

텐던 구동 로봇 메커니즘의 일반화된 그래프 표현

Generalized Graph Representation of Tendon Driven Robot Mechanism

조 영 수¹, 정 주 노[†], 김 두 형²

Youngsu Cho¹, Joono Cheong[†], Doohyung Kim²

Abstract Tendon driven robot mechanisms have many advantages such as allowing miniaturization and light-weight designs and/or enhancing flexibility in the design of structures. When designing or analyzing tendon driven mechanisms, it is important to determine how the tendons should be connected and whether the designed mechanism is easily controllable. Graph representation is useful to view and analyze such tendon driven mechanisms that are complicatedly interconnected between mechanical elements. In this paper, we propose a method of generalized graph representation that provides us with an intuitive analysis tool not only for tendon driven manipulators, but also various other kinds of mechanical systems which are combined with tendons. This method leads us to easily obtain structure matrix – which is the one of the most important steps in analyzing tendon driven mechanisms.

Keywords: Tendon Driven Mechanism, Graph Representation, Structure Matrix

1. 서 론

텐던 구동 로봇은 텐던을 이용하여 구동시키는 메커니즘으로서 구동기와 회전축이 분리되어 있다. 일반적으로 메커니즘을 소형화 시킬 때, 회전축에 붙어있는 모터의 크기가 작아져야 할 필요가 있다. 그러나 소형 모터는 원하는 힘을 만족할 수 없을 뿐만 아니라 소형화함에 있어 한계가 있다. 반면 텐던 구동 메커니즘은 구동기가 기저 또는 링크의 시작 부분에 배치되어 관성이 작아지고, 일반 메커니즘과 달리 구조가 소형화됨에 따라 모터 또한 소형화 될 필요가 없기 때문에 원하는 힘을 충분히 공급할 수 있다^[1]. 아울러 모터의 크기를 고려하지 않아도 되기 때문에 몸체

를 소형화시키기 유리하다. 텐던 구동 메커니즘은 위와 같은 장점이 있지만 단점 또한 있다. 와이어가 원하는 방향으로 원활히 움직이게 하려면 고려할 사항이 많아 설계의 어려움이 있고, 끊어짐 늘어짐 찾기 때문에 유지보수가 어렵다는 단점이 있다.

보통 와이어 구동은 단일 방향으로만 제어할 수 있는 요소로 관절 수 보다 많은 수의 구동기를 필요로 한다. 그리고 관절 수 보다 많은 구동기와 연결 토폴로지를 통하여 관절의 회전각도 뿐만 아니라 부수적인 힘 제어까지 가능하기 때문에 원하는 목적에 맞는 메커니즘을 설계할 수 있는 특징을 갖는다^[1]. 이러한 이유로 여러 종류의 로봇 설계에 있어서 텐던 기반 구조를 적용하였다. 대표적으로 DLR hand^[2], Shadow hand^[3]를 들 수 있으며, 이들은 구조적으로 매우 정교하고 안정적인 로봇 손이다. 텐던 구동 머니플레터는 소형화가 가능하여 관성이 작아질 수 있고, 텐던의 물질 탄성에 의한 유연성 때문에 로봇-인간의 안전한 공동 작업에 활용할 수 있다. 또한 상기 이유로 가상현실/수술

Received : May 8, 2014; Reviewed : Jun. 11, 2014; Accepted : Jul. 4, 2014

※ This work was supported by government funding research program funded by Korea Research Council for Industrial Science & Technology (ISTK).

