

정밀점 기구합성시 지정위치의 변경을 이용한 허근의 실수화 방법

이태영*, 심재경**, 이재길*

Derivation of Real Values from Imaginary Roots by Altering Prescribed Positions in the Precision Point Synthesis of Mechanisms

Tae Young Lee*, Jae Kyung Shim**, and Jae Kil Lee*

ABSTRACT

In the precision point synthesis of mechanisms, it is usually required to solve a system of polynomial equations. With the aid of efficient algorithms such as elimination, it is possible to obtain all the solutions of the equations in the complex domain. But among these solutions only real values can be used for real mechanisms, while imaginary ones are liable to be discarded. In this article, a method is presented, which leads the imaginary solutions to real domain permitting slight alteration of prescribed positions and eventually increases the number of feasible mechanisms satisfying the desired motion approximately. Two synthesis problems of planar 4-bar path generation and spatial 7-bar motion generation are given to verify the proposed method.

Key Words : Precision point synthesis (정밀점 합성법), Prescribed position (지정위치), Path generation (경로생성), Motion generation (운동생성), Continuation method(연속법), Elimination method (소거법)

1. 서론

일반적으로 기구합성은, 요구되는 운동에 적합한 기구의 종류를 결정한 후에, 해당 기구의 조인트의 위치와 링크의 길이 등을 결정하는 치수합성과정을 거치게 된다. 이러한 과정은 대체적으로, 기구가 통과해야 하는 지정위치에서의 구속조건으로 형성되는 비선형 연립다항식의 해를 구하는 문제로 이어진다.

정밀점 합성법에 있어서는 연립식의 해를 뉴턴-랩슨법과 같은 수치적 반복법을 이용하여 구할 수 있으나, 여기에는 초기값의 적절한 가정이 요구될 뿐 아니라 연립식을 만족하는 모든 해를 구할 수 있다는 보장 또한 없다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대표적인

방법으로는 연속법과 소거법^[1]이 있으며, 이는 기구학적 구속식을 만족하는 모든 해를 안정적으로 제공할 수 있으므로, 지정위치를 오차 없이 지나게 하는 정밀점 합성법에 효과적으로 이용될 수 있다. 그러나 그 해가 복소영역 내에 존재하기 때문에, 실근을 제외한 허근들은 실제 기구로 구현될 수 없으며, 지정위치에 따라서는 실근이 전혀 존재하지 않는 경우도 발생하게 된다. 또한 실근이라 하더라도 링크의 길이가 너무 길어 지거나 조인트의 설치위치 등이 실제 설치 가능영역을 벗어날 수 있다. 이러한 경우에는 민감도 해석-설계 또는 최적화방법 등을 통한 근사적 합성법을 사용하게 된다. 이는 실제로 기구합성의 문제가 지정위치를 오차 없이 정확히 통과하는 경우보다는 어느 정도

* 고려대학교 대학원
** 고려대학교 기계공학과

의 적절한 범위의 오차를 허용하는 경우가 많으므로 그 필요성이 확대된다. 민감도 해석·설계와 최적화법은 조인트의 설치위치와 링크의 길이 등과 같은 제한 조건과 허용범위를 만족하는 기구학적 구속식을 반영하여 이루어지게 되고, 대부분의 경우는 적절한 초기값을 필요로 한다. 초기값에 따라 수렴되는 최적해가 달라질 수 있을 뿐 아니라 수렴되지 않는 경우도 발생하므로, 요구되는 지정위치와 제한 조건을 크게 벗어나지 않는 초기값을 선정하여 수렴의 가능성을 높임과 동시에 가능한 한 다른 곳으로 수렴하는 다양한 값들을 취함으로써 기구 선택의 폭을 넓히는 것이 중요하다.

이를 위한 효과적인 방법의 한가지는 허용범위 내에 존재하는 적절한 수의 지정위치를 선택하여, 기구학적 조건에 의해 구성된 연립식의 모든 해를 찾는 정밀점 합성을 한 후, 이를 초기값으로 사용하는 것이다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 연속법이나 소거법에 의한 복소영역의 해들 중 실근만이 선택되고 나머지 허근들은 초기값으로 사용될 수 없으므로, 그 수가 줄어들게 된다.

본 논문에서는 이와 같이 정밀점 합성법에서 기구 구현이 불가능하며, 최적설계의 초기값으로도 이용되지 못하는 허근들을, 기구합성시 입력에 해당하는 지정위치를 미세 변경함으로써 실수화 하는 방법을 제시하였다. 그리고 2 가지 기구합성 문제 즉, 고정 조인트의 위치가 결정된 평면 4 절 기구의 경로생성 합성과 5-SS 공간 7 절 기구에 대한 운동생성의 합성 문제에 적용하여 그 타당성을 검토하였다.

