

메커니즘 공간 배치의 정성적 표현과 부호 대수를 이용한 공간 거동 추론

한영현*, 이진우**

Qualitative Representation of Spatial Configuration of Mechanisms and Spatial Behavior Reasoning Using Sign Algebra

Han, Y. H.* and Lee, K. W.**

ABSTRACT

This paper proposes a qualitative reasoning approach for the spatial configuration of mechanisms that could be applied in the early phase of the conceptual design. The spatial configuration problem addressed in this paper involves the relative direction and position between the input and output motion, and the orientation of the constituent primitive mechanisms of a mechanism. The knowledge of spatial configuration of a primitive mechanism is represented in a matrix form called spatial configuration matrix. This matrix provides a compact and convenient representation scheme for the spatial knowledge, and facilitates the manipulation of the relevant spatial knowledge. Using this spatial knowledge of the constituent primitive mechanisms, the overall configuration of a mechanism is described and identified by a spatial configuration state matrix. This matrix is obtained by using a qualitative reasoning method based on sign algebra and is used to represent the qualitative behavior of the mechanism. The matrix-based representation scheme allows handling the involved spatial knowledge simultaneously and the proposed reasoning method enables the designer to predict the spatial behavior of a mechanism without knowing specific dimension of the components of the mechanism.

Key words : Spatial configuration, Qualitative spatial reasoning, Spatial configuration matrix, Spatial configuration state matrix, Conceptual design of mechanisms

1. 서 론

메커니즘의 개념 설계 단계에서는 먼저 입력과 출력의 운동 타입을 정한 다음, 그 운동 조건을 만족하는 캠-요동절, 슬라이더 크랭크 등의 빌딩 블록(building block)이나 그것들의 조합을 합성(type synthesis)하여 개념적 설계 대안들을 얻는다^[1-4]. 그 다음 이러한 합성 과정을 통하여 생성된 설계 대안들을 평가하여 가장 구현 가능성이 있는 설계 대안을 찾아 추후 설계 과정을 계속 진행하게 된다^[5].

설계 대안들을 평가하는 여러 기준 중의 하나로서 합성된 메커니즘의 공간 배치를 고려할 수 있는데, 이 공간 배치는 합성된 메커니즘과 이를 구성하는 빌딩 블록들의 공간 상의 배치 방향, 입력과 출력의 방향 및 상대적 위치를 말한다^[6,7]. 이러한 공간 구속 조건이 설계 요건으로 주어졌을 때, 합성된 메커니즘이 주어진 구속 조건을 만족할 가능성이 있는지 판단하는 것이 필요하다. 또한, 어떤 메커니즘을 구성하는 기본 빌딩 블록들이 공간 상에서 어떻게 배치가 되면 주어진 구속 조건을 만족할 수 있는지를 알 수 있어야 한다.

한편, 개념 설계 단계에서는 보통 설계 요구 조건들이 정성적으로 기술되는 경우가 많기 때문에 공간 배치 문제를 다룰 수 있는 정량적인 정보가 구체적

*정회원, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

**중신회원, 서울대학교 기계항공공학부

- 논문투고일: 2000. 7. 24

- 심사완료일: 2000. 10. 11

으로 주어지지 않는다. 또한, 설계요건이 정량적으로 주어지더라도 이 단계에서는 설계에 관련된 여러 가지 요인들을 총체적으로 고려하기 위해 보통 정성적인 방식으로 설계 행위가 이루어진다. 따라서, 초기 설계 단계인 개념 설계에서 어떤 메커니즘의 공간 배치 문제를 다루기 위해서는 정성적인 정보를 이용하여 해당 메커니즘의 공간 거동을 정성적으로 추론할 수 있는 방법이 필요하다.

이런 필요성에 의해서 본 연구에서는 어떤 메커니즘을 구성하는 빌딩 블록들의 정성적인 배치 방향, 입력과 출력의 상대적 위치와 방향을 간결한 행렬의 형태로 표현하고 해당 빌딩 블록의 가능한 모든 공간 배치를 얻어내는 방법을 제안한다. 또한, 이들 빌딩 블록으로 구성되는 전체 메커니즘의 가능한 모든 공간 배치를 얻어내는 방법과 부호 대수를 이용하여 메커니즘의 전체 공간 거동을 정성적으로 기술하고 예측할 수 있는 추론 방법을 제시한다

2. 메커니즘의 공간 배치 문제

메커니즘은 그 용도 및 목적에 따라 보통 '경로 생성(path generation)', '기능 발생(function generation)', 및 운동 생성(motion generation) 등으로 구분할 수 있다¹¹. 이 연구에서는 기능 발생을 목적으로 하는 평면 메커니즘의 공간 배치를 다루는데, 힘이나 운동을 전달하는 메커니즘을 구성하는 빌딩 블록으로서 기본 메커니즘(primitive mechanism)을 정의하여 사용한다^{12,13}. 기령, 크랭크-로커나 캠-병진 피동절은 회전 운동을 각각 요동 운동과 직선 운동으로 변환하는 기본 메커니즘들이다. 이들 기본 메커니즘은 평면 기구로서 평면 상에서 운동을 변환하는 기능을 가지고 있고, 기능 발생을 목적으로 하는 메커니즘의 경우에 이들 기본 메커니즘들의 조합에 의해 복잡한 메커니즘이 구성된다¹⁴. 따라서, 본 논문에서 다루는 공간 배치 문제는 평면 기구인 기본 메커니즘들의 2차원적 공간 배치에 의해 구성되는 최종적인 메커니즘의 3차원 공간 배치 문제이다.

메커니즘과 빌딩 블록들의 공간 배치 문제는 다음과 같이 세 가지로 정리될 수 있다. 첫 번째로, '방향 배치(direction configuration)'는 입력과 출력 운동의 상대적인 방향을 말한다. 두 번째로, '위치 배

치(position configuration)'는 입력과 출력 사이의 상대적 위치 변화를 나타낸다. 마지막으로, '방위 배치(orientation configuration)'는 해당 메커니즘이 3차원 공간 상에서 어떤 방향으로 배치되는지를 표현한다. 일반적으로 어떤 메커니즘의 공간 상의 방위가 변함에 따라 입력과 출력의 방향 및 상대적 위치도 그에 따라 바뀌게 된다. 이와 같이 위에서 언급한 공간 배치의 세 가지 문제는 서로 밀접히 연관되어 있기 때문에 이것들은 항상 동시에 고려되어야 한다.

한편, 어떤 메커니즘을 구성하는 빌딩 블록의 공간 상의 배치를 나타내기 위해 3차원 공간을 각각의 정성적 특성에 따라 27개의 영역으로 분류한다. 먼저, x - y , y - z , z - x 평면에 의해 8개의 팔분 공간으로 나누어진다. 또한, 이들 공간 사이의 12개의 경계 평면, 6개의 좌표축과 원점도 각각 서로 다른 정성적 특성을 갖기 때문에 별개의 정성적 영역으로 분류한다. 또한, 이들 정성적 영역에서 위치나 방향을 나타내기 위해 '정성 벡터(qualitative vector)'¹⁵를 사용하는데, 그 성분은 x , y , z 성분의 부호를 취하여 $\{+, 0, -\}$ 중의 하나로 기술된다. Fig. 1은 3차원 공간의 정성적 분류와 그에 따른 정성 벡터의 일부를 보여 주는데, 같은 영역에 속한 위치나 방향은 모두 하나의 정성 벡터로 표현됨을 알 수 있다.

3. 기본 메커니즘의 공간 배치

3.1 공간 배치의 표현

기본 메커니즘으로 구성된 어떤 메커니즘의 전체 공간 배치는 각각의 기본 메커니즘의 공간 배치에 의해 결정되므로 먼저 기본 메커니즘의 공간 배치를 표현할 수 있는 방법이 필요하다.

개념 설계 단계에서 설계 대안 합성 과정을 통해 생성된 메커니즘의 경우 비록 각 구성 부품의 치수나 형태가 구체적으로 결정되지 않은 상태이지만, 그

Qualitative classification of 3-D space	Qualitative vectors
$(+x +y +z)$ octant	$(+++)$
$(-x +y +z)$ octant	$(-++)$
...	...
$(+x +y)$ plane	$(++0)$
$(-x +y)$ plane	$(-+0)$
...	...
$+x$ axis	$(+00)$
$-x$ axis	(-00)
...	...
Origin	(000)

Fig. 1. Qualitative vectors according to the individual qualitative regions of 3-D space.