¹ Control & Instrumentation Engineering, Korea University (youngsucho@korea.ac.kr)

² Korea Institute of Machinery and Materials(kdh649@kimm.re.kr)

[†] Corresponding author: Control & Instrumentation Engineering, Korea University, Sejong-City (jincheong@korea.ac.kr)

시뮬레이터 기구인 햅틱장치^[45]에도 적용이 가능하다. 또 사람의 신체능력을 향상시키기 위해 개발한 외골격(exoskeleton)은 인간의 신체와 함께 움직이기 때문에 힘을 전달하는 것이 중요하지만 유연할 필요가 있다. 재활을 위한 외골격 로봇 KINARM^[6]도 마찬가지이다. Da Vinci 수술용 기구^[7]는 텐던으로 구동되는 얇은 샤프트를 움직여서 수술하도록 설계되어 있으며 유연하기 때문에 안전한 수술이 가능하며 절개 범위가 줄어들어 회복이 빠르다는 장점이 있다. 또 인간 모사로봇인 ECCE robot^[8]은 인간의 근육을 모방하여 만들어진 로봇이다. 적응형 평행사변형구조를 연속적으로 연결하고 텐던을 통해 전체 형상을 만들어 내는 예도 찾아 볼 수 있다^[9].

이러한 각종 머니플레이터의 복잡한 텐던 연결에 대한 기구학과 동역학을 해석하기 위해서는 관절과 텐던의 이동거리, 관절 토크와 텐던의 장력과의 관계를 아는 것이 중요하다. 이러한 관계는 기구학적 구조행렬을 통하여 수학적으로 알 수 있고 이 구조행렬을 직관적으로 얻을 수 있는 그래프 표현이 유용하다. J.J. Lee^[11]는 이러한 베벨 기어에 적용하는 그래프 표현법을 텐던 기반 머니플레이터에 적용하여 기구학적 분석을 하였고, Uyuguroglu와 Demirel^[10]은 oriented 그래프 표현을 텐던 기반 머니플레이터의 기구학 분석에 적용하였다. 이외에도 각종 그래프 표현은 대상이 되는 토폴로지를 시각화하여 유저에게 제공하는 장점을 제공한다^[11].

본 논문에서는 Lee가 사용한 그래프 표현 기법을 일반화하여 유용한 그래프 표현 방법을 제안한다. Lee가 제시한 기존의 그래프 표현 방법은 단순히 텐던 연결 방식에 집중하였을 뿐, 직접 구동기가 포함된 다자유도 시스템은 그래프 표현으로 표현할 수 없었다. 본 논문의 첫 번째 기여는, 다양한 종류의 텐던 혹은 일반적인 메커니즘(tendon-driven, non-tendon driven, hybrid-driven)에 적용할 수 있는 일반적인 확장 그래프 표현방법의 제시이다. 단순히 텐던의 연결 방식만이 아닌 직접 구동기에 의한 관절까지 표현함으로써 전체적인 시스템을 통합하여 해석할 수 있다는 장점이 있다. 두번째는 이를 통해 가제어성을 확인할 수 있는 구조행렬을 손쉽게 계산하도록 한 것이다. 마지막으로, 제안하는 그래프 표현을 활용하여 잘 알려진 텐던 기반 머니플레이터 해석에 적용함으로써 편리성과 직관성

을 확보한 것이다.

