

평면 링크기구 자동 설계를 위한 스프링 연결 사이즈 가변 블록 모델

김범석* · 유흥희†

Spring Connected Size-Variable Rigid Block Model for Automatic Synthesis of a Planar Linkage Mechanism

Bum Suk Kim and Hong Hee yoo

Key Words : Spring block model(스프링 블록 모델), Planar linkage mechanism(평면 링크기구),
Mechanism design(기구 설계), Optimization method(최적화 방법)

Abstract

A linkage mechanism is a device to convert an input motion into a desired output motion. Traditional linkage mechanism designs are based on trial and error approaches so that size or shape changes of an original mechanism often result in improper results. In order to resolve these problems, an improved automatic mechanism synthesis method that determines the linkage type and dimensions by using an optimization method during the synthesis process has been proposed. For the synthesis, a planar linkage is modeled as a set of rigid blocks connected by zero-length translational springs with variable stiffness. In this study, the sizes of rigid blocks were also treated as design variables for more general linkage synthesis. The values of spring stiffness and the size of rigid block yielding a desired output motion at the end-effector are found by using an optimization method.

1. 서 론

평면 링크기구는 공급된 동력을 특정한 형태의 운동으로 바꾸어주기 위해 고안된 기계장치이다. 원하는 특정 작업에 맞게 기계장치를 설계하는 과정을 기구합성(mechanism synthesis)이라고 한다. 이는 기구의 각 요소 치수가 주어졌을 때 변위, 속도, 가속도 등을 구하는 기구학적 해석과는 반대 과정으로서, 기계에 대한 지식과 경험, 그리고 어느 정도의 직관력이 필요한 작업이다. 하지만 기구의 효율적인 설계는 기술발전에 있어 가장 중요한 요소이지만 아직까지 기구설계는 설계자의 경험과 직관에만 의존하여 시간과 비용이 많이 소모

되고 있는 수준에 머물러 있다. 설계자가 특정한 링크의 초기 레이아웃을 설정한 후, 링크의 길이나 조인트의 위치 등을 변화시켜가는 시행착오를 거쳐서 원하는 링크 기구를 찾고 만약 원하는 메커니즘을 얻을 수 없다면 다른 초기 링크 레이아웃으로 바꾸어 같은 작업을 반복하는 수준⁽¹⁻³⁾이다.

링크기구의 설계에 관한 연구는 전통적으로 도식적인 방법과 해석적인 방법 등이 진행되어 왔으나 설계자의 직관에 의존하는 부분이 크다는 한계를 지닌다. 하지만 최근에 최적화 기법을 이용하여 초기 기구의 형태를 미리 결정하지 않은 상태에서 창의적이고 자동으로 링크기구를 설계하는 방법이 제안되었다. Kim⁽⁴⁻⁵⁾ 등은 새로운 개념의 강성 가변 스프링 연결 블록 모델을 이용한 링크기구 설계 방법을 고안하였다. 블록들을 기하학적으로 구속하는 것이 아니라 스프링을 이용하여 연결하고 이들의 강성을 최적화함으로써 회전 조인트로 구성된 다양한 기구의 표현이 가능하고 해석시에 운동의 잠김 현상이 발생하지 않는다는 장점

† 정회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : hhyoo@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0446 FAX : (02)2293-5070

* 한양대학교 대학원 기계공학과

을 가진다.

본 연구에서는 기존의 연구를 확장하여 블록의 크기도 설계변수로 하여 좀더 일반적인 기구합성법을 제안하였다. 이전 연구에서는 사용된 모든 블록들이 정사각형 모양으로 크기가 전부 일정하였다. 하지만 목표로 하는 출력운동을 갖는 기구를 최적화 결과로 얻은 후 다른 조인트의 위치가 맞지 않을 경우 다시 회전 조인트의 위치를 설계변수로 하여 형상 최적화를 해야만 하였다. 따라서 본 연구에서는 설계문제 초기부터 블록의 크기를 설계변수로 정의하였다. 전체 설계영역의 크기가 결정되어 있는 경우로 가정한 후 블록의 가로, 세로 크기가 설계변수로 추가된 최적화 문제를 풀어 원하는 링크기구를 찾는 방법을 고안하였다.