2. 허근의 실수화 방법

2.1 필요성

정밀점 합성법에서의 입력은, 기구상의 한 점이 통과하기 원하는 N 개의 지정위치 P_i ($i=1, \dots, N$)로 주어지며, 이는 기구 합성의 목적에 따라 위치와 각도 등으로 나타낼 수 있는 위치 벡터이다. 예를 들어 평면기구의 경로생성의 문제에서의 지정위치는 병진위치만을 포함하여 $P_i = [P_{ix}, P_{iy}]^T$ 로 주어지며, 운동생성의 문제에서는 병진위치와 회전각이 함께 포함되어 $P_i = [P_{ix}, P_{iy}, P_{ia}]^T$ 등과 같이 나타난다. 이러한 지정위치에 대한 기구학적 구속식은 대부분 비선형 연립식의 형태를 가지게 되고, 해의 수는 각 식의 차수들과 계수관계 등에 의해 결정된다. 연립식의 각각의 해들은 실제로 구현될 전체기구 또는 기구를 구성하는 링

크의 차수를 나타내므로, 복소영역 내에서 많은 해들이 허근으로 존재 한다면, 이는 그 만큼의 적절한 기구를 선택할 수 있는 폭이 줄어드는 결과를 가져온다. 이러한 측면에서 무용한 허근을 실수화 하여 이용 가능한 것으로 바꾸어 주는 작업은, 그 자체로도 의미가 있을 뿐 아니라, 좀 더 나은 성능을 위해 수행되는 민감도 해석·설계 혹은 최적설계의 초기값의 다양화에도 기여할 것이다.

2.2 실수화 알고리즘

정밀점 합성에 있어서 결정되는 링크의 차수는 지정위치 P_i ($i=1, \dots, N$)의 변화에 대부분 민감하므로, 이를 이용하면 지정위치의 미세변경으로 허근을 실수화 할 수 있다. 기구학적 구속식의 미지수가 m 개이고, 이에 해당하는 복소영역의 해가 n 개인 합성문제에 대해, 켈레 복소수로 나타나는 허근의 쌍이 c 개라면 실근은 $n - 2c$ 개가 된다. 2c 개의 허근에 대해서는 다음과 같은 지정위치의 미세변경을 이용한 실수화 방법을 적용할 수 있다. 즉, 각 허근을 실수화 하는데 있어서, 켈레복소수 중 한 개의 해를 실수화 하면, 결과적으로 켈레로 존재하는 해 역시 실수화 되므로, 각각의 쌍에서 한 개씩 c 개를 선택하여 실수화 시키는 과정이 필요하다. 실수화의 과정은 매우 단순하다. j 번째 미지수의 k 번째 해를 x_{jk} ($j=1, \dots, m, k=1, \dots, n$)라고 할 때, 이것이 허근이면 목적 함수와 지정위치의 허용 오차에 대한 부등구속조건을 다음과 같이 구성한다.

$$\text{Minimize } F_i(P_1, \dots, P_N) = \sum_{j=1}^m \text{Im}(x_{jk})^2 \quad (1)$$

$$\text{Subject to } (P_i)_{\min} \leq P_i \leq (P_i)_{\max}, \quad i=1, \dots, N$$

여기서 $\text{Im}(x_{jk})$ 는 x_{jk} 의 실수부를 제외한 순허수부를 나타낸다. 예를 들어 $\text{Im}(2+3i)=3$ 이 된다. 만일 (1)의 목적함수 F_i 이 0이 되면 해가 실수화 되었다고 할 수 있으므로 지정위치 벡터 P_i ($i=1, \dots, N$)를 변수로 F_i 이 0이 될 때까지 최적화를 수행한다. 최적화는 다양한 방법을 이용할 수 있으나, 본 논문에서는 목적함수가 감소하는 방향으로 각 변수에 대해 미소크기의 증감을 반복하여 F_i 이 0이 되도록 하였다. x_{jk} 의 켈레복소수 \bar{x}_{jk} 에 대해서는 식 (1)의 최적화 과정을 반복하지 않고 x_{jk} 가 실수가 되기 직전과 직후의 미세 변경된 P_i 에 대해 정밀점 합성을 수행하여 모든 해를 구한 후에 \bar{x}_{jk} 가 변화되어 실수가 된 값을 택하는 방법을 이용하였다. 그러나 F_i 의 감소가 연속적으로 이루어 진다면 F_i 이 0이 되는 순간은 2개의 실수해가 거의 일치

