

Cable Array Robot 시스템 설계

신동목^{1,†} · 이연암²
울산대학교 조선해양공학부¹
STX 조선해양²

Design of a Cable Array Robot System

Dongmok Sheen^{1,†} · Youn-Am Lee²
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan¹
STX Offshore & Shipbuilding Co., Ltd.²

Abstract

Loading/unloading at sea is necessitated as larger container ships are being used. It is also unavoidable to load/unload at sea during military operations. An experimental cable array robot system, which can be used for loading/unloading at sea, consisting of four cables operated by four motors is designed and built. Even though it has simple structure, it has a large pay-load/robot-weight ratio, flexibility and wide workspace and can be easily built at low cost. In order to plan and control the paths of end-effector, two interpolation methods are introduced and compared. Since the robot is entirely based on cable tension, an analysis of tension is also presented for monitoring and planning purpose.

Keywords : Cable array robot(케이블 로봇), Interpolation(보간), Cable tension(케이블 장력)

1. 서론

국제교역화물의 99.7%가 항만을 통해 수송되고 있는 우리나라에서(Mo, 2003) 효율적인 해상물동량 처리는 필수적이다. 그런데 최근의 컨테이너선의 대형화 추세에 따라 기존 항만에서 접안 문제로 최근 모바일 하버 등 해상 하역을 이용한 해결책들이 연구되고 있다. 또한 군경의 작전 시 해상에서 선박간 수송업무를 수행해야 하는 경우들이 발생한다. 본 연구에서는 이러한 배경하에 해상 하역에 활용할 수 있는 cable array robot 시스템을 개발하고자 한다.

Cable array robot은 wire robot 또는 tendon-based parallel manipulator라고도 불리우며(Bruckmann, et al., 2008), 복수의 케이블을 연동하여 end-effector의 운동을 제어하는 시스템으로 정의할 수 있다. Gorman 등은 3개의 cable을 사용하여 sliding-mode control을 이용하여 가변 질량이 변해도 경로제어를 할 수 있는 시스템을 발표했으며(Gorman, et al., 2001), Usher 등(Usher, et al., 2005)은 무인항공기 시뮬레이터용으로 4개의 cable을 사용한 시스템을 발표하였고 이어서 비전을 이용한 제어 시스템(Mejias, et al., 2006)과 연계한 연구를 발표하였다. Cable array robot은 케이블의 개수 및 형태가 다양하여 적게는 3개의 케이블을 이용한 경우(Gorman, et al., 2001)부터 12개의 케이블을 이용한 경우(Oh, et al., 2005)까지 다양하다. Cable array robot은 기구학적으로 일반 산업용 로봇 팔 구조에 비하여 설계가 간편하고 상대적으로 저가에 제작이 가능하며 대부분의 액추

에이터 및 구동 설비들을 로봇 팔 대신 고정 바닥면에 설치할 수 있어 로봇의 무게에 비해 상대적으로 큰 화물을 다룰 수 있다. 또한 선박의 운동에 따라 크레인 형태에서 나타나게 되는 진자운동을 억제하여 해상상태가 좋지 않을 때도 작업이 가능하다. 또한 여러 대의 cable array robot들을 조합하면 작업 공간을 연속적으로 넓힐 수 있다.

2. 시스템 구성

본 연구에서 개발하는 cable array robot은 Fig. 1과 같이 각 축에 설치된 모터 M_1, M_2, M_3, M_4 가 모터-풀리에 연결된 cable L_1, L_2, L_3, L_4 를 감거나 풀면서 cable 끝에 연결된 end-effector E의 운동을 제어한다. End-effector 및 가변 중량과 각 케이블의 장력이 힘의 평형을 이루고 있는 구조이며, 이론상 3개의 케이블로 end-effector의 위치를 제어할 수 있으나 직육면체 형태의 작업 영역을 갖기 위하여 4개의 케이블을 사용하였다.

2.1 H/W 구성

시스템의 하드웨어는 제어부와 기구부로 나눌 수 있다. 제어부는 PC, 제어기 그리고 서보드라이버로 구성이 되며, end-effector로는 전자석을 사용하고 있다(Fig. 2).