2. 확장 그래프 표현과 텐던 연결 토폴로지 행렬

2.1 텐던구동 시스템을 위한 확장 그래프 표현법

그래프 표현법은 기본적으로 폴리와 강체 막대를 링크로 하여 점으로 표현하고, 얇은 선을 회전쌍(turning pair, revolute joint)으로 표현한다. 원형기호(○)는 폴리와 링크 등 독립적인 강체를 의미한다. 폴리 j 와 강체 막대 k 는 b 라는 회전쌍에 연결되어 있으므로 $i-k$, $j-k$ 는 얇은 선(—)으로 연결을 하고 얇은 선에 회전쌍(axes a and b)을 인덱스로 써준다. 폴리들을 연결시켜주는 텐던은 그 연결방식에 따라 두 가지 형태의 선으로 연결을 하는데, 연결된 폴리간의 회전 방향을 바꾸는 교차형은 두꺼운 선(≡)으로 연결하고, 평행한 연결은 이중선으로 연결한다(⇔). Fig. 1은 교차형 연결, 평행 연결, 그리고 직접적 구동기를 연결한 방식에 대한 그래프 표현 방법을 보이고 있다. 폴리 i 와 강체 링크 k 는 a 라는 회전쌍에 연결되어있고, 폴리 j 와 강체 링크 k 는 b 라는 회전쌍에 연결되어 있다. Fig. 1(a)는 $i-j$ 가 교차형으로 연결되어 있으므로 그래프에서 가는선으로, Fig. 1(b)는 $i-j$ 가 평행한 연결을 가지므로 그래프에서 이중선으로 연결된다. Fig. 1(c)는 링크 k 와 링크 j 가 a 라는 회전쌍에 연결되어 있고, 해당 회전쌍에 배치된 구동기 m 의 회전은 곧 링크 j 의 회전과 같으므로 이중선으로 연결한다. 제안하는 형태의 그래프 표현은 각종 텐던구동 혹은 텐던구동과 직접구동이 혼합된 형태의 로봇머니플레이터 및 메커니즘에 합당하게 적용될 수 있다.

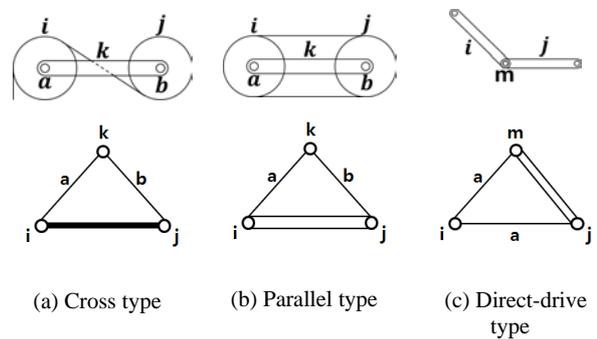


Fig. 1. Examples of generalized graph representation

2.2 텐던 연결 토폴로지 행렬

텐던 연결 토폴로지 행렬은 텐던 기반 머니플레이터에서 텐던 연결 방식에 따라서 결정되는 행렬로서, 이것은 텐던의 움직임과 머니플레이터의 관절 움직임의 관계를 보여줄 뿐만 아니라 해당 머니플레이터의 텐던 연결 구조에 의해 시스템의 가제어성에 관한 정보까지 포함하고 있는 중요한 행렬이다.

텐던 연결 토폴로지 행렬을 좀 더 쉽게 이해하기 위해서, 참고문헌 [1]의 기본적인 예제를 이용해 적용해 보도록 하자. 우선 앞의 Fig. 1(a)와 (b)의 경우에서 항상 만족하는 기구적 수식은 아래와 같다.

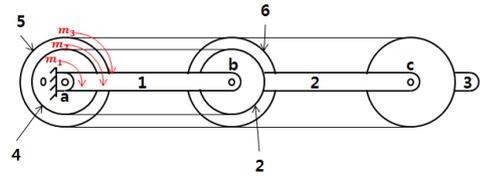
$$r_i \theta_{i,k} = \pm r_j \theta_{j,k} \quad (1)$$

여기서 r_i, r_j 는 각각 풀리 i, j 의 반지름 값이고, $\theta_{i,k}$, $\theta_{j,k}$ 는 각각 k 에 대한 i 의 상대회전, k 에 대한 j 의 상대회전을 나타낸다. 이는 텐던의 움직임 거리는 각 풀리에서의 텐던 이동거리와 같다는 가정에 의한 식이다. 식(1)에서 +값은 평행연결, -값은 교차연결 상황에 해당된다. 또 $\theta_{i,j}$ 는 i 에 대한 j 의 상대회전을 의미하며 다음처럼 기술된다.