하는 이중근의 상태에 가까우므로, 좀 더 다양한 해를 얻기 위해서는 필요에 따라 근접해 있는 2개의 근을 분리하기 위한 다음의 최적화 과정을 수행할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Maximize } F_2(\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N) &= \sum_{j=1}^m (x'_{jk} - \bar{x}_{jk})^2 \\ \text{Subject to } F_1(\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N) &= 0, \\ (\mathbf{P}_i)_{\min} &\leq \mathbf{P}_i \leq (\mathbf{P}_i)_{\max}, \quad i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 x'_{jk} 와 \bar{x}_{jk} 는 허근 x_{jk} 와 그것의 켈레복소수 \bar{x}_{jk} 가 실수로 변환 후를 나타내는 것으로서 (1)의 최적화 직후에는 두 값이 매우 근접해 있으므로 (2)의 과정을 통해 적절한 거리를 유지시킬 수 있다. (1)의 과정에서 주의해야 할 사항은 지정위치의 변화에 따라, 그에 해당하는 허근을 정확히 추적하여야 하는 것이다. 소거법 등에 의해 모든 해를 구한 이후의 (1)의 과정은 복소수연산, (2)의 과정은 실수연산 하에서의 뉴턴-랩슨법을 활용할 수 있다. 이 때의 초기값은 매 루프마다 최신값으로 교체하여 해당경로를 벗어나 다른 값으로 교차되어 수렴하는 것을 방지해야 한다.

3. 평면 4절 경로 생성기의 합성

3.1 구속식의 유도

Fig. 1은 4절 링크기구이며, 초기위치에서의 기구를 실선으로 나타내었다. 4절 링크의 커플러 위의 한 점이 몇 개의 지정위치 \mathbf{P}_i 를 지나도록 초기위치 \mathbf{P}_1 에 대한 이동 조인트의 상대적 위치를 나타내는 벡터 $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2$ 와 고정조인트의 위치를 나타내는 $\mathbf{O}_1, \mathbf{O}_2$ 값을 결정함으로써 4절 링크기구의 경로생성 합성을 수행할 수 있다. Fig. 1로부터 \mathbf{A}_i 와 \mathbf{B}_i 는 다음과 같다.

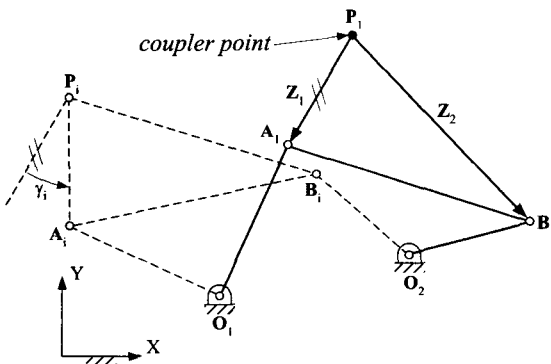


Fig. 1 Four-bar mechanism.

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{P}_i + [\mathbf{R}_{\gamma_i}] \mathbf{Z}_1 \quad (3)$$

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{P}_i + [\mathbf{R}_{\gamma_i}] \mathbf{Z}_2 \quad (4)$$

여기서, $[\mathbf{R}_{\gamma_i}]$ 는 초기위치와 i 번째 위치 사이의 커플러 링크의 Z 축에 대한 γ_i 만큼의 회전을 나타내는 행렬이다. 벡터 $(\mathbf{A}_i - \mathbf{O}_1), (\mathbf{B}_i - \mathbf{O}_2)$ 의 크기는 강체인 링크의 길이이므로 N 번째까지의 위치에 대해 다음이 성립한다.

$$(\mathbf{A}_i - \mathbf{O}_1)^T (\mathbf{A}_i - \mathbf{O}_1) - (\mathbf{A}_1 - \mathbf{O}_1)^T (\mathbf{A}_1 - \mathbf{O}_1) = 0, \quad i=2, \dots, N \quad (5)$$

$$(\mathbf{B}_i - \mathbf{O}_2)^T (\mathbf{B}_i - \mathbf{O}_2) - (\mathbf{B}_1 - \mathbf{O}_2)^T (\mathbf{B}_1 - \mathbf{O}_2) = 0, \quad i=2, \dots, N \quad (6)$$

식 (5)와 (6)의 i 번째의 2개의 식으로부터 각각의 γ_i 를 소거하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Phi_{i-1}(\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \mathbf{O}_1, \mathbf{O}_2) = 0, \quad i=2, \dots, N \quad (7)$$