2. 평면링크 기구 설계

2.1 최적화 문제 정의

제안된 기구합성 방법은 초기 링크기구의 형상 없이 입력 운동에 대하여 출력단에서 원하는 운동이 가능한 기구를 찾는 것이다. Fig. 1은 본 연구에서 수행하고자 하는 링크 기구 자동설계 문제의 정의를 나타낸다. 설계의 목적은 주어진 입력의 운동을 원하는 출력의 운동으로 변환하는 링크 기구를 찾는 것이다. 기구의 설계 영역은 Fig. 2와 같이 다수의 직사각형 형태의 블록들로 이산화 한 후 이 블록들의 교차점들에는 연결자인 중간노드를 위치시켰다. 각 블록과 중간노드, 중간노드와 그라운드를 연결하는 스프링의 강성값을 설계변수로 삼고 최적화 결과물의 출력단에서 운동경로와 실제 결과물이 보이는 운동경로의 거리 차이를 목적함수로 하여 이 거리의 차이가 최소가 되도록 최적화를 수행하였다. 따라서 기구 설계 문제를 다음과 같은 최적설계 문제로 공식화 하였다.

$$\text{Minimize } f = \max_{t_0 \leq t \leq t_f} [\mathbf{r}_Q(t) - \hat{\mathbf{r}}_Q(t)]^2 \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{r}_Q(t)$ 는 각 시간 단계에서 출력단 Q 점의 위치 벡터이고, $\hat{\mathbf{r}}_Q(t)$ 는 Q가 목표로 하는 출력단 운동을 나타내는 위치 벡터이다. 식 (1)에서 기구는 주어진 시간 $t_0 \leq t \leq t_f$ 동안 구동된다.

스프링 연결 블록 모델에서는 두 점 사이의 위치가 구속될 경우에는 스프링 값이 최대가 되고, 구속없이 자유롭게 움직일 경우 최소값을 갖도록

최적설계를 수행한다. 그러나 스프링 값이 최대 최소가 아닌 중간값을 갖게 될 경우에는 스프링의 역할을 정확히 구분할 수 없으므로 보간법을 사용하게 된다. 본 연구에서는 설계변수에 사용된 스프링 강성값을 최소 및 최대 상태로 수렴시키기 위해 S-형상 벌칙함수를 이용한 비선형 매핑법⁽⁶⁾을 사용하였다.

스프링 강성은 다음과 같이 ξ 의 함수로 표현된다.

$$k = f(\xi) \quad (2)$$

또한 S-형상 벌칙함수는 다음과 같이 표현된다.

$$f(\xi) = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{1 + e^{-t\xi}} + k_{\min} \quad (3)$$

여기서 ξ 는 $-100 = \xi_{\min} \leq \xi \leq \xi_{\max} = 100$ 의 범위를 갖는다. 또한 본 연구에서는 $t = 0.1$ 을 사용하였다.

2.2 스프링 연결 블록 모델

기구의 설계 영역은 Fig. 2와 같이 많은 수의 사각형 블록들과 이산화되고 블록의 교차점에는 체적이 없는 중간노드를 위치시켜 블록 링크들과 그라운드를 초기 길이가 없는 강성 가변 스프링으로 연결하여 모델링⁽⁴⁻⁵⁾하였다. 중간노드는 슬라이딩 힌지 또는 조인트를 표현할 수 있게 한다. 블록에 연결되는 스프링은 각 x, y 방향에 따라 다른 강성을 갖는 스프링으로 모델링 되었다. 각 방향의 스프링 강성 값들에 따라 회전조인트, 병진 조인트 등의 다양한 기구학적 메커니즘 구현이 가능하다.

스프링 연결 블록 모델은 준정적 평형해석을 통해 운동이 표현된다. 입력단에서 주어지는 운동에 의해 스프링의 변형이 일어나고 각 시간 단계마다 전체 시스템이 정적 평형을 이룬다고 가정하였다. 평형상태에서 시스템에 저장되는 총 포텐셜 에너지가 최소화 되고 이것이 각 시간 단계에서 시스템의 기구학적 운동상태를 표현해 준다. 준정적 평형 해석을 하면 블록들이 연결되는 스프링 강성값의 변화에 따라 출력단에서의 운동이 다양하게 표현된다.