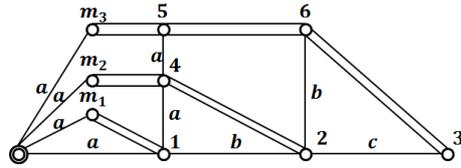
$$\theta_{j,i} = \theta_{j,k} - \theta_{i,k} \quad (2)$$

위의 두 식을 이용하여 Fig. 2에서 나타내고 있는 3링크를 갖는 로봇 머니플레이터의 텐던입력과 로봇의 관절각도와 의 관계식을 유도해 보자. 해당 로봇은 한 개의 축 a 에 모여있는 3개의 모터 (m_1, m_2, m_3)가 각각 링크 1, 풀리 4, 풀리 5를 구동시키고 있다. 풀리 5, 풀리 6, 그리고 풀리 3(링크 3과 동일)은 평행연결로 묶여있고, 풀리 4와 풀리 2(링크 2와 동일)도 역시 평행연결로 묶여 있다. 링크 1은 m_1 에 의해 직접 구동되고 있다. 해당 상황에서 로봇의 링크 회전각도 ($\theta_{1,0}, \theta_{2,1}, \theta_{3,2}$)와 모터회전 입력 ($\theta_{1,0}, \theta_{0,4}, \theta_{5,0}$) 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_{1,0} &= \theta_{1,0} \\ \theta_{4,0} &= \theta_{1,0} + (r_2 / r_4) \theta_{2,1} \\ \theta_{5,0} &= \theta_{1,0} + (r_6 / r_5) \theta_{2,1} + (r_3 / r_5) \theta_{3,2} \end{aligned}$$



(a) Manipulator structure



(b) Graph representation

Fig. 2. 3-Link tendon driven manipulator and its graph representation

이는 다음의 행렬로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \theta_{1,0} \\ \theta_{4,0} \\ \theta_{5,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & r_2 / r_4 & 0 \\ 1 & r_6 / r_5 & r_3 / r_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{1,0} \\ \theta_{2,1} \\ \theta_{3,2} \end{bmatrix}$$

이 식을 일반적으로 표현하면 다음과 같다.

$$S = A\theta \quad (3)$$

여기서 S 는 텐던의 이동을 발생시키는 모터입력 벡터이며, θ 는 로봇 머니플레이터의 관절변위에 대한 벡터이다. 위에서 만약 $r_4 = r_5, r_2 = r_6$ 이라면 다음식이 만족이 된다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & r_2 / r_4 & 0 \\ 1 & r_6 / r_5 & r_3 / r_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 / r_4 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 / r_5 \end{bmatrix}$$

이는 간략하게 다음처럼 표현될 수 있다

$$A = BR \quad (4)$$

여기서 B 는 텐던 연결 토폴로지 행렬이고, R 은 단순히 풀리의 반지름 정보만을 담고 있는 대각행렬이다. 행렬 R 은 양의 대각행렬이므로 언제나 역행렬이 존재한다. 따라서 행렬 B 만을 고려하면 해당 텐던 기반 머니플레이터의 특성을 파악할 수 있게 된다.

앞서 3링크 로봇의 예시에서는 수식적 전개를 통하여 텐던 연결 토폴로지 행렬을 획득하였으나, 그래프 표현을 이용하면 이런 수식에 의존하지 않고 텐던 연결 토폴로지 행렬을 용이하게 얻을 수 있다. 각 회전축에서의 풀리의 반지름이 같은 경우, 앞서 제시된 바와 같이 텐던 연결 토폴로지 행렬 B 와 풀리의 크기 비율 행렬 R 이 분리된 형태로 얻어질 수 있다. 예를 들어, Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 회전되는 로봇 링크(강체 막대)를 기준으로 구간을 나누고 각 구동기에 의해 연결되어 있는 풀리에 대하여 연결 형태에 따라 0, 1, -1로 표현하면 텐던 연결 토폴로지 행렬을 손쉽게 얻을 수 있다. 연결되어 있지 않은 경우에는 0을, 평행 연결인 경우에는 1을, 교차형 연결인 경우 -1을 부여한다. 이러한 방식으로 B 행렬을 분리하게 되면 0, 1, -1의 조합으로 구성된 행렬을 얻게 되므로, 구조를 파악하는데 효과적이다. 비록 일반적인 경우에는 각 회전축에서의 풀리의 반지름이 서로 다르므로 이와 같이 B 행렬을 분리할 수 없지만, 텐던 연결 방식에 따른 제어가능성 등을 논할 때에는 각 풀리의 반지름이 동일하다고 가정하여 텐던 연결 토폴로지 행렬 B 만을 해석하여도 무방하다.