¹¹상세 설계에서는 구동절과 피동절 사이의 운동 간에 함수 관계가 중요한 의미를 갖기 때문에 함수 발생이라고 보통 번역되지만, 본 연구에서 다루는 개념 설계에서는 운동을 발생, 변환하는 기능적 의미가 더 중요하므로 기능 발생이란 용어를 사용한다.

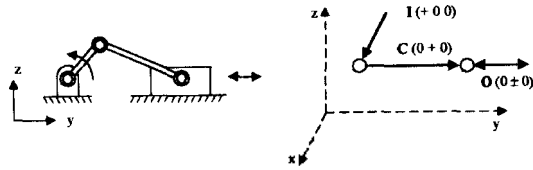


Fig. 2. Spatial configuration of a slider-crank.

메커니즘을 구성하는 기본 메커니즘의 타입과 운동 변환, 그리고 구성 기본 메커니즘이 3차원 공간 상에서 어떤 물리적인 영역을 차지한다는 본질적인 성질을 이용하여 해당 메커니즘의 공간 배치를 정성적으로 표현할 수 있다.

앞 절에서 설명한 3가지 공간 배치 문제를 표현하기 위해 본 연구에서는 3개의 정성 벡터를 도입한다. Fig. 2에 나타난 슬라이더-크랭크의 예를 보면서 도입된 각 정성 벡터의 의미를 살펴 보자. 먼저, 그림에서 슬라이더 크랭크는 공간 상에서 y축을 따라 배치되어 있고, 입력으로 축 회전 운동을 받아들여 직선 왕복 운동으로 변환하여 출력으로 전달한다. 오른쪽 그림에서 두 개의 원은 각각 기본 메커니즘의 입력과 출력 점을 나타내고, 이 두 점을 연결하는 기본 메커니즘의 물리적 구조물이 정성 벡터 C로 나타나 있다. 이 벡터 C를 '배치 벡터(configuration vector)'라고 부른다. 이 배치 벡터는 공간 상에서 기본 메커니즘이 배치된 방향을 나타낸다. 그림에서는 메커니즘이 양의 y축을 따라 배치되어 있으므로 (0+0)으로 표시된다. 또한, 기본 메커니즘의 구체적인 크기나 치수가 정해지지 않았더라도 하더라도 입력에서 출력으로의 변환은 어떤 물리적인 구조물에 의해 얻어지므로, 입력점과 출력점 사이에는 어떤 공간적인 간격이 존재해야 한다는 특성이 있다. 이와 같이 공간 상에서 기본 메커니즘의 물리적 구조물에 의해 생기는 입력과 출력 점 사이의 위치 변화도 역시 배치 벡터에 의해 표현된다. 그림에서 출력 점은 입력 점에 대해 양의 y 축 방향으로 상대적 위치 이동이 있으므로 앞에서와 같이 (0+0)으로 표현될 수 있다. 이와 같이 배치 벡터는 앞 절에서 설명한 '방위 배치'와 '위치 배치'를 동시에 나타낸다.

한편, 입력과 출력 운동은 방향만을 정성적으로 고려하여 각각 '입력 벡터(input vector)' I와 '출력 벡터(output vector)' O로 표현된다(개념 설계 단계에서 크기는 아직 정해지지 않거나 정해졌다 하더라도

²실제로는 구동점의 초기 조건에 따라 부호는 바뀔 수 있고, 개념 설계에서는 이러한 차이가 별 의미가 없기 때문에 본 연구에서는 두 가지를 동일하게 취급한다.



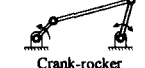
별 의미가 없다). 이때, 입력과 출력 벡터의 성분은 관련된 운동이 한쪽 방향이면 +나 - 중에 하나를 취하고 왕복 운동이나 요동 운동인 경우에는 ± 또는 r^회 된다. 그림에서 입력은 양의 x 축을 향하는 축 회전 운동이므로 (+0±0)으로 표현되고, 출력은 y 축을 따라 양과 음으로 방향이 바뀌는 왕복 직선 운동이므로 (00)으로 표현된다. 이들 입력 벡터와 출력 벡터는 앞 절에서 설명한 '방향 배치'를 나타낸다.

3.2 공간 배치 행렬

위에서 설명한 것과 같이 어떤 기본 메커니즘의 공간 배치는 입력 벡터와 출력 벡터 및 배치 벡터라는 3개의 정성 벡터에 의해 표현된다. 이것들을 간결하고 편리하게 나타내기 위해서 이들 3개의 벡터를 함께 모아 식 (1)과 같이 3×3 행렬로 나타내며 이를 '공간 배치 행렬(SCM: spatial configuration matrix)'이라고 부른다.

$$[I \ C \ O] \tag{1}$$

Fig. 3은 몇몇 기본 메커니즘의 공간 배치를 SCM으로 표현한 예를 보여 준다. 그림에서 R, R₀와 T는 각각 회전 운동, 축회전 운동과 직선 운동을 나타내고, r과 o는 해당 운동의 특성으로서 각각 왕복 및 요동 특성을 나타낸다. Fig. 3의 슬라이더-크랭크의 예와 같이 동일한 메커니즘이더라도 그 메커니즘이 수행하는 기능에 따라 여러 가지 공간 배치를 가질 수 있음에 주목하기 바란다. 또한, 레버의 경우에 출력점인 레버의 끝은 360도 회전하기 때문에 최종적

Primitive mechanism	Functions	SCM
	R ₀ → rT ...	$\begin{bmatrix} + & 0 & 0 \\ 0 & + & \pm \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$...
Slider-crank	rT→ R ₀ ...	$\begin{bmatrix} \pm & + & 0 \\ 0 & 0 & \pm \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$...
	R ₀ → oR ₀ ...	$\begin{bmatrix} + & 0 & \pm \\ 0 & + & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$...
Cam-oscillating follower	R ₀ → oR ₀ ...	$\begin{bmatrix} + & 0 & \pm \\ 0 & + & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$...
	R ₀ → oR ₀ ...	$\begin{bmatrix} + & 0 & \pm \\ 0 & + & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$...
Crank-rocker	R ₀ → R ...	$\begin{bmatrix} + & 0 & + \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$...
Lever or crank		

† 입력이 -x 축에서 원점을 향하도록 배치된 경우를 기준으로 함

Fig. 3. Primitive mechanisms and their SCMs.

으로 방위 배치 및 위치 배치에 있어서 기여하는 양은 서로 상쇄된다. 따라서 이런 경우에는 배치 벡터 C 가 영 벡터가 됨을 알 수 있다.

3.3 기본 및 유도 공간 배치 행렬

일반적으로 어떤 기본 메커니즘이 공간 상에 배치될 때에는 여러 가지 배치가 가능하다. 앞에서 Fig. 2와 Fig. 3에 보여진 예들은 실제로 가능한 여러 가지 공간 배치 중에서 한가지만을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 다음 두 가지 절차에 의해 기본 메커니즘의 모든 공간 배치를 구한다.

첫째로, 임의의 방향으로 고정된 입력 벡터에 대해서 가능한 모든 배치를 나열한다. Fig. 4는 슬라이더-크랭크의 경우에 있어서 하나의 고정된 입력 방향에 대하여 가능한 모든 공간 배치와 공간 배치 행렬을 보여준다. 주어진 입력 벡터 $I (+00)$ 에 대해서, $y-z$ 평면 상에서 모두 8개의 정성적 방향(영역)으로 배치가 가능하고 각각의 배치는 배치 벡터 C 에 의해 표현된다. 그리고 배치 벡터 C 가 바뀔 때 따라 출력 벡터 O 도 변함을 알 수 있다. 이와 같이 임의의 고정된 입력 방향에 대해 모든 가능한 공간 배치를 나

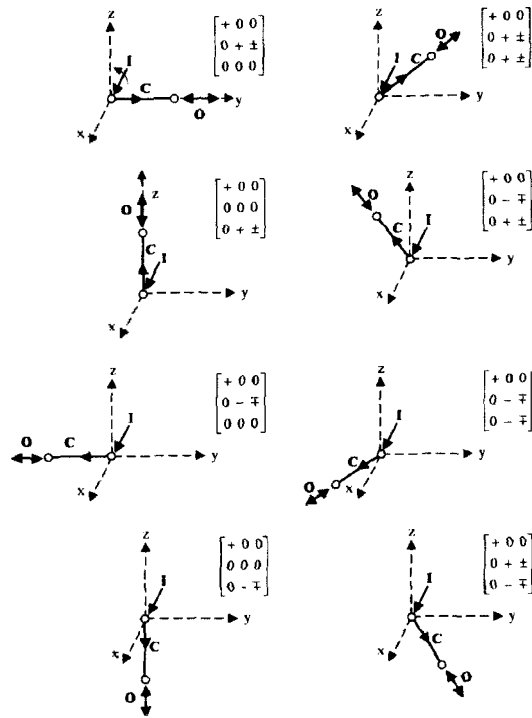


Fig. 4. Possible spatial configurations of the slider-crank mechanism for a fixed input direction.