식 (7)은 4개의 미지 벡터의 함수이며, 만일 고정조인트의 위치를 나타내는 2개의 벡터 \mathbf{O}_1 과 \mathbf{O}_2 가 미리 결정되어 있다면 $\mathbf{Z}_1(Z_{1x}, Z_{1y})$ 과 $\mathbf{Z}_2(Z_{2x}, Z_{2y})$ 의 각 성분 들인 4개의 스칼라 값이 미지수로 남게 되어, 최대 $N=5$ 즉, 5개의 지정위치를 만족시키는 경로생성이 가능하다. 이러한 합성문제에 대해 36개의 복소해가 존재한다는 것과 그 해들을 모두 구할 수 있는 방법이 알려져 있다^[2,3].

3.2 합성예제

본 예제에서는 \mathbf{O}_1 과 \mathbf{O}_2 를 각각 $(0, 0), (1, 0)$ 으로 임의로 설정하였으며, Fig. 2와 같은 5개의 지정위치를 만족하는 4절 링크장치의 합성을 수행하였다. 우선 소거법을 이용한 정밀점 합성에 의해 얻어진 36개의 복소해를 Table 1에 나타내었는데, 그 중 6개만이 실근이고 15쌍은 허근이다. Table 1의 6개의 실근 중에서 기구의 전체 크기와 링크의 길이 등이 적절한 1번과 6번 해에 해당하는 4절 링크기구를 Fig. 3에 도시하였으며, 그림에서 보는 것과 같이 5개의 지정위치를 오차 없이 정확하게 통과하는 것을 볼 수 있다.

정밀점 합성법의 장점 중의 한 가지가 지정위치를 오차 없이 지난다는 것이다. 그러나 기구 가공상의 오차와 실제 요구조건을 고려하면 어느 정도의 지정위치의 오차가 허용되는 문제가 많다. 본 예제에서는 Fig. 2의 지정위치에 오차를 허용하되, 각 허근들이 어느 정도의 오차범위 내에서 실수화 되는 지를 살펴

보기 위해 지정위치의 오차 범위에는 제한을 두지 않았다. 즉, 식 (1)의 최적화만을 적용하여 각 허근쌍에서 1 개씩을 채택한 15 개의 허근을 실수화 하였고, 그 실수화된 결과와 각각의 실수화에 요구되는 지정위치의 변화량을 Table 2 에 나타내었다. 각 변수의 미소 크기(0.001~0.005)의 변경을 목적함수의 감소방향으로 반복했으므로 오차의 크기가 일정해지는 경향을 나타내었다. 허근으로부터 유도된 15 개의 해 중 Fig. 2 의 지정위치로부터의 오차가 비교적 작은 것에 해당하는 기구들을 Fig. 4 에 나타내었는데, 지정위치를 다양한 경로를 따라 근사적으로 지나가는 것을 알 수 있다.

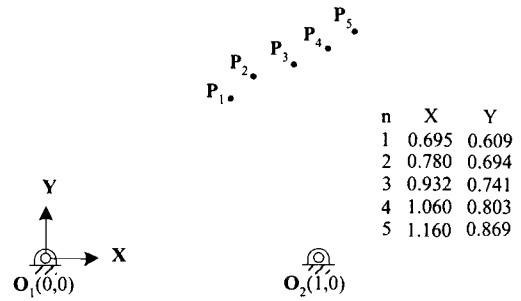


Fig. 2 Prescribed positions for four-bar mechanism.

Table 1 All solutions of the four-bar mechanism (36 sols. in the complex domain).

