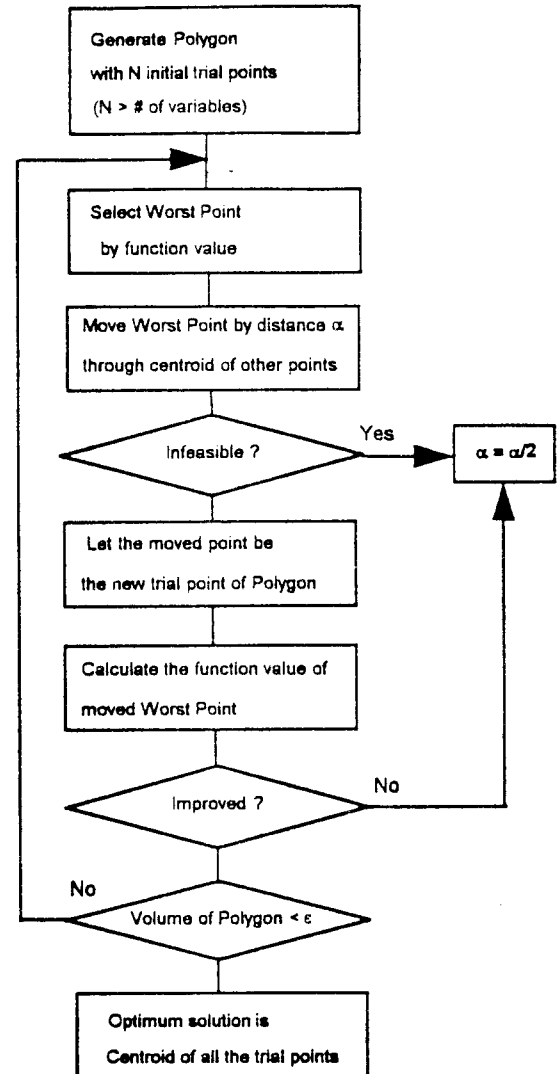
Complex Method는 비선형 최적화 문제의 해결기법으로서, 원리상 Direct Search Method에 해당한다. Direct Search Method의 특징은 Solution Space 상의 한 Initial Feasible Solution에서 시작하여, 매 Iteration마다, 목적함수를 증가 또는 감소시키는 방향을 찾아, 그 방향으로 진행된다는 것이다. 이때, 진행방향을 찾기 위해, 일반적으로 이용되는 방법이 목적함수의 Gradient를 계산하는 것인데, Generalized Reduced Gradient Method가 이에 해당한다. 그러나, Gradient-Based Approach는 목적함수의 미분이 불가능하거나, 수식이 복잡하여 미분이 어려운 경우 적용이 곤란하다는 문제점이 있다. 반면, Complex Method는 진행방향을 단지 목적함수의 함수값 계산만으로 결정할 수 있는, Function-value-based Approach이다 (Reklaitis et al., 1983).

Complex Method의 원리는 다음과 같다. 먼저 Solution Space 상에 여러 개의 Trial Point들로 이루어진 Polygon을 형성한다. 각각의 Trial Point들은 Initial Feasible Solution에 해당

하며, Solution Space 가 N 차원인 경우, 최소화 (N+1) 개의 Trial Point 가 필요하다. 최소화 문제를 푸는 경우, 진행 방향의 결정은 다음과 같다. 각각의 Trial Point 가 갖는 목적함수값을 계산해, 이들 중 함수값이 가장 큰 Worst Point 를 나머지 Trial Point 의 Centroid 를 통과하는 방향으로 적절한 거리만큼 이동시킨다. 이를 공식으로 나타내면 다음과 같다.

$$X_w = X_{cen} + \alpha(X_{cen} - X_w)$$

식에서  $X_w$  는 Worst Point 의 좌표를 나타내는 Vector 이며,  $X_{cen}$  은 나머지 Point 들의 Centroid 의 좌표이다.  $\alpha$  는 이동거리를 나타낸다. 새로운 Worst Point 에서의 목적함수값이 이전 것보다 작으면, 이것이 새로운 Trial Point 가 되고, 따라서 새로운 Polygon 이 형성된다. 만약, 새로운 Worst Point 가 Infeasible 하거나, 목적함수값이 이전 것보다 크다면, 작아질 때 까지, 이동거리  $\alpha$  를 줄여간다. 이러한 Polygon 의 형성을 반복하면, 결국 Polygon 의 이동방향은 목적함수를 최소화하는 방향이 된다. 최적해 근처에 도달하면, Polygon 의 크기가 작아져, 수렴하게 된다. Complex Method 의 알고리즘을 정리하면 [그림 1]과 같다.