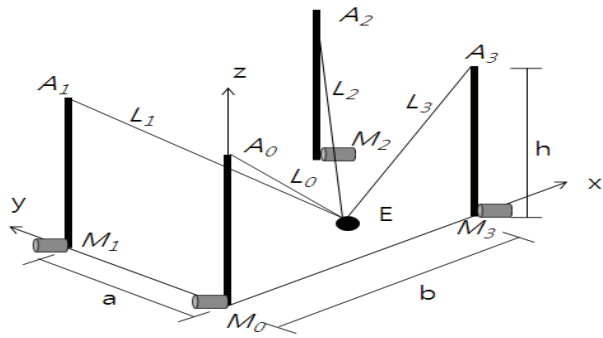


Fig. 1 Schematic diagram of a cable-array robot system

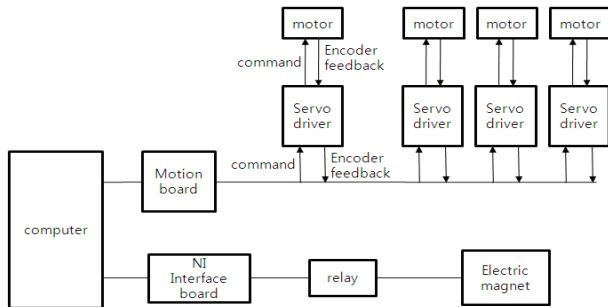


Fig. 2 H/W configuration of the system

기구부는 4개의 모터가 각각의 cable에 연결되어 end-effector를 제어할 수 있는 형태로 되어있으며 Fig. 3은 본 연구에서 개발한 시스템을 보여주고 있다. Fig. 3에서 원으로 표시된 부분이 모터가 설치된 곳이다. 6자유도 운동을 제어하기 위해서는 기본적으로 위치제어를 위한 3축과 end-effector의 자세제어를 위한 3축 총 6축이 필요하다. 본 시스템에서는 첫 단계로 4개의 케이블을 이용하여 위치제어를 수행하며, 자세제어는 end-effector에 부가 축들을 설치하여 수행할 계획이다.



Fig. 3 The experimental system

2.2 운영 S/W

시스템 운영을 위한 소프트웨어는 Fig. 4와 같이 구성하였다. 일련의 하역작업을 GUI를 통하여 지정하면 각각의 단위 하역작업에 대한 경로를 Planner에서 생성하고 이를 Executor가 실행하는 구조로 되어있다. 소프트웨어 모듈들은 마이크로소프트 비주얼 베이직과 LabView를 이용하여 개발하였다.

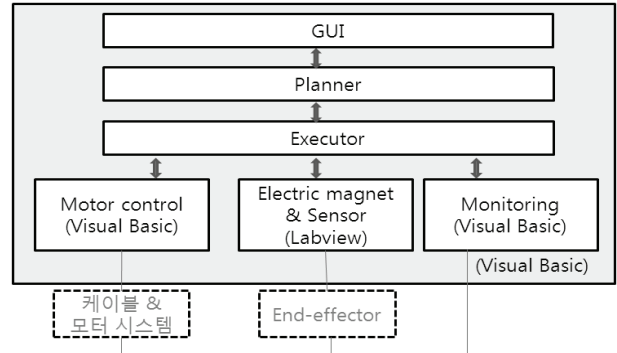


Fig. 4 Software structure

3. 시스템 모델링 및 제어

3.1 Interpolation

각각의 모터가 구동하는 cable은 모터에 부착된 엔코더를 이용하여 그 길이의 변화량을 측정할 수 있다. 실험 장치의 작업공간이 Fig. 1과 같을 때 end-effector의 위치 (x,y,z)에 대해 작업공간상에서 각 pole의 상단 $A_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 으로부터의 케이블의 길이 L_i 를 나타내면 식 (1)과 같다.

$$L_i^2 = (x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2 \quad (1)$$

여기서, 각 pole의 위치는 $A_0(0,0,h)$, $A_1(0,a,h)$, $A_2(b,a,h)$, $A_3(b,0,h)$ 이다. 식 (1)에 각 pole의 좌표값을 대입하면 각각의 케이블의 길이 L_0, L_1, L_2, L_3 는 다음과 같이 구해진다.