타내는 공간 배치 행렬을 ‘기본 공간 배치 행렬 (basic SCM)’이라고 부른다. 본 연구에서는 고정된 입력 벡터로서 양의 x 축 방향인 $(+00)$ 을 사용하여 각 기본 메커니즘에 대해 기본 공간 배치 행렬을 미리 구하여 저장해 둔다.

둘째로, 기본 공간 배치 행렬의 입력 벡터 방향과 다른 방향으로 배치되는 공간 배치는 기본 공간 배치 행렬로부터 유도하여 구한다. 일반적으로 입력 벡터 I 의 방향이 변하면 그에 따라 배치 벡터 C 나 출력 벡터 O 도 함께 변하게 되는데, 이 상황은 Fig. 5에 나타난 것과 같이 일종의 강체 회전이라고 생각할 수 있다. 따라서, 임의의 방향으로 배치된 공간 배치 행렬을 구하고 싶을 때는, 원하는 방향의 입력 벡터를 앞에서 설명한 기본 공간 배치 행렬의 입력 벡터와 비교하여 원하는 방향의 입력 벡터가 회전한 만큼 다른 벡터들도 함께 회전시키면 그 방향에 대한 공간 배치 행렬들을 얻을 수 있다. 이와 같이 기본 공간 배치 행렬로부터 회전시켜서 얻은 배치 행렬을 ‘유도 공간 배치 행렬(derived SCM)’이라고 부른다.

다시 정리하면, 어떤 기본 메커니즘의 가능한 모든 공간 배치는 일단 하나의 고정된 입력 방향에 대해 모든 가능한 공간 배치를 구한 다음에, 이들 전체를 나머지 가능한 입력 방향으로 회전함으로써 구할 수 있다.

본 연구에서는 정성 벡터에 회전 행렬을 적용하기 위하여 다음 장에서 설명되는 정성적 부호 대수를 이용하는데, 자세한 적용 방법과 제한점은 부록에 자세히 설명되어 있으므로 참고하기 바란다.

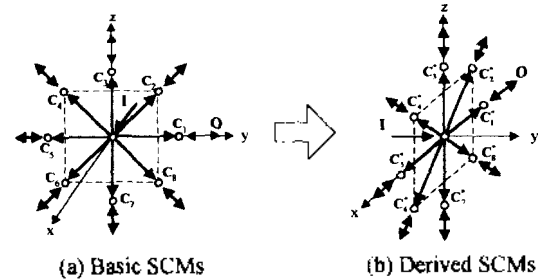


Fig. 5. Obtaining desired SCMs from basic SCMs.

	+	0	-		+	0	-
+	+	+	*	+	+	0	-
0	+	0	-	0	0	0	0
-	*	-	-	-	-	0	+

Fig. 6. Qualitative sign algebra.

4. 정성적 부호 대수와 벡터 대수

개념 설계 단계에서 구체적 크기가 정해지지 않은 메커니즘의 공간 거동을 추론하기 위해 Fig. 6에 정의된 '정성적 부호 대수(qualitative sign algebra)^{7,10,11}를 이용한다. Fig. 6에서 각 표의 좌측 상단에 있는 +와 ×는 각각 덧셈과 곱셈 연산자이고, 나머지 +, 0와 -는 피연산자 및 연산 결과로서 정성적인 부호를 나타낸다. 특히, 표에서 연산 결과 *는 {+, 0, -}의 세 부호 중에서 임의의 하나를 나타낸다.

Fig. 6의 덧셈 연산 표에서 관련된 두 피연산자가 +, -인 경우가 본 연구의 응용에서 중요한 의미를 지닌다. 만약 플러스와 마이너스가 더해진다면 이들 정성적 값(부호)들은 현재로서는 크기를 가지고 있지 않지만, 이들이 나중에 실제로 값을 갖게 된다면 그것들의 상대적 크기에 따라 3가지 가능성이 생긴다. 즉, 플러스의 값이 더 큰 경우에는 +의 결과가 되고, 마이너스의 값이 더 큰 경우에는 -의 결과가 되며, 두 개의 크기가 같은 경우에는 0이 된다. 하지만, 현재의 정보로는 그것들의 상대적 크기를 알 수 없기 때문에 어느 하나를 명시적 결과로 표시하지 못하고 그 가능성을 나타내기 위해 *로 표시하게 된다.

이런 점은 개념 설계 단계에서 메커니즘의 크기가 구체적으로 정해지지 않고 추후 설계 과정에서 그 값이 정해지는 상황과 동일하다. 즉, 두 개의 메커니즘이 공간 상에 배치될 때 이들 간의 상대적 위치가 나중에 실제로 치수를 부여함에 따라 달라지므로, 정성적 부호 대수의 결과와 잘 부합됨을 알 수 있다.

앞에서 설명한 정성적 부호 대수를 확장하여 3절에서 설명한 정성 벡터에 그대로 적용할 수 있다. 예를 들어, Fig. 7(a)의 2-D 벡터의 경우를 살펴 보자. 주어진 3개의 벡터의 합은 각 성분에 대해 정성적 부호 대수를 적용하면 피연산자의 y 성분이 각각 플러스와 마이너스이기 때문에 합 벡터의 y 성분이 *

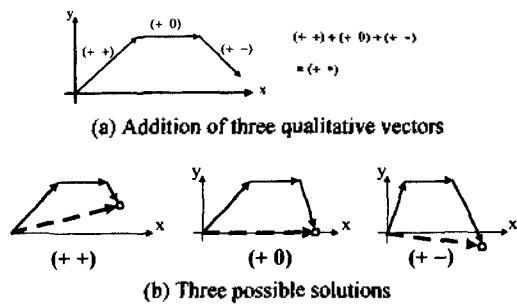


Fig. 7. Qualitative vector algebra in 2-D space.

되어 연산 결과는 (+ *)가 된다. 이 결과로부터 우리는 합 벡터가 각 성분들의 상대적인 실제 크기에 따라 Fig. 7(b)와 같이 (+ +), (+ 0) 및 (+ -) 중의 하나가 될 수 있음을 알 수 있다.

5. 메커니즘의 공간 배치 생성과 표현

5.1 공간 배치 생성

개념 설계 단계에서 어떤 메커니즘을 구성하는 기본 메커니즘들과 이들의 연결 관계(본 연구에서는 그 래프 구조로 표현됨)가 정해지면 그 메커니즘의 최종적인 공간 배치는 구성 기본 메커니즘들 각각의 배치에 의해 결정된다. 즉, 어떤 메커니즘을 구성하는 기본 메커니즘들은 3장에서 설명한 대로 공간 상에서 여러 영역으로 배치될 수 있고, 이에 따라 전체 메커니즘의 입력 및 출력의 상대적 위치와 방향 등 공간 배치 상태도 모두 달라진다.

합성된 메커니즘의 모든 가능한 전체 공간 배치는 해당 메커니즘을 구성하는 기본 메커니즘들을 정해진 순서대로 하나씩 붙여가며 그때마다 그 기본 메커니즘의 가능한 공간 배치를 모두 나열함으로써 얻어진다. 기본 메커니즘을 하나씩 붙여 나갈 때, 해당 기본 메커니즘에 대한 입력 방향은 바로 이전에 붙여진 기본 메커니즘의 출력 방향과 같다. 이때, 새로운 입력 방향에 대해 가능한 모든 배치는 3.3절에서 설명한 대로 기본 및 유도 공간 배치 행렬(SCM)을 통해 구할 수 있다. 따라서, 공간 배치를 형성하는 각 단계마다 해당 기본 메커니즘의 기본 공간 배치 행렬의 개수만큼 가능한 공간 배치의 개수가 증가하게 된다.