Sols.	Z _{1x}	Z _{1y}	Z _{2x}	Z _{2y}
1	0.3707	0.0222	0.0892	0.1295
2	3.3661	1.9572	0.0564	0.5650
3	0.9320	-0.4017	-102.475	-66.9663
4	1.0570	-0.4547	-7.7716	-3.7060
5	0.9182	-0.5060	15.8696	3.7999
6	0.6640	-0.5790	0.6576	-0.5800
7,8	0.2626±0.1763i	-0.5106±0.0385i	0.3643±0.3776i	-0.0426±0.1231i
9,10	0.1712±0.0389i	-0.0235±0.0209i	0.0606±0.0165i	0.0428±0.0134i
11,12	-0.5667±0.0745i	-0.7332±0.0931i	0.4832±0.2468i	-0.3692±0.6306i
13,14	-0.6890±0.0826i	-0.7893±0.1270i	0.1655±0.2680i	-0.5774±0.4410i
15,16	0.1236±0.5869i	-0.6239±0.3382i	0.3862±0.0415i	-0.6552±0.1019i
17,18	0.0853±0.2562i	-0.6154±0.0368i	0.3013±0.0228i	-0.6389±0.0025i
19,20	-0.0457±0.3005i	-0.7382±0.0484i	0.3279±0.0413i	-0.6515±0.0014i
21,22	-0.4390±0.0360i	-0.8044±0.0449i	0.1547±0.0413i	-0.5506±0.0277i
23,24	-0.4809±0.1216i	-0.8100±0.0357i	0.1507±0.1076i	-0.5573±0.0908i
25,26	-0.8756±0.1678i	-0.7781±0.1587i	0.0377±0.3259i	-0.6049±0.4500i
27,28	-0.5981±0.2286i	-0.8401±0.0794i	0.1706±0.2384i	-0.6127±0.2249i
29,30	-0.8837±0.1742i	-0.7818±0.1834i	0.0598±0.3384i	-0.6576±0.4855i
31,32	-0.9372±0.0680i	-0.7194±0.2770i	0.3904±0.3006i	-0.4016±0.7206i
33,34	0.2860±0.3112i	0.3276±0.2762i	-0.0993±0.0862i	0.0972±0.0939i
35,36	-0.7075±0.1471i	0.1168±0.4752i	0.1326±0.3400i	-0.4145±0.2953i

Table 2 The real values derived from imaginary solutions and altered values for each position.

Sols.	Z _{1x}	Z _{1y}	Z _{2x}	Z _{2y}	The altered values of prescribed positions (×10 ⁻³)									
					ΔX ₁	ΔX ₂	ΔX ₃	ΔX ₄	ΔX ₅	ΔY ₁	ΔY ₂	ΔY ₃	ΔY ₄	ΔY ₅
7	0.3380	-0.4330	0.4981	0.1340	2	2	-2	2	-2	-2	2	2	-2	2
9	0.3255	0.2308	0.0468	0.1501	0	-40	15	-5	10	20	30	-15	-15	5
11	-0.8173	-0.8825	0.4117	-0.9139	-25	-15	0	45	-45	45	35	-10	-45	-5
13	-0.8824	-0.7116	0.0740	-0.6001	-35	-11	49	49	-49	-6	-26	49	-26	-49
15	0.2193	-0.4848	0.3850	-0.1559	-9	10	-10	0	-5	10	-10	5	0	0
17	0.5824	-0.6089	0.5828	-0.6087	-10	15	-30	-15	0	5	0	20	10	-35
19	0.4237	-0.6476	0.4888	-0.6309	5	-5	15	-15	15	-15	5	5	15	-15
21	-0.4184	-0.8625	0.2688	-0.6843	45	-45	-45	45	-45	-30	45	-45	10	-45
23	-0.8325	-0.8399	-0.0342	-0.5008	45	-45	45	-35	-45	45	45	-30	30	-45
25	-0.8889	-0.8069	-0.0823	-0.4132	45	-45	25	-10	-20	45	45	-15	-25	-45
27	-0.8223	-0.8341	0.8021	-1.6613	-10	-25	20	45	-40	40	40	-20	-40	-30
29	-0.9722	-0.9270	0.4219	-0.8182	-45	-15	20	45	-45	35	25	-10	-40	10
31	-0.9146	-0.7768	-0.2415	-0.1878	45	-45	35	15	-20	35	35	-15	-25	-25
33	0.2630	0.0403	0.0157	0.1099	14	-8	-2	10	-14	2	4	10	-8	-8
35	-0.5007	0.3878	-0.6186	-0.4501	6	6	-6	5	-5	2	-6	5	-5	5

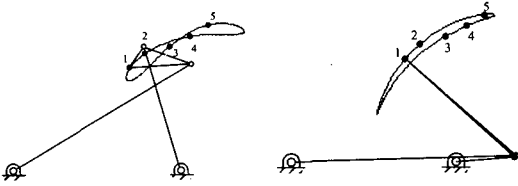


Fig. 3 Linkages of real solutions.(sol. 1, 6 of Table 1)