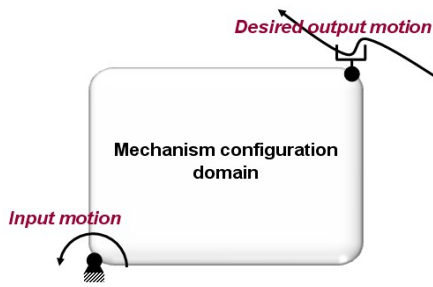


Fig. 1 Mechanism synthesis

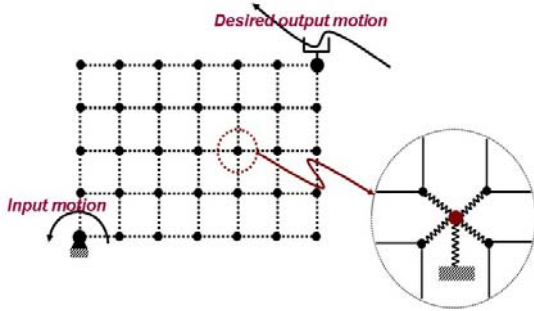


Fig. 2 Generalized spring-connected spring block model

3. 수치예제

본 연구에서는 Fig. 3 과 같은 4 절 링크기구에 평면 링크기구 자동설계 기법을 적용하였다. 설계 영역의 전체 크기는 그림과 같이 가로 2, 세로 2 이고 입력 운동은 1 초까지 점(0.0, 0.0)에서 $\phi(t) = \pi / 6$ 으로 주어진다. 출력단 점(1.0, 2.0)의 운동을 따라가는 스프링 연결 블록모델을 설계하는 것을 목적으로 한다.

Fig. 4 는 4 개의 블록들과 12 개의 블록과 연결된 스프링 그리고 5 개의 그라운드와 연결된 스프링으로 구성된 기구설계 영역을 나타낸다. 페루프 기구를 표현하기 위하여 기구설계 영역은 이미 두 개의 회전조인트가 주어져 있다. Fig. 5(a) 와 (b)는 본 연구에서 다루고자 하는 각각의 최적설계 문제를 나타내는 것으로써 (a)의 경우에는 입력단 블록의 높이를 설계변수에 추가하여 설계 문제를 풀었다. (b)의 경우는 입력단 블록의 높이와 너비를 모두 설계변수에 추가하였다.

또한, 연결 스프링의 x, y 방향 강성 값은 병진 조인트를 표현하기 위해 필요하므로 본 예제와 같이 회전조인트만 갖는 평면링크 기구의 설계 문제에서는 설계변수를 줄이기 위해 스프링 강성의 방

향성성을 부여하지 않았다.

첫번째 최적화 문제의 결과는 Fig. 6 과 같다. 각 스프링의 초기값은 모두 동일하게 1 로 설정하였고, 1 번과 2 번 블록 높이의 초기값은 0.5 로 하였다. 최적화는 경사기반(Gradient-based method) 비제한조건 문제를 푸는 알고리즘 BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)를 사용하였다. 초기설계 결과는 목표 운동과 상당한 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 하지만 최적화 후 얻어진 결과는 실제 목표 경로와 거의 유사한 운동을 보이고 있다. 실제 입력 링크의 길이는 1 이지만 최적화 결과 얻은 1 번 블록의 높이는 1.08 이었다.

Fig. 7 은 t_f 에서의 초기설계 기구형상과 최적화 후 얻어진 기구형상을 나타낸다. 그림에서는 중간 노드의 궤적을 포함하였다. 중간노드와 그라운드를 연결하는 5 개의 스프링 강성값은 모두 최소값 근처에서 수렴하였다. 이것은 그라운드와 고정된 회전조인트 없이 모두 링크들과 연결된 회전조인트만으로 구성된 평면기구를 나타내며 실제 4 절 링크기구와 일치하는 결과를 보이고 있다.