이러한 공간 배치 구성은 Fig. 8에 보여진 것과 같이 트리(tree)를 구성해 가는 것과 같은데, 이 트리를 '공간 배치 트리(spatial configuration tree)'라고 한다. Fig. 8에서 전체 메커니즘은 두 개의 기본 메커니즘으로 구성되어 있으며 각 기본 메커니즘은 각

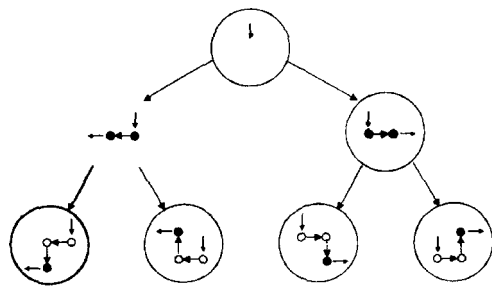


Fig. 8. Spatial configuration tree.

기 두 개의 공간 배치가 가능한 예이다. 처음에 입력 방향만 있는 루트 노드(root node)에서 첫번째 기본 메커니즘이 배치되면서 서로 다른 SCM에 의해 두 개의 차일드 노드(child node)가 생성되어 두 가지 중간 단계의 공간 배치가 가능하다. 두 번째 기본 메커니즘이 배치되면 각각의 노드에서 다시 두 개씩 차일드 노드가 생성되어 총 4개의 최종적인 공간 배치가 얻어진다.

공간 배치 트리에서 중간 노드들은 어떤 메커니즘의 공간 배치 생성 과정 중에 발생하는 고유한 중간 단계의 공간 배치 상태를 나타내며, 가장 마지막 단계의 노드들은 최종적으로 얻어지는 메커니즘의 공간 배치 상태를 보여준다. 따라서 공간 배치 트리에서 각 경로는 전체 메커니즘의 서로 다른 공간 배치 상태를 나타내며 이 경로를 구성하는 기본 메커니즘들의 SCM이 해당 공간 배치를 얻을 수 있는 기본 메커니즘의 개별 배치 상태를 나타낸다.

5.2 공간 배치 표현

어떤 메커니즘의 공간 배치 상태 중에서 그 메커니즘을 구성하는 기본 메커니즘들의 공간 배치는 각각의 SCM에 의해 표현된다. 한편, 이것들 외에 해당 메커니즘의 전체적인 공간 배치 상태도 표현해야 할 필요가 있다. 공간 배치를 구성할 때 중간 단계, 또는 최종적인 단계에서 생성되는 전체적인 공간 배치 상태는 '공간 배치 상태 행렬(SCSM: spatial configuration state matrix)'로 표현된다. 이것 역시 앞에서 설명한 식 (1)의 행렬 형태로 나타낸다. 벡터 I 와 O 는 중간 단계 혹은 전체 메커니즘의 입력 및 출력 벡터로서 '방향 배치'를 나타낸다. 그리고 벡터 C 는 '전체 배치 벡터(overall configuration vector)'로서 입력과 출력의 상대적 위치 변화인 '위치 배치'를 표현한다. '방위 배치'와 '위치 배치'를 동시에 나타내는 SCM의 배치 벡터 C 와는 달리, SCSM의 배치 벡터 C 는 '위치 배치'만을 나타낸다는 점에 유의하기 바란다.

따라서, 어떤 메커니즘의 공간 배치 상태는 그 메커니즘의 SCSM과 그 메커니즘을 구성하는 기본 메커니즘들의 SCM들로써 표현될 수 있다. 메커니즘의 공간 배치를 생성할 때, SCSM의 입력 벡터 I 는 해당 메커니즘을 구성하는 첫 번째 기본 메커니즘의 입력 벡터와 항상 동일하고, 출력 벡터 O 는 중간 단계 혹은 최종 단계에서 그 메커니즘을 구성하는 마지막 기본 메커니즘의 출력 벡터에 의해 결정된다. '전체 배치 벡터' C 는 각 구성 기본 메커니즘의 배치

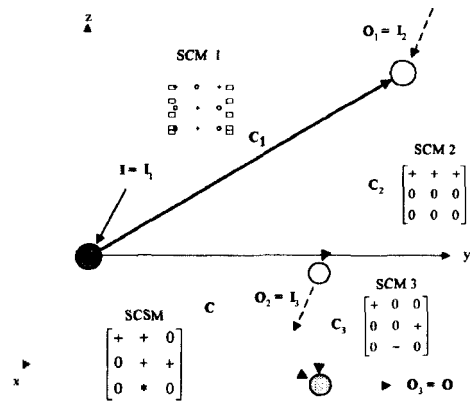
벡터들을 4장에서 설명한 정성적 벡터 대수에 의해 계산함으로써 얻을 수 있다. 이 계산 예는 다음 장에서 자세히 설명 한다.

6. 공간 거동 추론

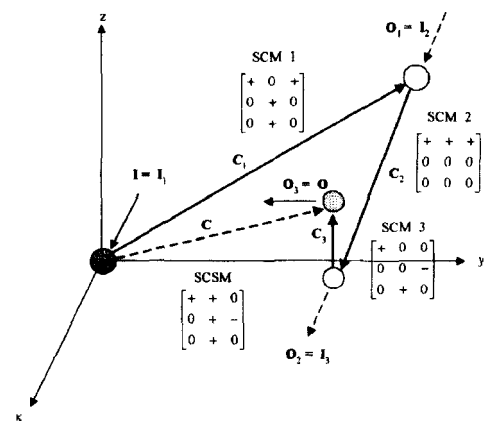
6.1 메커니즘의 공간 거동 추론

어떤 메커니즘의 전체 공간 배치가 앞에서 설명한 SCSM과 그 메커니즘을 구성하는 기본 메커니즘들의 SCM들로써 표현될 때, 이것들을 이용하여 메커니즘의 공간 거동을 추론하는 방법을 Fig. 9의 예와 함께 설명한다. 이 예의 메커니즘은 입력과 출력이 각각 하나인 메커니즘으로서 3개의 기본 메커니즘으로 구성되어 있으며 해당 SCSM과 구성 기본 메커니즘의 SCM들이 그림에 나타나 있다.

먼저 Fig. 9(a)의 예를 살펴 보자. 이 공간 배치에



(a) Configuration vector C_N : (0 0 -)



(b) Configuration vector C_I : (0 0 +)

Fig. 9. Spatial configurations of a mechanism.

서 SCSM의 입력 벡터는 첫 번째 기본 메커니즘의 입력 벡터로부터 얻어지고, 출력 벡터는 마지막 기본 메커니즘의 출력 벡터로부터 얻어진다. 전체 배치 벡터 C 는 각각의 구성 메커니즘들(SCMs)의 배치 벡터들로부터 정성적 벡터 대수를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 C &= C_1 + C_2 + C_3 \\
 &= \square(0 + +) + (+ 0 0) + (0 0 -) \\
 &= (+ + *)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

식 (2)와 같이 계산된 전체 배치 벡터 C 로부터 다음과 같은 추론이 가능하다. 벡터 C 의 z 성분이 *이므로 이 메커니즘의 전체 배치는 $(+ + +)$, $(+ + 0)$ 와 $(+ + -)$ 중에 하나가 될 수 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 그림에서 각 SCM으로 표현된 기본 메커니즘들의 현재 배치로부터 모두 3가지의 최종적인 전체 공간 배치가 가능하다는 것을 의미한다. 즉, 차후의 상세 설계 단계에서 각각의 기본 메커니즘의 크기가 주어짐에 따라, 전체 메커니즘의 출력은 입력에 대해 x 축과 y 축 방향으로는 항상 양의 방향으로 위치하게 되지만, z 축 방향으로는 x - y 평면의 위쪽 방향, 아래쪽 방향, 혹은 평면 위 등 아무 곳이나 위치할 수 있음을 추론할 수 있다.

다음으로 Fig. 9(b)에 있는 예를 보자. 이 경우에는 세 번째 기본 메커니즘의 배치 벡터 C_3 가 $(0 0 +)$ 로서 Fig. 9(a)와는 다른 배치를 나타낸다. 이때,

전체 배치 벡터 C 는

$$\begin{aligned}
 C &= C_1 + C_2 + C_3 \\
 &= (0 + +) + (+ 0 0) + (0 0 +) \\
 &= (+ + +)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

로 주어진다. 이 경우에는 나중에 기본 메커니즘들의 크기가 어떻게 결정되더라도 전체 메커니즘의 최종적인 배치는 오직 한가지만 가능하다는 것을 알 수 있다.

이 예로부터 어떤 메커니즘을 구성하는 기본 메커니즘들의 SCM이 주어진다면, 이것들로부터 SCSM을 계산함으로써, 정량적인 치수가 주어지지 않는 개념 설계 단계에서도 최종적인 전체 공간 배치의 가능성을 추론할 수 있음을 알 수 있다.