만약 기구학적 분석을 위한 목적이라면 정확한 기구학적 구조행렬 A 를 얻을 필요가 있으므로, A 를 구하는 일반적인 방법에 대해 소개하고자 한다. 기구학적 구조행렬 A 는 텐던 연결 토폴로지 행렬의 형태를 따른다고 할 수 있다. 다만 식(1), (2)와 같이 입력단의 회전에 의한 길이변화는 다른 풀리와 링크의 회전에 의한 길이변화 합과 같기 때문에 각각의 풀리, 링크회전 각도는 풀리의 반지름이 곱해진다. 따라서 입력단 회전각도에 대한 기구학적 구조행렬을 얻을 경우, 행렬의 각 열의 분자는 해당 풀리의 반지름을 쓰고, 분모에는 입력단 풀리의 반지름이 쓰여지면 된다. 예를 들어, 앞의 3링크 머니플레이터의 경우, 텐던 연결 토폴로지 행렬의 3번째 열은 $[1 \ 1 \ 1]$ 이고, 기구학적 구조행렬의 3번째 열은 $[r_5/r_{m_3}, r_6/r_{m_3}, r_3/r_{m_3}]$ 가 되게 된다. 여기서 풀리 5는 구동기 m_3 에 직접적으로 연결되어있기 때문에 $\theta_{0,m_3} = \theta_{0,5}$ 으로 표현이 가능하며, $r_{m_3} = r_5$ 이다. 따라서 $[1, r_6/r_5, r_3/r_5]$ 와 같은 결과를 쉽게 얻을 수 있다.

앞의 예제는 2개의 텐던과 직접 구동기에 의해 동작하는 3자유도 시스템으로서, 이것은 대표적인 텐던 구동방식

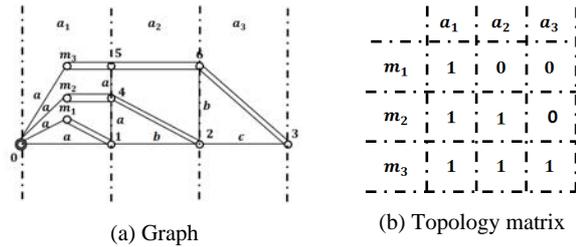


Fig. 3. Graph and topology matrix for a 3-Link tendon driven manipulator

과 직접구동 방식의 머니플레이터가 혼합된 형태라 할 수 있습니다. Lee가 제안한 그래프 표현의 경우 텐던의 연결에만 관심을 가졌기 때문에 전체적인 시스템을 표현하지 못한다. 따라서 Lee의 그래프 표현방법으로는 적절한 구조 행렬을 직관적으로 구할 수 없다. 반면 제안하는 일반화된 그래프 방식으로는 구동기를 표현할 수 있으므로 전체적인 시스템을 그래프로 표현가능하며, 결국 시스템의 구조 행렬 또한 얻을 수 있게 된다.