[그림 1] The Complex Method

#### 4. Global Optimization Strategy

Complex Method 의 장점은 자세예측 및 동작 시뮬레이션 문제가 복잡하게 모델링되더라도, 이를 해결하기 위해 필요한 알고리즘 및 계산이 매우 간단하다는 것이다. 그러나, Incrementation Method 를 제외한 다른 모든 최적화 기법과 마찬가지로, Global Optimum 을 보장하지 못한다. 인간의 자세 및 동작이 Minimum Principle 에 의해 내부의 목적함수를 최적화하는 방향으로 일어난다고 할 때, 이는

Global Optimization 을 의미하는 것으로 이해되어야 하며, 따라서 Global Optimization 을 위한 방법론이 마련되어야 한다. Global Optimization 을 위한 일반적인 알고리즘은 아직까지 존재하지 않으며, 유일한 실용적인 방법은 Random Sampling 에 의한 Multi-start Strategy 이다 (Reklaitis et al., 1983). 즉, Initial Feasible Solution 을 Random 하게 여러 번 발생시켜, 각

각에 대해 Local Optimization 을 수행한 후, 얻어진 여러 개의 Local Optimum 중, 가장 우수한 Solution 을 Global Optimum 으로 간주하는 것이다. 따라서, Random Sampling 의 횟수를 증가시킬수록, Global Optimum 을 찾을 확률은 높아지게 된다. 그러나, 횟수가 늘어날수록 시간이 오래걸리므로, 계산속도가 중요한 문제에는 실제로 적용하기 힘든 알고리즘이 될 수 있다.

### 5. Complex Method 의 적용 및 평가

Complex Method 의 실제 구현을 위하여, Lifting Task 의 2 차원 정적 자세예측을 선정하였다. Global Optimization 을 위해, Multi-start Strategy 를 사용하였으며, Random Sampling 의 횟수는 25 번으로 하였다. 자세 예측결과가 Global Optimum 에 근접하는지를 평가하기 위해, Incrementation Method 에 의한 예측결과와 비교하였다.

#### 5.1. Whole Body Model

인체를 Lower Leg, Upper Leg, Trunk, Upper Arm, Lower Arm 의 5 개 Link 로 구성된 Open Kinematic Chain 으로 모델링하였다. Ankle, Knee, Hip, Shoulder, 및 Elbow Joint 는 모두 Revolute Joint 로 가정하였다. Link 간의 기구학적 관계는 D-H(Denavit-Hartenberg) Notation 을 사용하여 정의하였으며, 그 Parameter 들은 [표 1]에 나타내었다. [그림 2]는 인체의 2 차원 모델을 나타낸 것이다. 자세예측시 필요한 입력 자료는 Ankle Joint 에 대한 Hand 의 상대적 위치와 들고 있는 Load 의 무게이다.

[표 1] Link Parameters

Link	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	0	$l_1$	0	$\theta_2$
3	0	$l_2$	0	$\theta_3$
4	0	$l_3$	0	$\theta_4$
5	0	$l_4$	0	$\theta_5$
6	0	$l_5$	0	0

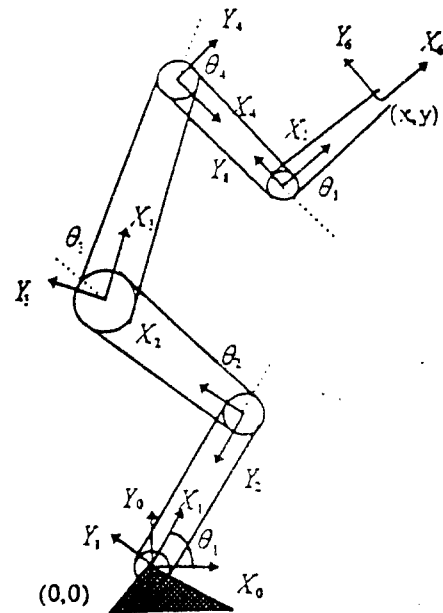
I1: Lower leg length

I2: Upper leg length

I3: Trunk length

I4: Upper arm length

I5: Lower arm length



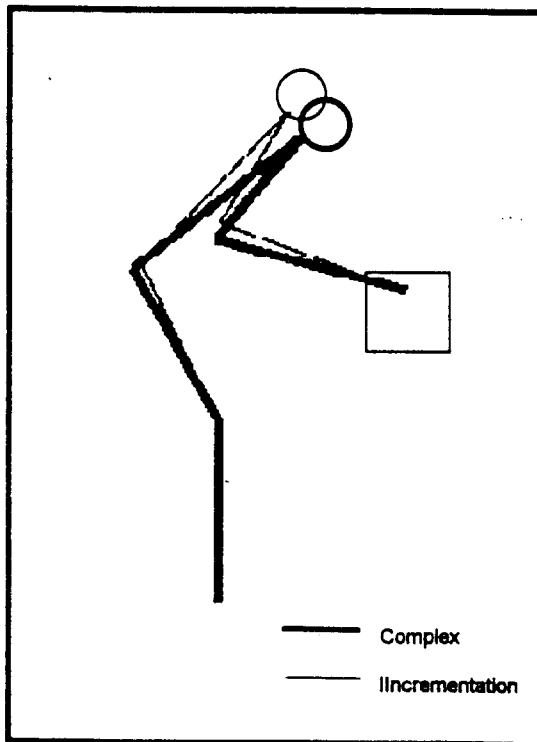
[그림 2] 인체의 2 차원 모델

## 5.2. 최적화 모델

최적화모델의 목적함수로는 Lee (1988)가 제시한 관절 모멘트와 관절이 낼 수 있는 최대 모멘트의 비의 제곱을 사용하였다. 또한, 제약 조건으로는 Ankle Joint 에 대한 Hand 의 상대적 위치, 각 관절의 Joint Range of Motion, 관절이 낼 수 있는 모멘트의 한계, 인체의 안정성을 고려하였다.