$$L_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - h)^2} \quad (2)$$

$$L_1 = \sqrt{x^2 + (y - a)^2 + (z - h)^2} \quad (3)$$

$$L_2 = \sqrt{(x - b)^2 + (y - a)^2 + (z - h)^2} \quad (4)$$

$$L_3 = \sqrt{(x - b)^2 + y^2 + (z - h)^2} \quad (5)$$

본 시스템에서 두 점간의 이동 경로를 직선 보간하여 제어하는 방법은 Fig. 5와 같이 두 가지가 가능하다. Fig. 5에서 G1, G2, G3, G4, H1, H2 등은 전달함수들이며, P_s, P_t는 각각 시작점과 종점을 나타내는 벡터, L_s, L_t는 end-effector가 각각 시작점과 종점에 있을 때 4개의 케이블 길이를 나타내는 벡터이다.

또한 $\delta P(k)$ 와 $\delta L(k)$ 는 각각 단위 시점에서 이동해야 할 위치 및 케이블 길이를 나타내는 벡터이다.

첫 번째 방법(Fig. 5(a))은 end-effector 좌표기준 직선보간 방법으로 end-effector의 시작점과 목표점의 좌표값을 기준으로 단위 시간 Δt 마다 좌표값 $(x(t), y(t), z(t))_{t=k\Delta t}$ 를 계산하여 이를 식 (2)~(5)의 케이블 길이로 환산하여 모터의 회전을 제어하는 것이며, 두 번째 방법(Fig. 5(b))은 케이블 길이 기준 직선 보간 방법으로 시작점과 종점에서의 각 케이블 길이를 계산한 후 Δt 시간마다 케이블 길이 $(L_0(t), L_1(t), L_2(t), L_3(t))_{t=k\Delta t}$ 를 계산하여 모터의 회전을 제어하는 것이다. 전자의 경우는 end-effector 위치를 기준으로 제어하므로 실제적인 경로 제어를 할 수 있으며, 후자의 경우는 상대적으로 제어가 단순하고 모터 제어기 제조업체의 동시 다축 모터 제어기의 보간 기능을 직접 사용할 수 있는 장점이 있다.

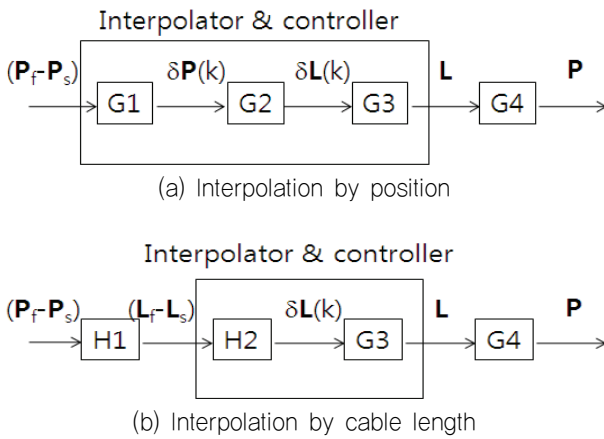


Fig. 5 Interpolation methods

3.1.1 좌표 기준 직선 보간

End-effector가 작업공간상의 시작점 $P_s(x_s, y_s, z_s)$ 에서 임의의 위치 $P_s(x_i, y_i, z_i)$ 로 이동할 때 직선보간을 하게 되면 각 축에 대한 속도 프로파일을 기준으로 각 시점 $t = k\Delta t$ 마다 end-effector 위치의 변화량 $(\delta x(k), \delta y(k), \delta z(k))$ 를 구할 수 있다. Fig. 6은 한 축에 대하여 사다리꼴 형태의 속도 프로파일을 보여준다. 그림에서 단위 시간 당 위치 변화량은 검은 색 칠한 부분 면적이며 전체 사다리꼴 면적은 하나의 축 방향 총 이동 거리가 된다. 가속구간에서는 식 (6), 등속구간에서는 식 (7)로 주어지며 감속구간은 가속구간과 유사하다. y, z 축도 같은 형태의 식으로 단위 시간당 이동량이 계산된다.