2.3 구동기 수에 따른 구조

N-자유도의 텐던 기반 머니플레이터는 대부분 N개에서 2N개의 텐던으로 구동될 수 있다. 그 중에서도 N, N+1, 그리고 2N개의 텐던으로 구성된 경우가 특히 주목할 만 하다. N구조는 N개의 텐던(N개의 구동기)을 이용하여 N자유도를 구동시키는 1 대 1 시스템이며, 폐곡선형 텐던에 의해서 양방향 무한 (endless) 회전이 가능하게 된다. N+1구조는 N+1개의 끌어당기는 텐던만으로 구동되는 (open-ended) 시스템으로서 이때 텐던의 끌어당기는 조합을 써서 N개의 머니플레이터 관절을 구동시킨다. 끌어당기는 힘만을 제공하는 텐던구동에서는 N+1개의 텐던이 N관절을 구동시키는 최소 텐던 수가 된다. N+1개보다 많은 수의 텐던을 써서 N 관절을 구동시킨다면 잉여의 입력 자유도가 존재할 수 있으므로, 많은 수의 다양한 텐던 조합으로 동일한 로봇 머니플레이터의 관절운동을 발생시킬 수 있다.

각각의 경우에 대하여 텐던을 당기는 힘 F 와 관절에 작용하는 토크를 τ 라 할 때, 가상일 조건을 적용하면 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\tau = A^T F \tag{5}$$

N구조는 여유자유도가 없기 때문에 원하는 토크에 대한 텐던 입력은 단순히 다음과 같은 관계를 가진다.

$$F = A^{-T}\tau \quad (6)$$

이러한 N구조의 경우 장력을 조절해 줄 수 없기 때문에 원하는 토크를 제어할 수 없다. 당기는 힘으로 구동되는 open-ended N+1 구조의 경우 여유자유도가 역시 존재하지 않는다. 다만 수학적으로 유일한 F의 해가 존재하지 않고 다음처럼 1차원의 homogeneous 해 f_h 를 가진다^[2].

$$F = (A^T)^\dagger \tau + \lambda f_h \quad (7)$$

여기서 $(A^T)^\dagger$ 는 A^T 의 유사 역행렬이다. 위 해에서 f_h 의 각 원소가 같은 부호를 가져야만 합당한 open-ended N+1구조가 된다. (그 이유는 텐던이 한 방향으로 밖에 제어할 수 없기 때문이다.) 만약 N+1구조에서 무한궤도 방식의 연결 구조와 혼합된 형태를 가진다면 f_h 의 원소 중, 무한궤도 방식의 연결구조에 의해 입력되는 힘의 원소를 제외한 나머지 원소가 모두 같은 부호를 가져야 한다. 그 이유는, 무한궤도는 양방향 제어가 가능하기 때문이다. 마지막으로, N+1보다 많은 수의 텐던을 통한 open-ended 구조의 경우에는 homogeneous 해를 구성하는 기저 벡터가 여러 개가 될 수 있다^[13]. 중요한 것은 이때에도 역시 homogeneous 해의 모든 원소가 동일한 부호를 가져야 한다.

N+1의 구조에 대한 텐던 기반 머니플레이터는 텐던이 언제나 잡아당기는 양의 값을 가져야 안정한 구조를 유지할 수 있다. 따라서 식(7)에서 적절한 λ 를 정의하여 언제나 텐던의 장력이 양의 값을 유지하도록 할 필요가 있다. 만약 λ 를 다음과 같이 정의한다면,

$$\lambda = \max_j \left\{ \frac{-(A^T)^\dagger_j \tau}{h_j} \right\} \quad (8)$$

여기서 $()_j$ 는 j번째 low를 의미한다. (단 구동기가 직접 연결된 경우나 무한궤도로 연결된 경우에 대한 열은 제외한다.) 이 값은 모든 장력이 0이상인 되기 위한 최소 λ 를 의미한다. 이와 마찬가지로 N+1 이상의 구조에 대해서 모

든 장력이 0 이상인 최적화 해를 찾아야 한다.

3. 확장 그래프를 이용한 텐던 머니플레이터 해석

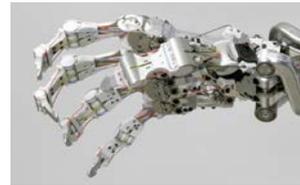
위와 같이 소개한 그래프 표현법을 이용하여 주목할 만한 텐던 기반 머니플레이터들의 해석에 적용하고, 이를 통해 텐던 연결 토폴로지 행렬을 얻는 과정을 예시하고자 한다.