6.2 다출력 메커니즘의 공간 거동 추론

6.1절에서 설명한 공간 거동 추론 방법을 여러 개의 출력을 갖는 메커니즘의 경우에도 확장하여 적용할 수 있다. 다출력 메커니즘의 공간 배치 표현과 거동 추론을 Fig. 10의 예와 함께 설명한다. 이 메커니즘은 Fig. 10(a)의 그래프에 나타난 것과 같이 모두 6개의 기본 메커니즘으로 구성되어 있고 노드 0번은 입력, 그리고 노드 4번과 6번은 2개의 출력을 나타낸다. Fig. 10(b)는 이 메커니즘의 여러 가능한 전체 공간 배치 중 하나의 예를 보여주며, 이 공간 배치를 형성하는 기본 메커니즘들의 SCM과 전체 메커니즘

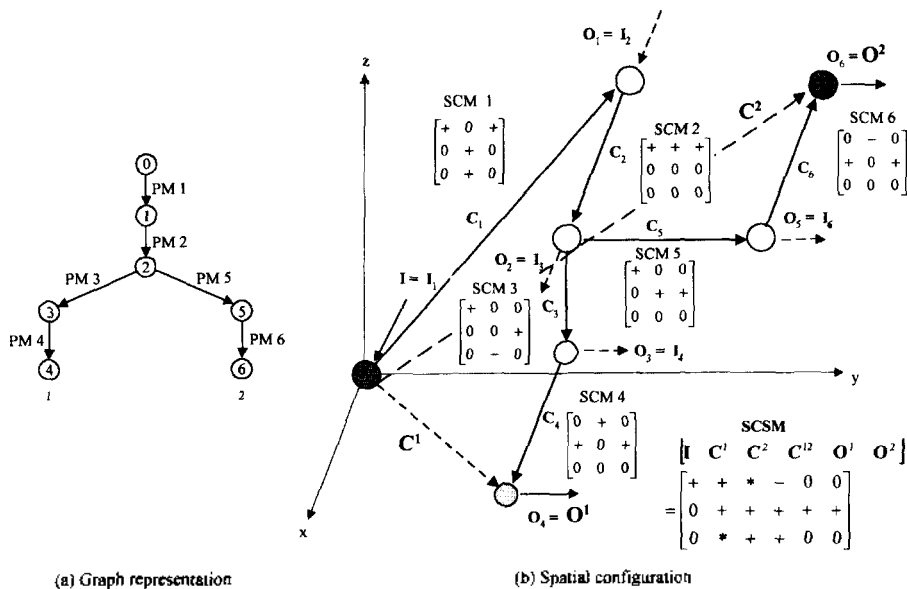


Fig. 10. Graph representation of a mechanism and its one possible spatial configuration.

의 SCSM도 함께 나타나 있다.

먼저, 다 출력 메커니즘의 전체 공간 배치 상태를 나타내기 위해 공간 배치 상태 행렬은 다음과 같이 표현된다. 첫째로, 다 출력 메커니즘의 각 출력들은 입력에 대해 각각 서로 다른 배치와 방향을 가지므로 이런 배치 상태를 나타내기 위해 전체 배치 벡터 $C^i(i=0, \dots, n; n$ 은 출력의 수)와 출력 벡터 O^i 가 각각 출력에 대해 따로 필요하다. 둘째로, 입력과 출력 간의 관계뿐만 아니라 출력들 상호 간의 상대적인 위치 관계를 표현하기 위해 '상대 배치 벡터' $C^i(i \neq j)$ 를 추가적으로 도입한다.

따라서, 2개의 출력을 갖는 메커니즘의 경우는, Fig. 10(b)의 오른쪽 하단에 보여진 SCSM과 같이 전체 공간 배치 상태 행렬이 모두 6개의 벡터로 구성된다. 입력 벡터 I 는 첫 번째 기본 메커니즘(SCM 1)의 입력과 동일하며 전체 출력 벡터 O^1 과 O^2 는 각 체인을 구성하는 마지막 기본 메커니즘(PM 4와 PM 6)의 출력과 동일하다. 각 출력에 대한 전체 배치 벡터 C^1 과 C^2 는 각각 입력에서 해당 출력으로 연결된 기본 메커니즘들의 배치 벡터들로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} C^1 &= C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \\ &= (0 \ + \ +) + (+ \ 0 \ 0) + (0 \ 0 \ -) + (+ \ 0 \ 0) \quad (4) \\ &= (+ \ + \ *) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C^2 &= C_1 + C_2 + C_5 + C_6 \\ &= (0 \ + \ +) + (+ \ 0 \ 0) + (0 \ + \ 0) + (- \ 0 \ 0) \quad (5) \\ &= (* \ + \ +) \end{aligned}$$

또한, 상대 배치 벡터 C^{12} 는 1번 출력(노드 4번)과 2번 출력(노드 6번) 사이에 위치한 기본 메커니즘(PM 4-PM 3-PM 5-PM 6)들의 배치 벡터들로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} C^{12} &= -C_2 - C_3 + C_5 + C_6 \\ &= -(+ \ 0 \ 0) - (0 \ 0 \ -) + (0 \ + \ 0) + (- \ 0 \ 0) \\ &= (- \ 0 \ 0) + (0 \ 0 \ +) + (0 \ + \ 0) + (- \ 0 \ 0) \\ &= (- \ + \ +) \quad (6) \end{aligned}$$

이와 같이 계산된 공간 배치 상태 행렬로부터 Fig. 10과 같이 배치된 메커니즘의 공간 거동을 추론하면 다음과 같다. 먼저, 주어진 입력에 대해 출력의 방향은 모두 +y 방향임을 알 수 있다. 두 번째로 전체 배치 벡터 $C^1 (+ \ + \ *)$ 으로부터 1번 출력은 x와 y축 방향으로는 항상 양의 방향으로만 배치될 수 있지만, z축 방향으로는 +, 0, 그리고 - 영역 중 아무 곳이나 배치 가능하다는 것을 알 수 있다. 즉, 1번 출력은

모두 세 가지의 배치가 가능하다. 마찬가지로 2번 출력도 모두 세 가지의 배치가 가능하다는 것을 알 수 있다. 마지막으로, 상대 배치 벡터 $C^{12}(- \ + \ +)$ 으로부터 2번 출력은 1번 출력에 대해 항상 x축을 따라서는 음의 방향으로, y축 및 z축을 따라서는 양의 방향으로 위치하게 된다는 것을 추론할 수 있다. 따라서 이 경우 1번 출력과 2번 출력은 주어진 배치 상태에서 오직 하나의 상대적 배치 관계만 가능하다는 것을 알 수 있다.

7. 적용 예

본 논문에서 제안한 공간 배치 추론 기법을 재봉틀의 기능 발생 메커니즘에 적용해 보았다. 재봉틀은 전기 모터에 연결된 벨트-풀리를 통해 축회전 운동을 입력으로 받아들인다. 이로부터 바늘의 상, 하 왕복 직선 운동, 그리고 천을 전진시키는 기구인 피드 독(feed dog)에 2개의 요동 회전 운동을 전달한다.

먼저 재봉틀의 기능 발생 메커니즘의 경우에 요구되는 공간 배치 구속 조건을 살펴 보면 Fig. 11과 같다. 공간 배치 조건으로 입력 벡터는 $I (+ \ 0 \ 0)$ 이고, 각각의 출력 벡터는 $O^1 (\pm \ 0 \ 0)$, $O^2 (\pm \ 0 \ 0)$, $O^3 (0 \ 0 \ \mp)$ 이다. 다음으로 출력점들의 배치 벡터로서 바늘의 상하 왕복 직선 운동을 나타내는 3번 출력점은 입력점에서 x축 방향으로 양의 영역, y축 방향으로는 동일한 위치, z축 방향으로는 음의 영역에 위치해야 하기 때문에 요구되는 배치 벡터는 $C^3 (+ \ 0 \ -)$ 와 같다. 이를 기준으로 피드 독에 전달되는 2개의 요동 회전 운동의 출력점이 양쪽으로 배치되어야 하므로 이들의 배치 벡터가 각각 $C^1 (+ \ + \ -)$ 및 $C^2 (+ \ - \ -)$ 로 주어진다. 또한, 이들 출력점들 상호 간의 상대적 위치 관계를 구속하기 위해 상대 배치 벡터들이 다음과 같이 주어진다. 먼저, 2번 출력점은 1번 출력점에 대해 y축 방향으로 음의 영역으로 위치해

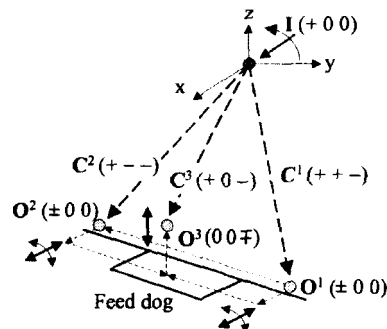


Fig. 11. Spatial constraints for a sewing machine.