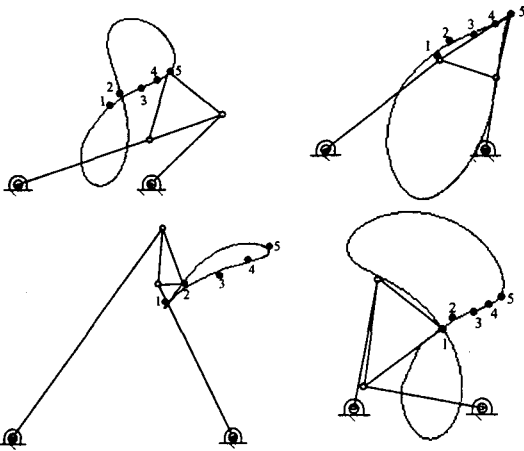
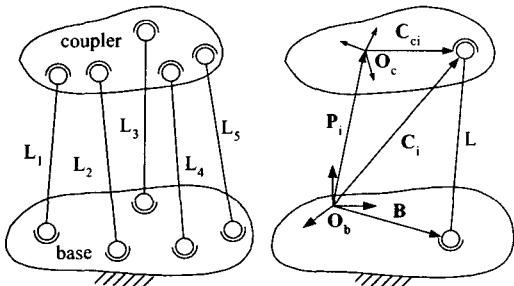


Fig. 4 Linkages derived from complex solutions.
(sol. 7, 15, 33, 35 of Table 2)

4. 공간 7절 운동 생성기의 합성

4.1 구속식의 유도

Fig.5(a)와 같이 5 개의 S-S 링크로 이루어진 공간 기구는 각 S-S 링크의 축방향의 회전에 해당하는 수동 자유도(passive D.O.F)를 제외하면 전체적으로 1 자유도를 갖는다. 이 기구의 커플러가 공간상에 주어진



(a) Entire linkage (b) S-S dyad
Fig. 5 Spatial mechanism with 5-SS links.

7 개의 지정위치를 정확히 지나도록 하기 위해서는 각각의 구면조인트의 위치가 그에 맞게 결정되어야 하며, 이는 운동생성의 합성에 해당한다. 여러 개의 다이어드로 이루어진 기구의 운동생성의 합성에서는 전체기구를 한꺼번에 합성하기보다는 기구를 Fig.5 (b)와 같은 개별 다이어드로 나누어 설계한 후, 그 중 5 개를 선택하여 조합하는 것이 일반적인 방법이다^[4]. Fig. 5(b)의 다이어드 설계시에 결정해야 할 값은 초기 위치에 대한 두 개의 구면 조인트의 위치를 나타내는 벡터 C_1 과 B 이다. 보통 초기위치에서는 베이스와 커플러에 각각 고정되어 있는 좌표계 O_b 와 O_c 의 좌표축들이 서로 평행하도록 좌표계를 선정하므로 다음이 성립한다.

$$C_1 = P_1 + C_{c1} \quad (8)$$

또한 i번째 위치에서의 C_i 는 다음과 같다.

$$C_i = P_i + C_{ci} = P_i + [R_i]C_{c1} = P_i + [R_i](C_1 - P_1) \quad (9)$$

여기서 P_i 는 i번째 지정위치에서의 O_c 의 원점의 위치에 해당하는 값이며, $[R_i]$ 는 초기 위치와 i번째 지정 위치 사이의 커플러의 회전행렬로서 롤-피치-요각 등으로 나타낼 수 있다. 벡터 $(C_i - B)$ 의 크기는 i번째 위치에서의 S-S 링크의 길이이므로 N번째까지의 위치에 대해 다음의 합성식이 성립한다.

$$(C_i - B)^T(C_i - B) - (C_1 - B)^T(C_1 - B) = 0, \quad i = 2, \dots, N \quad (10)$$

식 (10)에 포함된 미지수는 $C_1(C_{1x}, C_{1y}, C_{1z})$, $B(B_x, B_y, B_z)$ 로서 6개의 스칼라 값이며 이 값들을 모두 구하기 위해서는 6개의 구속식이 필요하므로, $N=7$ 즉, 7개의 지정위치까지를 만족시키는 운동생성의 합성이 가능하고, 이에 대한 20개의 모든 복소해를 구할 수 있는 방법이 제시되어 있다^[5,6].