3.1 DLR hand

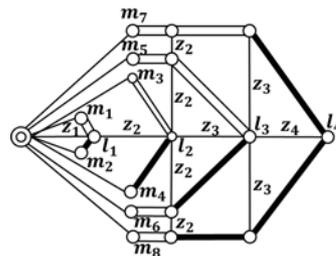
Fig. 4(a)는 독일의 DLR hand^[2]를 보여주고 있는데, 각 손가락은 2N개의 텐던으로 구동되고, 각각의 관절은 두 개의 텐던의 당김을 통해서 제어가 된다. Fig. 4(b)는 DLR hand의 하나의 손가락에 대한 그래프 표현이다. Fig. 4(b)를 통해서 텐던 연결 토폴로지 행렬은 다음과 같이 얻어지게 된다.

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 텐던 연결 토폴로지 행렬 B는 4개의 랭크를 갖게 되며, 식 (7)과 마찬가지로 homogeneous 해를 만드는 4개의 기저 벡터를 생성한다.



(a) DLR hand



(b) Graph of a finger

Fig. 4. DLR hand and graph representation for its finger

3.2 Whole Arm Manipulator (WAM)^[14]

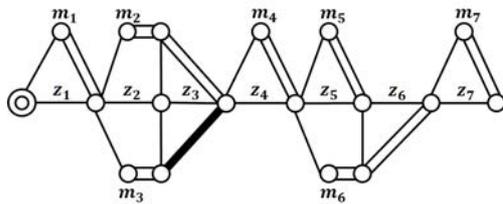
Fig. 5(a)는 WAM 로봇팔을 보여 주고 있으며, N개의 endless 텐던에 의해 제어가 된다. Fig. 5(b)는 이것의 그래프 표현이다. Fig. 5(b)를 통해 텐던 연결 토폴로지 행렬은 다음과 같이 얻어지게 된다.

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

그래프에서 보는 바와 같이 m_2 와 m_3 는 서로의 조합을 써서 어깨부분의 롤 피치 운동을 발생시키며, 유사하게 손목 부위에서도 m_5 와 m_6 의 구동 조합에 의해 롤 피치가 가능하게 된다. WAM의 경우 endless 텐던 구동이므로 구동기와 로봇 관절의 운동이 1 대 1로 연결되며 추가적인 자유도는 없다.



(a) Whole Arm Manipulator(WAM)



(b) Graph

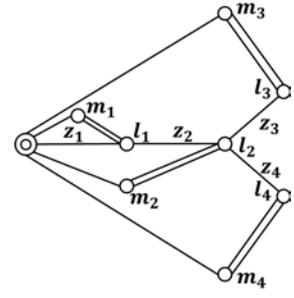
Fig. 5. WAM and its graph

3.3 다빈치 로봇수술 기구

Fig. 6(a)는 다빈치 수술로봇[7]의 수술 기구부로서, 내부를 살펴보면 4개의 endless방식 텐던에 의해 제어가 된다. 이 수술 기구의 텐던들은 수술기구 내부에서 서로 couple



(a) DaVinci Robot



(b) Graph

[Fig 6] DaVinci surgical robot and its graph

되지 않고 단순하게 연결되어 있어서 Fig. 6(b)와 같은 단순한 그래프로 표현된다. 그리고 Fig. 6(b)를 통해 텐던 연결 토폴로지 행렬은 다음과 같이 얻어지게 된다.

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. 결 론

본 논문에서는 텐던기반 로봇 머니플레이터 및 메커니즘을 해석할 수 있는 확장된 형태의 텐던 그래프를 제안하였고, 해당 메커니즘의 기구 운동해석에 용이한 텐던 연결 토폴로지 행렬을 구하는 일반적인 방법도 소개하였다. 이 텐던 그래프는 복잡한 텐던 시스템을 직관적으로 설계하고 해석할 수 있도록 도와준다. 각 예제를 통해서 이런 텐던 그래프의 편리성과 직관성을 파악할 수 있었으며 텐던 연결 토폴로지 행렬도 직관적으로 얻을 수 있었다.