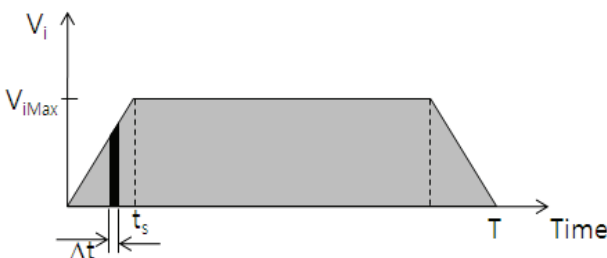


Fig. 6 Velocity profile

$$\delta x(k) = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{xmax}}{t_s} \right) (2k-1) \Delta t^2 \quad (6)$$

$$\delta x(k) = V_{xmax} \Delta t \quad (7)$$

실제 각 모터가 제어하는 것은 케이블의 길이이다. 각 단위 시간 당 케이블 길이 변화량은 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$\delta L_i = \frac{\partial L_i}{\partial x} \delta x + \frac{\partial L_i}{\partial y} \delta y + \frac{\partial L_i}{\partial z} \delta z \quad (8)$$

여기서, $i = 0, 1, 2, 3$ 이며 k 는 $k\Delta t$ 를 줄여 쓴 것이다. 따라서, 식 (2)~(5)에 식 (8)을 적용하면 각 시점에서 각 cable 길이의 변화량은 다음과 같다.

$$\delta L_0 = \frac{(x\delta x + y\delta y + (z-h)\delta z)}{\sqrt{x^2 + y^2 + (h-z)^2}} \quad (9)$$

$$\delta L_1 = \frac{(x\delta x + (y-a)\delta y + (z-h)\delta z)}{\sqrt{x^2 + (a-y)^2 + (h-z)^2}} \quad (10)$$

$$\delta L_2 = \frac{((x-b)\delta x + (y-a)\delta y + (z-h)\delta z)}{\sqrt{(b-x)^2 + (a-y)^2 + (h-z)^2}} \quad (11)$$

$$\delta L_3 = \frac{((x-b)\delta x + y\delta y + (z-h)\delta z)}{\sqrt{(b-x)^2 + y^2 + (h-z)^2}} \quad (12)$$

여기서 $(\delta x, \delta y, \delta z)$, (x, y, z) 는 시간 $t=k\Delta t$ 일 때, end-effector 위치 변화량 및 위치를 나타낸다.

3.1.2 케이블 길이 기준 직선 보간

케이블 길이를 기준으로 직선보간을 하게 되면 각 단위시간에서 각 케이블의 변화량은 속도 프로파일을 기준으로 각 단위시간 $k\Delta t$ 마다 케이블 길이의 변화량을 구할 수 있다. 각 케이블 길이 변화 속도 프로파일은 Fig. 6과 유사한 사다리꼴로 줄 수 있으며 이 때 각 케이블의 총 감긴 또는 풀린 길이는 전체 사다리꼴의 면적이 된다. 본 시스템에서 4개의 케이블 중 동시에 구동에 관여하는 케이블은 3개이며 먼저 end-effector 위치의 시간 당 변화량을 세 개의 구동 cable i, j, k 의 길이 변화량으로 나타내면 다음과 같다.

$$\delta x = \frac{\partial x}{\partial L_i} \delta L_i + \frac{\partial x}{\partial L_j} \delta L_j + \frac{\partial x}{\partial L_k} \delta L_k \quad (13)$$

$$\delta y = \frac{\partial y}{\partial L_i} \delta L_i + \frac{\partial y}{\partial L_j} \delta L_j + \frac{\partial y}{\partial L_k} \delta L_k \quad (14)$$

$$\delta z = \frac{\partial z}{\partial L_i} \delta L_i + \frac{\partial z}{\partial L_j} \delta L_j + \frac{\partial z}{\partial L_k} \delta L_k \quad (15)$$

여기서 $(\delta x, \delta y, \delta z)$, (x, y, z) 는 시간 $t=k\Delta t$ 일 때 end-effector 위치 변화량을 나타낸다. 한편, 각 단위시간 당 end-effector의 위치 (x, y, z) 는 3개의 케이블 길이로 표현할 수 있다. 만약 (L_0, L_1, L_2) 가 구동 케이블들의 길이라고 하면 케이블 길이에 따른 end-effector의 위치는 다음과 같다.

$$x = \frac{1}{2a}(L_1^2 - L_2^2 + b^2) \quad (16)$$

$$y = \frac{1}{2b}(L_0^2 - L_1^2 + a^2) \quad (17)$$

$$z = h - \sqrt{L_0^2 - x^2 - y^2} \quad (18)$$

식 (16)~(18)에 식 (13)~(15)를 적용하면 각 좌표값에서 cable의 길이의 변화에 따른 위치 변화량을 다음 식 (19)~(21)과 같이 계산할 수 있다.