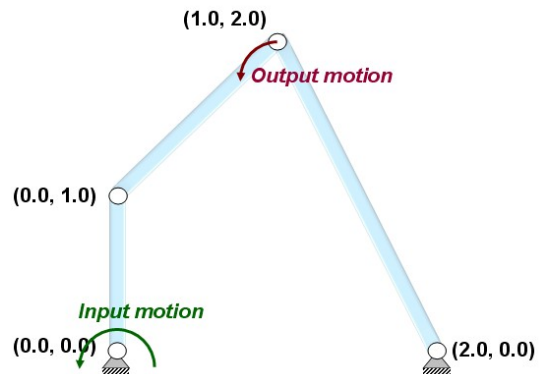


Fig. 3 Four-bar linkage mechanism

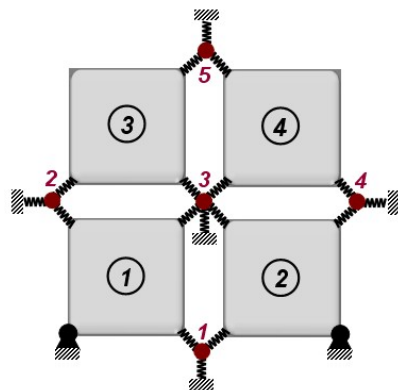
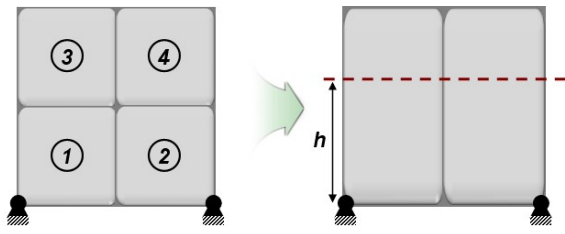
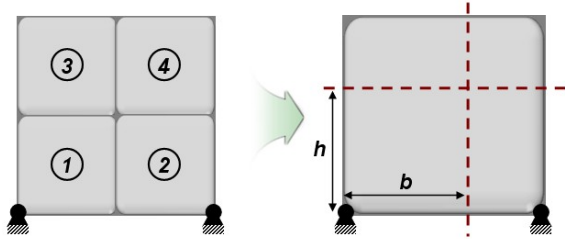


Fig. 4 The discretized mechanism configuration domain



(a) Optimization problem 1



(b) Optimization problem 2

Fig. 5 Optimization problem : discretized mechanism configuration domain

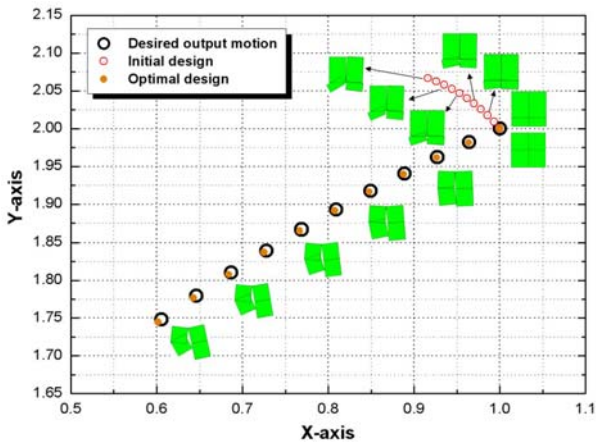


Fig. 6 Comparing of initial and optimal design results for optimization problem 1

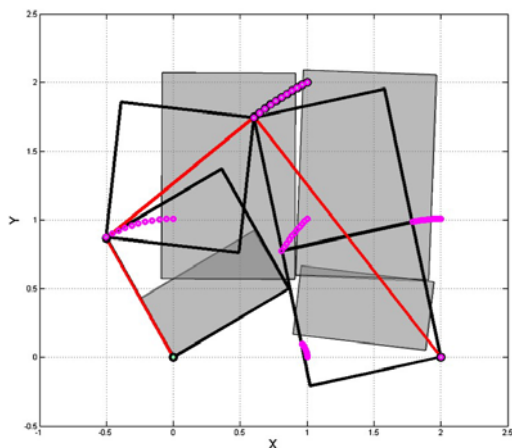


Fig. 7 The final results of first optimization problem

두번째 최적화 문제의 결과는 Fig. 8 과 같다. 각 스프링의 초기값은 첫번째 최적화 문제와 같이 모두 동일하게 1로 설정하였고, 1번 블록 높이와 너비의 초기값은 0.5로 하였다. 최적화는 BFGS 알고리즘을 사용하였다. 초기설계 결과 목표에 하는 출력단의 운동과 상당한 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 추후 다양한 형태의 기구설계 문제를 풀기 위한 사이즈 가변 블록 모델의 적합성을 알아보기 위해 초기값을 이미 알고 있는 최적해와 상당한 차이를 보이도록 하였다. 최적화 후 얻어진 결과는 실제 목표 경로와 거의 유사한 운동을 보이고 있지만 블록의 높이만을 설계변수에 추가한 결과보다는 실제 운동을 잘 따라가지는 못했다. 실제 입력 링크의 길이는 1이고 출력단의 x 좌표가 1이지만 최적화 결과 얻은 1번 블록의 높이는 1.015, 너비는 0.987이었다.