야 하므로 C^{12} (0 - 0)가 된다. 또한, 3번 출력점은 1번 출력점에 대해 x 축 방향으로 양의 영역, y 축 방향으로 음의 영역, z 축 방향으로 양의 영역에 위치해야 하므로 C^{13} (+ - +)가 되고, 2번 출력점에 대해서는 x, y 및 z 축 방향으로 모두 양의 영역으로 위치해야 하므로 C^{23} (+ + +)으로 주어진다. 따라서, 재봉틀의 기능 전달 메커니즘에 대해 요구되는 전체 공간 배치 구속 조건을 공간 배치 상태 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$[[C^1 \ C^2 \ C^3 \ C^{12} \ C^{13} \ C^{23} \ O^1 \ O^2 \ O^3] \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} + & + & + & + & 0 & + & + & \pm & \pm & 0 \\ 0 & + & - & 0 & - & - & + & 0 & 0 & 0 \\ 0 & - & - & - & 0 & + & + & 0 & 0 & \mp \end{bmatrix},$$

한편, 재봉틀의 운동 전달 조건을 만족하는 메커니즘은 형태 합성(type synthesis)을 통해 얻어지는 데^[1,2,4,8], Fig. 12의 왼쪽에 해당 조건을 만족하는 재봉틀 메커니즘의 예가 그래프 구조로 나타나 있다. 이 그래프 구조에 나타나 있는 기본 메커니즘과 그들의 SCM 정보를 이용하여 공간 배치 트리를 형성하면 모든 가능한 공간 배치를 생성할 수 있다. 그리고 이들 공간 배치에 해당하는 SCSM을 본 논문에서 설명한 방법대로 구한 다음 식 (7)과 비교하면 주어진 공간 배치 구속 조건을 만족하는 공간 배치를 찾아낼 수 있다. Fig. 12의 오른쪽 그림은 주어진 공간 구속 조건을 만족하는 공간 배치의 예를 보여 준다.

Fig. 13은 식 (7)을 만족하는 또 다른 공간 배치 상태들을 보여준다. Fig. 13(b)의 경우를 보면 비록 주어진 공간 구속 조건을 만족하기는 하지만, z 축의 양의 방향의 방향과 음의 방향에 걸쳐서 배치되기 때문에 공간을 많이 차지하므로 실질적인 면에 있어

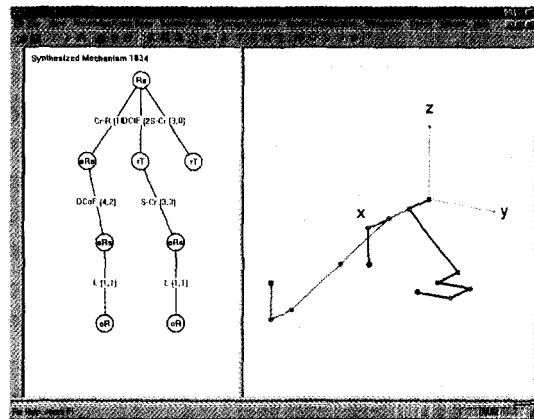


Fig. 12. One possible spatial configuration.

서는 바람직하지 못한 배치임을 알 수 있다. 만약, 이런 배치를 원하지 않는다면 공간 배치 트리를 구성할 때 중간 단계의 공간 배치 상태를 검사하여 양의 z 축 방향으로 배치되는 배치 벡터를 가지는 공간 배치를 버리면 된다. 이와 같이 입력 및 출력 벡터, 각 출력의 전체 배치 및 상대적 배치 벡터에 의한 구속 조건 외에 추가적으로 중간 단계의 공간 배치 상태에 대한 구속 조건을 더 부여하여 공간 배치 트리의 형성 단계에서 적용하면 최종적으로 더욱 실용적인 공간 배치를 얻을 수 있다.

8. 관련 연구

메커니즘의 개념 설계 문제를 다루는 유용한 도구로서 많은 연구들에서 정성적 기법이 사용되어 왔다. 일반적으로 개념 설계 단계에서는 여러 가지 요소들

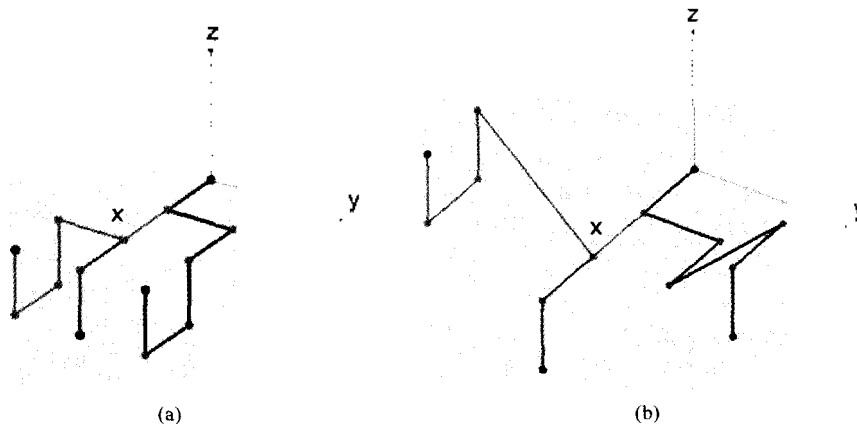


Fig. 13. Other possible spatial configurations.

을 총체적으로 고려하면서 설계가 이루어지는데, 이때 관련 요소들을 정량적으로 모두 고려한다는 것은 불가능한 일이다. 따라서, 이들을 여러 관련 요소들을 좀더 본질적인 측면에서 고려하여 메커니즘의 기능과 거동을 분석해야 할 필요성이 있다. 이러한 개념 설계의 본질을 잘 반영하고 있는 것이 정성적 기법이기에 때문에 개념 설계 단계에서는 정성적 기술이나 표현 방법을 사용하게 된다.

먼저, 메커니즘 합성 분야에서 정성적 기법을 사용하는 연구로는 Chiu^[2], Li^[8], Chakrabarti^[3,7], Issa^[12] 등의 연구가 있는데, 이들 연구들은 비록 세부적인 면에서는 차이가 있지만, 메커니즘의 기능과 거동을 본 연구와 유사한 방식으로 크게 직선 운동, 회전 운동 등으로 분류하여 정성적으로 기술하고 있다. 한편, 메커니즘 해석 분야에서도 메커니즘의 부품들 간의 상호 작용을 해석하기 위해 정성적 기법을 사용하고 있는데^[9,13], 이들이 다루는 문제는 주로 2차원 상에서의 평면 기구들 간의 상호 작용 문제이고, 본 연구에서는 이와는 달리 3차원 공간 상에서의 메커니즘의 배치 문제를 다룬다.

3차원 공간 상의 공간 배치 문제 문제를 다루는 것으로는 Chacrabarti^[7]와 Prabhu^[6]의 연구가 있다. Chacrabarti의 연구에서는 '구속 조건 전파(constraint propagation)' 기법을 이용하여 메커니즘의 입력과 출력의 방향, 배치, 위치 관계를 따로따로 다루고 있는 반면, 본 연구에서는 공간 배치 문제를 행렬로 표현하여 동시에 다루고 있다. 또한 Chacrabarti의 연구에서 위치 관계는 각 구성 요소의 크기가 정해진 다음에 고려되는 것이기 때문에 본 연구에서와 같이 구성 요소의 크기가 정해지지 않은 초기 개념 설계 단계에서 메커니즘의 최종적인 공간 배치 가능성을 제시해 주지는 못한다. Prabhu는 방위와 위치 조건을 갖는 입, 출력 문제를 만족시키기 위해 새로운 요소를 계속 삽입해 가는 방식을 사용하기 때문에 설계 대상의 구성 요소가 계속 변하여 간다. 이러한 방식은 본 연구나 Chacrabarti의 연구와 같이 이미 구성 요소들이 결정된 메커니즘의 여러 가능한 공간 배치 대안을 생성하는 것과는 본질적으로 다르다. 또한, prabhu의 연구도 본 연구에서 다루는 공간 거동의 추론 문제는 다루고 있지 않다.