References

[1] J.J. Lee, "Tendon-Driven Manipulators: Analysis, Synthesis, and Control", Ph.D. Thesis, University of Maryland, 1991.
 [2] M. Gredenstein and P. van der Smagt, "Antagonism for a Highly Anthropomorphic Hand-Arm System", Advanced Robotics, 22, pp.39-55, 2008.
 [3] P. Tuffield and H. Elias, "The Shadow robot mimics

- human actions”, Industrial robot: an international journal, 2003
- [4] A.M. Tahmasebi, B. Taati, F. Mobasser and K. Hashtrudi-Zaad, “Dynamic parameter identification and analysis of a PHANToM haptic device”, Proc. IEEE Conf. on Control Applications, 1251-1256, 2005.
- [5] B.-H. Kang, S.M. Yoon, M. C. Lee and C.-Y. Kim, “Development of low-inertia master device for haptic system configuration of surgical robot,” Journal of Korea Robotics Society, 7, pp. 267-275, 2012.
- [6] S.J. Ball, “Novel robotic mechanisms for upper-limb rehabilitation and assessment”, Ph.D. Thesis, Queen’s University, 2008.
- [7] J.R. Steger, C.R. Gerbi, G.M. Prisco, and W. Rogers, “Curbed cannula instrument”, US Patent 12/618, 608.
- [8] V. Potkonjak, B. Svetozarevic, K. Jovanovic and O. Holland, “The Puller-Follower Control of Compliant and Noncompliant Antagonistic Tendon Drives in Robotic Systems”, International Journal of Advanced Robotics Systems, 2011.
- [9] H.-S. Yoon, J.Y. Choi, S.M. Oh, B.-J. Yi, H.S. Yoon, Y.-J Cho, “Implementation of a spring backboned soft arm emulating human gestures,” Journal of Korea Robotics Society, 7, pp.65-75, 2012.
- [10] M. Uyguroğlu and H. Demirel, “Kinematic analysis of tendon-driven robotic mechanisms using oriented graphs”, Acta Mechanica, 182, pp.265-277, 2006.
- [11] B.G. Seo, Y. Choe, H. C. Roh and M. J. Chung, “Graph-based segmentation for scene understanding of an autonomous vehicle in urban environment,” Journal of Korea Robotics Society, 9, pp.1-10, 2014.
- [12] G. Golumb and W. Kahan, “Calculating the singular values and pseudo-inverse of a matrix”, SIAM Numer. Anal., B2, pp.205-224, 1965.
- [13] J. Lee, J. Kim, J. Lee, D.-H. Kim, H.-K. Lim, and S.-H. Ryu, “Inverse kinematics solution and optimal motion planning for industrial robots with redundancy,” Journal of Korea Robotics Society, 7, pp.35-44, 2012.
- [14] http://www.barrett.com/robot/DS_WAM.pdf



조영수

2011 고려대학교 제어계측공학과 학사
 2013 고려대학교 제어계측공학과 석사
 2013~현재 고려대학교 제어계측공학과 박사과정

관심분야: 텐던구동 메커니즘



정주노

1995 포항공과대학교 기계공학과 학사
 1997 포항공과대학교 기계공학과 석사
 2003 포항공과대학교 기계공학과 박사

2009~현재 고려대학교 제어계측공학과 부교수
 관심분야: Robot manipulation, Grasping, Flexible robot systems, 텐던구동 메커니즘



김두형

1990 한국과학기술원 생산공학과 석사
 2003 한국과학기술원 기계공학과 박사
 1982~현재 한국기계연구원 책임연구원

관심분야: Robot 메커니즘 analysis & design