Fig. 9는 t_f 에서의 초기설계 기구형상과 최적화 후 얻어진 기구형상을 나타낸다. 중간노드와 그라운드를 연결하는 5개의 스프링 강성값은 첫번째 최적화 문제와 마찬가지로 모두 최소값 근처에서 수렴하였다. 하지만 4번 블록과 4번 노드를 연결하는 스프링 강성값이 최대값 근처로 수렴하지 못하였다.

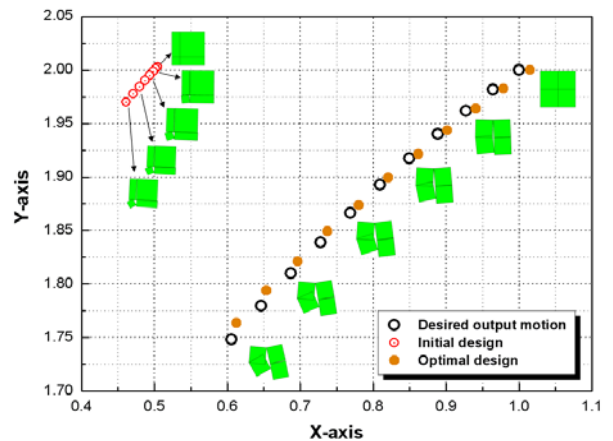


Fig. 8 Comparing of initial and optimal design results for optimization problem 2

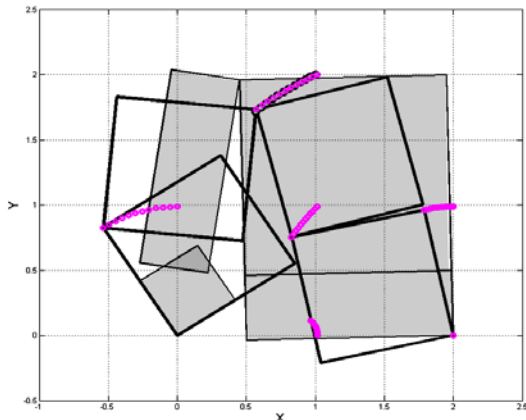


Fig. 9 The final results of second optimization problem

4. 결론

본 연구에서는 평면 링크기구의 자동합성을 위한 기존의 스프링 연결 블록 모델을 보완한 사이즈 가변 블록 모델을 제시하고 예제를 통해 설계 과정을 검증하였다. 여러 개의 블록들과 중간노드를 이용하여 설계 영역을 구성하고 블록과 중간노드 및 중간노드와 그라운드를 연결하는 스프링의 강성과 입력 링크에 해당하는 블록의 크기를 설계변수로 하는 설계문제를 최적화 방법을 이용하여 풀었다. 4절 링크 수치 예제를 통해 좀더 일반화된 설계방법을 검증하였다.

후 기

이 논문은 2008년도 2 단계 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Naik, D.P. and Amarnath, C., 1989, "Synthesis of Adjustable Planar 4-bar Mechanism," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 24, No. 6, pp.523~526.
- (2) Roots, R.R. and Ragesdell, K.M., 1976, "A survey of Optimization Methods Applied to the Design of Mechanisms," *Transactions of the ASME Series B, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 98, No. 3, pp.1036~1041.

- (3) Chang, C.F., 2001, "Synthesis of Adjustable Fourbar Mechanisms Generating Circular Arcs with Specified Tangential Velocities," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 36, No. 3, pp.387~395.
- (4) Kim, Y. Y., Jang, G. W., Park, J.H., Hyun, J. S. and Nam, S. J., 2007, "Automatic Synthesis of a Planar Linkage Mechanism by using Spring-connected Rigid Block Models," *ASME J. of Mechanical Design*, Vol. 129, pp. 930~940.
- (5) Yi, Y. S., 2007, "A Study on the Topology Optimization Method for Automated Planar Linkage Mechanism Synthesis," Ph.D. Thesis, Seoul National University.
- (6) Kim, Y. Y. and Yoon, G. H., 2000, "Multi-resolution Multi-scale Topology Optimization - A New Paradigm," *Int. J. of Solids and Structure*, Vol. 37, pp. 5529~5559.