4.2 합성예제

본 예제의 지정위치는 Table 3에 주어져 있다. 여기서 커플러의 회전에 관한 정보는 고정된 좌표계의 Z-Y-X 축 방향의 회전을 나타내는 롤-피치-요각을 사용하였으며 회전행렬은 다음과 같다.

$$[R_i] = [R_{\alpha_i}][R_{\beta_i}][R_{\gamma_i}] \quad (11)$$

합성결과, Table 4와 같이 실수해가 4 개 밖에 존재하지 않아서 실수해 만으로는 전체기구를 구성하

지 못하게 된다. 본 예제에서는 16 개의 허근에 식 (1) 의 실수화 과정과 식 (2)의 분리 과정을 적용하였다. 그 결과 Table 5 와 같이 비교적 작은 크기에 해당하는 지정위치의 변화량만으로 16 개의 허근을 실수화 하였다. 지면 관계상 Table 5 에는 공간에서의 위치를 나타내는 각 인자의 최대 변화량만을 나타내었다. 또한, 이와 같이 각각 다른 오차를 포함하는 다이어드의 조립에 의해 구성된 전체기구의 오차를 확인하기 위해 Table 4 에서 진하게 표시된 실수해 1 개와 Table 5 의 실수화에 의해 얻어진 4 개의 다이어드로 구성된 공간 7 절기구의 변위해석을 수행하였다. 기구의 전체 형상은 Fig. 6 과 같고, Fig. 7 의 해석결과는 상단의 커

플러의 한 점 P 가 X 값에 따라 지정위치를 큰 오차없이 지나감을 보여준다.

Table 3 Initial prescribed positions.

	X	Y	Z	α (deg.)	β (deg.)	γ (deg.)
1	0	0	0	0	0	0
2	20	20.5	-5	-1.4	-0.2	-0.4
3	40	54.8	-16.3	-5.4	-0.8	-1.6
4	60	101.1	-43.7	-13.7	-2.7	-4.6
5	80	123.6	-72.9	-19.6	-5.5	-10.4
6	100	132.4	-97.5	-22.8	-7	-14.7
7	120	136.1	-120.3	-24.6	-7.7	-19

Table 4 All solutions for the dyads (20 sols. in the complex domain).

Sols.	C_{1x}	C_{1y}	C_{1z}	B_x	B_y	B_z
1	118.776	-297.027	-256.525	102.007	-272.401	-279.369
2	128.635	-260.264	-166.401	108.298	-230.964	-183.71
3	517.489	-218.707	249.334	514.886	-195.307	278.852
4	592.198	194.842	131.451	561.079	201.786	-107.823
5,6	-1190.52 μ 397.03i	651.223 μ 1528.62i	618.489 \pm 1184.55i	-1173.14 μ 233.853i	583.976 μ 1700.31i	1081.72 \pm 1127.6i
7,8	-234.767 μ 334.989i	65.1967 μ 101.842i	401.817 \pm 240.775i	-271.168 μ 389.05i	-20.639 μ 190.276i	-146.521 μ 455.077i
9,10	-76.3905 μ 868.514i	972.48 \pm 306.454i	-4739.82 \pm 741.711i	1711.77 μ 275.614i	-482.028 μ 755.658i	6157.46 μ 2456.84i
11,12	-15.0851 μ 119.337i	-102.854 \pm 65.2154i	-314.796 μ 285.899i	-67.1736 μ 134.877i	-48.5068 \pm 67.3809i	-391.255 μ 363.658i
13,14	3.03948 μ 1.95652i	-108.411 \pm 78.155i	-301.757 \pm 213.674i	-47.1187 μ 8.33842i	-55.1979 \pm 67.3888i	-373.846 \pm 141.348i
15,16	507.742 μ 136.907i	-126.487 \pm 309.104i	263.426 \pm 69.9732i	119.956 μ 41.8785i	475.813 \pm 66.3234i	-105.301 μ 232.446i
17,18	605.35 μ 29.4777i	-409.892 \pm 105.208i	-1.43262 \pm 115.254i	-258.042 μ 84.396i	1082.37 \pm 133.459i	-67.5078 μ 199.685i
19,20	606.311 μ 9.9896i	-150.238 μ 12.6183i	219.499 \pm 5.66263i	629.329 μ 7.10947i	-167.851 μ 16.1822i	263.578 \pm 11.7553i

Table 5 The real values derived from imaginary sols. and the maximum altered value for each position parameters.