9. 결 론

본 연구에서는 기본 메커니즘들의 조합으로 구성되는 전체 메커니즘의 공간 배치와 공간에서의 거동

을 추론할 수 있는 방법을 제시하였다. 먼저, 메커니즘을 구성하는 기본 메커니즘들의 공간 배치 정보를 공간 배치 행렬을 이용하여 표현하였다. 그리고 이들로부터 구성되는 최종적인 전체 메커니즘의 공간 배치를 공간 배치 상태 행렬을 이용하여 표현하고 부호 대수에 기반한 정성적 벡터 대수를 적용하여 공간 거동을 추론하였다.

본 연구에서 제안한 행렬에 기반한 방법은, 기본 메커니즘의 공간 배치에 관련된 메커니즘의 방위, 입력과 출력의 방향 및 상대적 위치를 행렬을 통해 간편하고 일관되게 나타냄으로써, 이 정보들을 동시에 간편하게 다룰 수 있게 한다. 또한, 공간 배치의 정보를 공간 배치 상태 행렬로 표현함으로써, 추후에 공간 배치 설계 문제에도 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. 즉, 설계자가 원하는 공간 구속 조건을 역시 공간 배치 상태 행렬로 부여하면, 이것을 메커니즘의 모든 가능한 공간 배치 상태 행렬과 비교함으로써, 원하는 공간 배치 조건을 만족하는 설계 대안들을 쉽게 찾아낼 수 있다.

그리고 본 연구에서 제시한 공간 배치 추론 방법은 부호 대수를 응용한 정성적 벡터 대수를 도입함으로써, 크기 및 치수가 아직 정해지지 않은 초기 설계 단계에서도 메커니즘의 공간 배치 가능성을 설계자에게 제시해 줄 수 있는 장점이 있다.

후 기

이 연구는 서울대학교 정밀기계설계공동연구소의 터보, 동력기계 연구센터와 한국과학재단(KOSEF)의 해외 Post-doc. 연수 지원에 의하여 수행 되었습니다.

참고문헌

1. Erdman, A. G. and Sandor, G. N., Mechanism Design, 3rd ed., Prentice-Hall, 1997.
2. Chiou, S.-J. and Kota, S., "Automated Conceptual Design of Mechanisms," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 34, No. 3, pp. 467-495, 1999.
3. Chakrabarti, A. and Bligh, T. P., "An Approach to Functional Synthesis of Solutions in Mechanical Conceptual Design. Part II: Kind Synthesis," *Research in Engineering Design*, Vol. 8, No. 1, pp. 52-62, 1996.
4. 한영현, 이진우, "메커니즘 설계 대안의 개념적 합성 : 사례 기반 접근 방법", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제4권, 제3호, pp. 224-237, 1999.
5. Pahl, G. and Beits, W., *Engineering Design*, 2nd ed., Springer-Verlag, 1996.
6. Prabhu, D. R. and Taylor, D. L., "Synthesis of Systems

From Specifications Containing Orientations and Positions Associated With Flow Variables," *Proceedings of the ASME Design Automation Conference*, pp. 273-280, 1989.

7. Chakrabarti, A. and Bligh, T. P., "An Approach to Functional Synthesis of Solutions in Mechanical Conceptual Design. Part III: Spatial Configuration," *Research in Engineering Design*, Vol. 8, No. 2, pp. 116-124, 1996.

8. Li, C. L., Tan, S. T. and Chan, K. W., "A Qualitative and Heuristic Approach to the Conceptual Design of Mechanisms," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 9, pp. 17-31, 1996.

9. Forbus, K. D., Nielsen, P. and Faltings, B., "Qualitative Spatial Reasoning: the Clock Project," *Artificial Intelligence*, Vol. 51, pp. 417-471, 1991.

10. Kleer, J. and Brown, J. S., "A Qualitative Physics Based on Confluences," *Artificial Intelligence*, Vol. 24, pp. 7-83, 1984.

11. Nielsen, P., "A Qualitative Approach to Mechanical Constraint," *Proceedings of the Seventh National Conference of the American Association for Artificial Intelligence (AAAI-88)*, St. Paul, Minnesota, USA, pp. 270-274, 1988.

12. Issa, G., Shen, S. and Chew, M. S., "Using Analogical Reasoning for Mechanism Design," *IEEE Expert*, Vol. 9, pp. 60-69, June 1994.

13. Faltings, B. and Sun, K., "FAMING: Supporting Innovative Mechanism Shape Design," *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 3, pp. 207-216, 1996.

부록: 유도 공간 배치 행렬의 계산

유도 공간 배치 행렬은 기본 공간 배치 행렬로부터 다음 식에 의해 계산된다.

$$Derived\ SCM = R \times Basic\ SCM \tag{A-1}$$

여기에서 회전 행렬 R 은 기본 공간 배치 행렬의 입력 벡터를 원하는 방향의 유도 공간 배치 행렬의 입력 벡터와 일치시키기 위한 회전 행렬이다

공간 상에서 회전에 의해 두 벡터를 일치시키는 방법은 무수히 많기 때문에 본 연구에서는 Fig. A-1에 보여진 규약을 사용하여 회전 행렬을 구한 다음 이를 테이블 형태로 저장하여 사용한다. 그럼에서 I_1 은 기본 공간 배치 행렬의 입력 벡터(본 연구에서는 양의 x 축 방향을 향하는 벡터(+ 0 0)을 기준으로 한다)이고 I_2 는 원하는 방향의 입력 벡터이다. 먼저 I_1 을 z 축에 대해 α 만큼 회전시킨 다음, 회전된 좌표축의 y 축을 기준으로 다시 β 만큼 회전 시키면 I_2 을 공

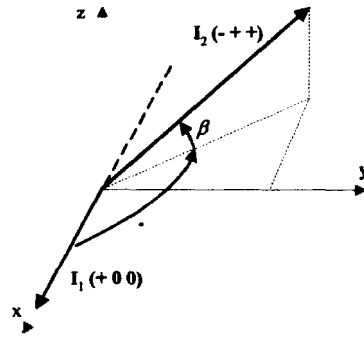


Fig. A-1. Transforming the input vector of basic SCMs to an arbitrary input direction.

간 상의 임의의 영역에 위치한 I_2 로 회전시키는 회전 행렬 ${}_2R$ 을 구할 수 있다. 이것을 식으로 나타내면 식 (A-2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 {}_2R &= R_{z,\alpha} R_{y,\beta} \tag{A-2} \\
 &= \begin{bmatrix} C\alpha & -S\alpha & 0 \\ S\alpha & C\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\beta & 0 & S\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\beta & 0 & C\beta \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} C\alpha C\beta & -S\alpha & C\alpha S\beta \\ S\alpha C\beta & C\alpha & S\alpha S\beta \\ -S\beta & 0 & C\beta \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

식 (A-2)에서 $S\alpha$ 는 $\sin \alpha$, $C\alpha$ 는 $\cos \alpha$ 를 나타낸다(β 에 대해서도 동일). 그리고 β 는 회전된 좌표계의 y 축에 대한 시계 방향의 회전을 나타내므로 식 (A-2)에 대입할 때는 음의 값을 갖는 것에 주의하기 바란다. Fig. A-1에 나타난 예의 경우에는 $(\pi/2 < \alpha < \pi$ 와 $-\pi/2 < \beta < 0$)의 값을 지정하고 각 항의 부호를 취하여 해당 회전 행렬을 얻을 수 있다.