식 (6), (7)과 식 (19)~(21)을 비교하면, 식 (6), (7)의 경우 δx , δy , δz 도 동일)가 케이블 길이와 무관하나 식 (19)~(21)과 같이 케이블 길이를 기준으로 보간을 할 경우 $(\delta x, \delta y, \delta z)$ 는 케이블 길이

$$\delta x = \frac{1}{a}(L_1 \delta L_1 - L_2 \delta L_2) \quad (19)$$

$$\delta y = \frac{1}{b}(L_0 \delta L_0 - L_1 \delta L_1) \quad (20)$$

$$\delta z = \frac{((1 - \frac{1}{2b^2}(L_0^2 - L_1^2 + b^2))L_0 \delta L_0 + (-\frac{1}{2a^2}(L_1^2 - L_2^2 + a^2) - \frac{1}{2b^2}(L_0^2 - L_1^2 + b^2))L_1 \delta L_1 + \frac{1}{2a^2}(L_1^2 - L_2^2 + a^2)L_2 \delta L_2)}{\sqrt{L_0^2 - \frac{1}{4a^2}(L_1^2 - L_2^2 + a^2) - \frac{1}{4b^2}(L_0^2 - L_1^2 + b^2)}} \quad (21)$$

3.2 케이블 장력 및 운동

각 모터에 필요한 토크, 케이블 허용 장력, 로봇의 기반하중 그리고 이를 기반으로 안전한 작업영역 등을 계산하기 위하여 본 시스템의 각 케이블에 걸리는 장력을 계산해 보았다. Fig. 8에서 각 케이블에 걸리는 장력 T_i 는 케이블의 질량과 인장을 무시할 때 식 (22)와 같은 관계를 갖는다.

여기서, 행렬의 각 열 (x_i, y_i, z_i) 는 케이블 i 방향의 단위 벡터이며, m 은 케이블에 달린 질량, a_x, a_y, a_z 는 각각 x, y, z 방향의 가속도를 나타낸다. 식 (22)는 4개의 케이블이 동시에 작동하는 경우를 나타내며 T_i 에 대한 해가 존재하지 않는다. 따라서

및 케이블변화율에 따라 비선형적으로 변한다. 따라서 케이블 길이를 기준으로 보간을 할 경우 정확한 경로 제어를 할 수 없다.

본 연구는 기반 연구 단계로서 상업용 다축 동시 모터제어기를 이용하여 케이블 길이 기준의 직선 보간법을 이용하였다. 따라서 이동 시 일정 부분의 경로 상 오차가 발생한다. Fig. 7은 케이블 길이 기준으로 x축 방향으로 직선 이동 시 시뮬레이션 한 결과를 보여준다. 세 가지 다른 이동길이에 대하여 100개의 지점에서의 오차를 나타낸다. 이동거리가 멀어질수록 그 z축 방향 처짐이 커지는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어 400mm의 거리이동 시 직선경로 기준 최대 오차가 10mm이상 되는 것을 알 수 있으며 이는 실제 시스템 구동을 통하여 확인할 수 있었다.

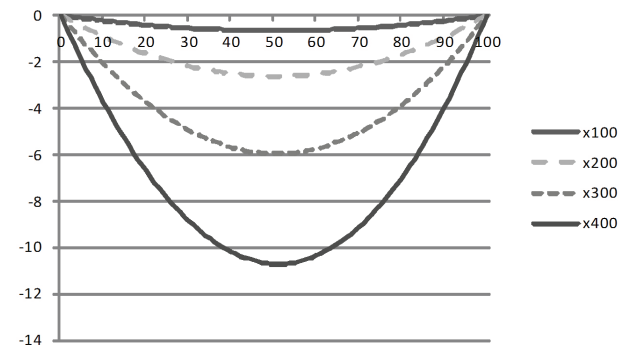


Fig. 7 The deviation from the straight line with the interpolator by cable length

end-effector 위치에 따라 3개의 케이블만을 작동시키도록 하며 이 경우 식 (23)과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & x_3 \\ y_0 & y_1 & y_2 & y_3 \\ z_0 & z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ma_x \\ ma_y \\ mg + ma_z \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} x_i & x_j & x_k \\ y_i & y_j & y_k \\ z_i & z_j & z_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ma_x \\ ma_y \\ mg + ma_z \end{bmatrix} \quad (23)$$