Sols.	C_{1x}	C_{1y}	C_{1z}	B_x	B_y	B_z	$ \Delta Y _{max}$	$ \Delta Z _{max}$	$ \Delta \alpha _{max}$	$ \Delta \beta _{max}$	$ \Delta \gamma _{max}$
5,6	112.769	-158.873	-92.0455	98.4075	-145.493	-189.591	0.11	0.11	0.11	0.108	0.108
	203.066	-274.936	-102.607	189.051	-246.28	-88.6383					
7,8	-326.635	-155.677	-124.436	-418.595	-175.551	-627.043	0.02	0.0191	0.0191	0.0191	0.018
	-233.994	-110.473	-74.8811	-309.213	-120.731	-479.005					
9,10	-553.959	1776.21	-12101.7	1930.74	45.33	5746.36	0.0071	0.00601	0.004	0.004	0.004
	-482.977	1742.06	-12193.6	1965.09	75.7136	5871.87					
11,12	-89.8638	-128.666	-238.965	-148.744	-94.3477	-390.462	0.095	0.082	0.082	0.076	0.066
	6.51506	-231.132	-248.19	-33.7346	-192.631	-294.152					
13,14	-68.3681	-155.568	-252.832	-122.138	-119.746	-376.521	0.04	0.04	0.04	0.039	0.038
	-3.24211	-224.035	-250.597	-44.5496	-186.776	-308.842					
15,16	416.67	47.2998	110.756	269.29	250.088	-175.72	0.0075	0.0073	0.0062	0.0051	0.0051
	479.663	-102.479	140.735	343.851	116.427	1.47741					
17,18	580.225	-346.756	31.5032	-596.025	1620.99	-297.597	0.004	0.001	0.001	0	0
	607.025	-448.966	-85.6338	-361.99	1250.27	6.03713					
19,20	682.149	-220.277	345.811	703.196	-242.49	439.124	0.109	0.043	0.043	0.043	0.043
	703.26	-161.045	207.159	721.066	-180.116	288.532					

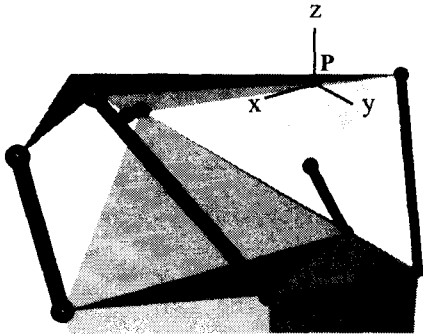


Fig. 6 The synthesized 5-SS mechanism.

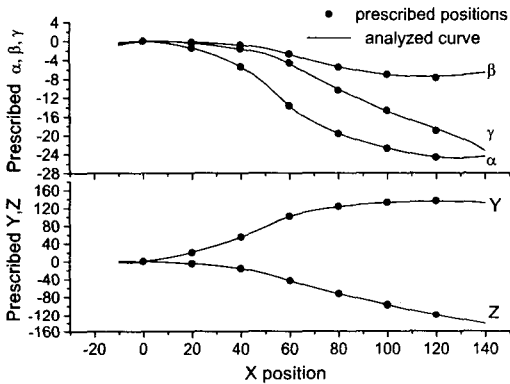


Fig. 7 Analysis of a 5-SS mechanism in Fig. 6.

5. 결론

본 논문에서는 정밀점 합성법에서의 기구학적 구속식의 허근을, 지정위치의 미세 변경을 통해 실수화 함으로써 실제 기구로의 구현을 가능하게 하는 방법을 제시하였다. 또한 이를 평면 4절 경로생성기와 공간 7절 운동생성기의 합성문제에 적용하여 허근으로부터 구현에 적절한 기구들을 유도함으로써 그 타당성을 확인하였다. 제시된 방법은, 소거법 등과 같이 기구학적 구속식으로 형성되는 비선형 연립다항식의 모든 해를 찾아주는 방법과 함께 사용됨으로써, 합성된 기구의 선택의 폭을 넓혀 줌과 동시에, 민감도 해석-설계와 기구최적화의 유용한 초기값을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Raghavan, M., and Roth, B., "Solving Polynomial Systems for the Kinematic Analysis and Synthesis of Mechanisms and Robot manipulator," *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 117, pp. 71~79, 1995.
2. Morgan, A. P., and Wampler, C. W., "Solving a Planar Four-Bar Design Problem Using Continuation," *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 112, No. 4, pp. 544~550, 1990.
3. 이태영, 심재경, "기어 5절 함수발생장치와 4절 링크 경로발생장치의 설계," 대한기계학회 추계 학술대회 논문집 A, pp. 954~961, 1996.
4. Erdman, A. G., ed., *Modern Kinematics : Developments in the Last forty Years*, New York, John wiley & Sons, Inc., pp. 451~470, 1993.
5. Innocenti, C., "Polynomial Solution of the Spatial Burmester Problems," *Proceedings of the 23rd ASME Mechanisms Conference*, DE-Vol. 70, pp. 161~166, 1994.
6. 이태영, 심재경, "5-SS 공간 7절 운동생성기 합성을 위한 대수적 소거 알고리즘의 개발과 구현," 대한기계학회 논문집 A 권, 제 24 권 제 1 호, pp. 225~231, 2000.