식 (A-2)를 이용하여 Fig. 5의 예에 대해 유도 공간 배치 행렬을 구하는 것을 설명하면 다음과 같다. Fig. 5(a)에서 기본 공간 배치 행렬들의 입력 벡터는 (+ 0 0)이고 Fig. 5(b)에서 유도 공간 배치 행렬들의 입력 벡터는 (0+0)이다. 따라서 유도 공간 배치 행렬을 얻기 위한 회전 행렬 ${}_2R$ 은 식 (A-2)에 $\alpha=\pi/2$ 와 $\beta=0$ 을 대입하여 구할 수 있다. 이를 이용하여 Fig. 5(a)의 기본 공간 배치 행렬들을 회전시키면 Fig. 5(b)의 배치에 해당하는 유도 공간 배치 행렬들을 식 (A-3)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 SCM_i &= R \times SCM_i \tag{A-3} \\
 SCM_i &= \begin{bmatrix} 0 & - & 0 \\ + & 0 & 0 \\ 0 & 0 & + \end{bmatrix} \begin{bmatrix} + & 0 & 0 \\ 0 & + & \pm \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & - & \mp \\ + & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$SCM_2 = \begin{bmatrix} 0 & -0 \\ + & 0 & 0 \\ 0 & 0 & + \end{bmatrix} \begin{bmatrix} + & 0 & 0 \\ 0 & + & \pm \\ 0 & + & \pm \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\mp \\ + & 0 & 0 \\ 0 & + & \pm \end{bmatrix}$$

$$SCM_3 = \begin{bmatrix} 0 & -0 \\ + & 0 & 0 \\ 0 & 0 & + \end{bmatrix} \begin{bmatrix} + & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & + & \pm \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ + & 0 & 0 \\ 0 & + & \pm \end{bmatrix}$$

$$SCM_4 = \begin{bmatrix} 0 & -0 \\ + & 0 & 0 \\ 0 & 0 & + \end{bmatrix} \begin{bmatrix} + & 0 & 0 \\ 0 & + & \mp \\ 0 & + & \pm \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & + & \pm \\ + & 0 & 0 \\ 0 & + & \pm \end{bmatrix}$$

다음으로 Fig. A-2의 크랭크-슬라이더에서 왕복 직선 운동이 회전 운동으로 변환되는 기능의 공간 배치 예를 살펴 보자. Fig. A-2(a)의 기본 공간 배치 행렬의 입력 벡터는 $(\pm 0 0)$ 이고 Fig. A-2(b)의 유도 공간 배치 행렬의 입력 벡터는 $(0 + +)$ 이다. 이 경우에 대한 회전 행렬은 식 (A-2)에 $\alpha = \pi/2$ 와 $-\pi/2 < \beta < 0$ 을 대입하여 구할 수 있고 이를 이용하여 유도 공간 배치 행렬을 계산할 수 있다.

이 예에서는 하나의 기본 공간 배치 행렬에서 유도된 공간 배치 행렬이 하나로 정해지지 않고 여러 가지 배치가 가능한 경우가 생기는데, 이것에 대해 자세히 설명한다. 예를 들면 두 번째 유도 공간 배치 행렬이 아래와 같이 구해진다.

$$SCM_2 = \begin{bmatrix} 0 & -0 \\ + & 0 & - \\ + & 0 & + \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \pm & + & 0 \\ 0 & 0 & + \\ 0 & + & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & - \\ \pm & * & 0 \\ \pm & + & 0 \end{bmatrix} \tag{A-4}$$

위 식에서 배치 벡터 C_2 는 $(0 * +)$ 가 되므로, Fig. A-2(b)에 나타낸 대로 $C_2^1(0 + +)$, $C_2^2(0 0 +)$ 와 $C_2^3(0 - +)$ 의 세 가지 배치가 가능하다는 것을 알 수 있다. 이런 경우는 원래 두 개의 좌표 축 사이

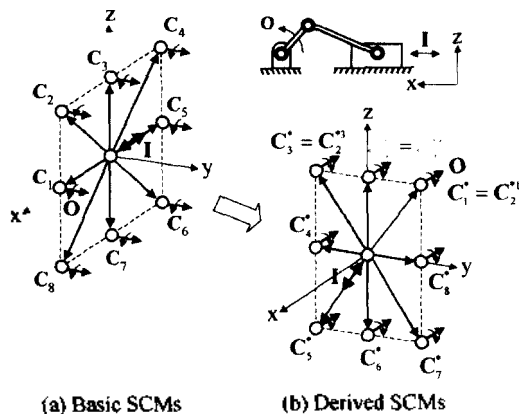


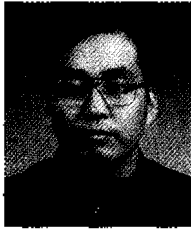
Fig. A-2. Derived SCMs of the slider-crank mechanism.

의 평면에 배치되었던 배치 벡터가 회전할 때 생길 수 있는 현상인데, 배치 벡터의 초기 위치와 회전량에 따라 최종적인 위치가 정성적으로 달라질 수 있기 때문이다. Fig. A-2의 예에서는 최초 $C_2(0 + 0)$ 가 $\alpha = \pi/2$ 만큼 회전한 후 $(+x, +y)$ 평면에 위치하여 $(0 + +)$ 의 배치 상태가 되고, 이후 $-\pi/2 < \beta < 0$ 의 회전에 의해 각각 $C_2^1(0 + +)$, $C_2^2(0 0 +)$ 와 $C_2^3(0 - +)$ 으로 배치될 수 있다. 여기서 주의할 점은 이들 세 가지 중에서 두 가지는 같은 그룹에 속한 공간 배치 행렬들에 의해서 얻어지는 것과 동일한 공간 배치 행렬이라는 점이다. Fig. A-2(b)에서 C_2^1 과 C_2^2 는 각각 C_2 와 C_2 가 회전하여 생기는 C_2 과 C_2 와 동일하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 유도 공간 배치 공간 행렬을 모두 구한 다음에 중복되는 것들을 검색해서 처리할 필요가 있다.

다음으로 정성적 부호대수를 회전 행렬에 적용함에 있어서 제한 사항에 대해 간략히 설명한다. 먼저, 회전 행렬과의 곱에 의해 유도 공간 배치 행렬의 입력 벡터, 배치 벡터 및 출력 벡터가 정성적 부호대수를 통하여 얻어졌을 때, 각 벡터의 성분 중에 *가 하나만 있는 경우에는 논문의 본문에서 설명한대로 그 성분이 +, 0, - 중에 하나의 값을 가질 수 있는 것으로 해석하면 된다. 하지만, 만약 2개 이상의 성분이 *값을 가지게 되면 더 이상 정성적 추론을 적용할 수 없다. 왜냐하면, 회전 행렬의 각 요소들이 서로 종속되어 있으므로 회전 행렬과 정성 벡터의 곱에 의해 얻어진 정성 벡터의 각 성분이 정량적인 관점에서 실제로는 서로 종속되어 있기 때문이다. 가령, 정성적 부호대수의 결과로 $(* * +)$ 인 정성적 벡터가 얻어졌다면, 첫 번째 성분이 3가지, 두 번째 성분이 3가지의 가능한 값을 가지므로 정성적 추론에 의하면 모두 9가지의 조합이 가능하다는 결론이 나오지만, 실제로는 각 성분이 종속되어 있기 때문에 9개 보다 적은 값만이 가능하게 된다.

하지만, 본 논문에서 다루고 있는 평면 기구의 공간 배치에 있어서는 위와 같이 어떤 벡터에서 두 개 이상의 성분이 모호성(즉, 벡터의 어느 성분이 *의 값을 갖는 경우)을 갖는 일은 없기 때문에 본 논문에서 제안한 추론 방법이 유효하다. 좀더 자세히 설명하면, 입력 벡터의 경우에는 자신이 기준이 되어 어떤 특정한 영역으로 회전하므로 모호성이 발생하지 않으며, 출력 벡터는 평면 기구의 특성에 의해 입력 벡터에 대해서 직교하고나 평행하기 때문에 역시 모호성이 발생하지 않는다. 배치 벡터의 경우에는 모호성이 발생하기는 하지만(Fig. A-2의 예), 평면 기

구의 특성에 의해 입력 벡터에 대해 평행 또는 직교하는 평면에 배치되기 때문에 어떤 배치 벡터의 두 개 이상 성분에서 동시에 모호성이 발생하는 일은 없다.



한 영 현

1989년 서울대학교 기계설계학과 학사
 1993년 서울대학교 기계설계학과 석사
 1999년 서울대학교 기계설계학과 박사
 1999년~현재 서울대학교 정밀기계설계공동
 연구소 특별연구원
 2000년~현재 미국 University of Wisconsin
 - Madison 방문 연구원
 관심분야: Intelligent CAD, Geometric &
 Solid modeling, Design theory
 and methodology, VR-CAD, Inter-
 net-based CAD



이 건 우

1978년 서울대학교 기계공학과 학사
 1981년 미국 M.I.T. 기계공학과 석사
 1984년 미국 M.I.T. 기계공학과 박사
 1984년~1986년 미국 Univ. of Illinois at
 Urbana-Champaign 조교수
 1986년~현재 서울대학교 기계항공공학부
 교수
 관심분야: 다중해상도 모델링 커널, 가상현
 실, Rapid Prototyping, Custom-
 made shoe design