## 5.3. 결과

아래의 [그림 3]은 5.2의 최적화 모델에 Complex Method 와 Incrementation Method 를 각각 적용하여, IBM PC 상에서 자세예측을 수행한 결과이다. 굵은 선은 Complex Method 에 의한 예측 결과를 나타내며, 가는 선은 Incrementation Method 에 의한 결과를 나타낸다.



[그림 3] 자세예측 결과 및 비교

Ankle Joint 에 대한 Hand 의 위치와 들고 있는 Load 의 무게를 각각 세가지 경우로 달리하여, 총 9 가지의 입력자료에 대한 자세예측을 Complex Method 와 Incrementation Method 를 적용하여 수행하였다. 각각의 Method 에 의해 예측된 Joint Angle 들에 대해 Pairwise t-test 를 수행하였으며, 결과는 아래의 [표 2]에 나타내었다.

[표 2] Joint angle 에 대한 Pairwise t-test

(Unit: degree)					
	N	Mean Diff.	Std.	T	P_Value
Angle	45	0.39	9.16	0.28	0.39

Pairwise t-test 결과, Complex Method 와 Incrementation Method 는 관절각에 대해 통계적인 차이가 없는 예측치를 주는 것으로 나타났다 ( $\alpha=0.05$ ).

## 6. 논의

Incrementation Method 와의 비교평가 결과, Random Sampling 의 횟수를 25 회로 한 경우, 두 방법 간의 관절각 예측결과가 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 따라서, 본 연구에서 다른 최적화 모델의 경우, Complex Method 가 Global Optimum 에 가까운 예측 결과를 주는 것으로 생각할 수 있다. 그러나, 적절한 Random Sampling 의 횟수는 목적함수에 따라 달라질 수 있으므로, 이를 일반화하기는 어렵다.

IBM PC 상에서 Complex Method 에 의한 자세예측을 구현한 결과, Local Optimum 결정을 위해 걸리는 시간은 실시간에 가까운 것으로 나타났다. 따라서, Global Optimum 에 근접한 Solution 을 찾기 위해, Random Sampling 의 횟수가 늘어나는 것을 감안하더라도, 자세예측을 위

한 실용적인 최적화 기법의 것으로 판단된다.

Complex Method는 진행방향을 결정하기 위해, 목적함수의 함수값 계산만을 필요로 하므로, 최적화 모델의 복잡성에 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 따라서, 근육의 Length-Tension Relationship이나 Velocity-Tension Relationship 처럼, 수학적으로 복잡하게 표현되는 원리들을 최적화 모델에 포함시키고자 하는 경우에도, 간단한 알고리즘으로 최적해를 구하는 것이 가능하다. 이러한 Complex Method의 유연성으로 인해, 향후 인간공학 분야의 자세예측 및 동작 시뮬레이션 모델 개발시, 유용한 최적화기법으로 이용될 것이 기대된다.

## 7. 결론

본 연구에서는 자세예측 및 동작 시뮬레이션을 위한 최적화기법으로서, Function-value-based Approach인 Complex Method를 도입하였다. 기존의 자세예측 문제에 적용한 결과, Global Optimum에 근접한 Solution을 찾아내는 것으로 나타났다. 또한 Complex Method는 수리모델의 복잡성에 영향을 받지 않으므로, 향후 인체의 생리적, 해부학적 특성을 반영하는 사실적인 모델의 개발에 기여할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- Byun, S.N. and Herrin, G.D. (1994). A simulation study for posture prediction: a multivariate biomechanical model development for manual materials handling tasks. *Proceedings of The 3rd Pan-Pacific Conference on Occupational Ergonomics*, 341-345.
- Choe, J. (1995). A reach posture prediction model based on psychophysical discomfort. unpublished Ph.D. thesis, POSTECH.
- Hsiang, S.M. and Ayoub, M.M. (1994). Development of methodology in biomechanical simulation of manual lifting. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 13, 271-288.
- Hsiang, M.S. (1992). Simulation of manual materials handling, unpublished Ph.D. thesis, Texas Tech University.
- Kee, D.H. (1993). Development of an expert system for ergonomic workplace design and evaluation, unpublished Ph.D. thesis, POSTECH.
- Lee, Y.H.T. (1988). Optimization approach to determine manual lifting motion, unpublished Ph.D. thesis, Texas Tech University.
- Nubar, Y. and Contini, R. (1961). A minimal principle in biomechanics, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 23, 377-391
- Reklatis, G.V., Ravindran, A. and Ragsdell, K.M. (1983). *Engineering Optimization*, New York: John Wiley & Sons, Inc.