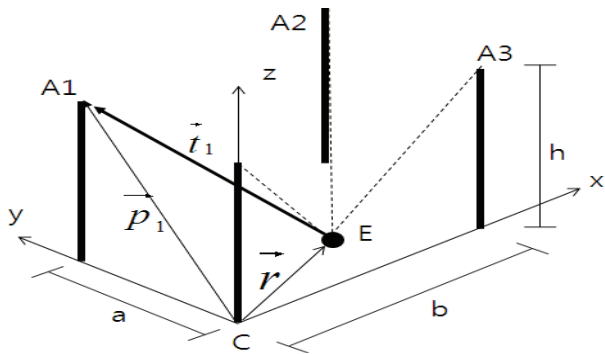


Fig. 8 Vectors used in calculating tensions

여기서, i, j, k 는 현 위치에서 작동하는 3개의 케이블을 나타낸다. 식 (23)으로부터 식 (24)와 같이 각 케이블에 걸리는 장력을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i & x_j & x_k \\ y_i & y_j & y_k \\ z_i & z_j & z_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} ma_x \\ ma_y \\ mg + ma_z \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서, 케이블 0의 방향 단위벡터는 Fig. 8을 참조하면 식 (25)~(27)로부터 식 (28)과 같이 구해진다.

$$\vec{t}_0 = \frac{\vec{p}_0 - \vec{r}_0}{\|\vec{p}_0 - \vec{r}_0\|} \quad (25)$$

$$\vec{r}_0 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\vec{p}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\vec{t}_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (h-z)^2}} \begin{bmatrix} -x \\ -y \\ h-z \end{bmatrix} \quad (28)$$

마찬가지 방법으로, 다른 케이블 방향 단위벡터는 식 (29)~(31)과 같이 구해진다.

$$\vec{t}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + (a-y)^2 + (h-z)^2}} \begin{bmatrix} -x \\ a-y \\ h-z \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\vec{t}_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{(b-x)^2 + (a-y)^2 + (h-z)^2}} \begin{bmatrix} b-x \\ a-y \\ h-z \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\vec{t}_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{(b-x)^2 + y^2 + (h-z)^2}} \begin{bmatrix} b-x \\ -y \\ h-z \end{bmatrix} \quad (31)$$

Fig. 9는 식 (24), (28)~(31)을 이용하여 두 점간 직선 이동 시 케이블 장력의 변화를 시뮬레이션하는 화면을 보여준다. 이를 이용하면 경로 계획 시 장력의 변화를 예측하여 운반 경로 상 예상되는 위험을 예측하고 경로 변경을 할 수 있다.

실제 배의 운동을 고려할 경우 xyz좌표계는 고정좌표계가 아니므로 이를 고려한 동역학적 분석이 행해져야 한다. Fig. 10에서 XwYwZw를 고정좌표계라 할 때 각 케이블 방향 벡터는 homogeneous 좌표계를 이용하여 식 (32)와 같이 구해진다. 여기서, 변환행렬 A의 열벡터 $\vec{o}, \vec{p}, \vec{q}$ 는 좌표계 XwYwZw에서 본 좌표계 xyz의 x, y, z 방향 단위벡터이며, 열벡터 \vec{c} 는 XwYwZw에서 본 xyz 좌표계 원점을 나타낸다.

$$\vec{t}'_i = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ 1 \end{bmatrix} = A \vec{t}_i = \begin{bmatrix} o_x & p_x & q_x & c_x \\ o_y & p_y & q_y & c_y \\ o_z & p_z & q_z & c_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

End-effector 및 화물의 가속도 \vec{a} 는 식 (33)과 같이 구해진다.

$$\vec{a} = \ddot{\vec{R}} + \vec{\omega} \times \vec{r} + \dot{\vec{\omega}} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + \vec{a}_{E/xyz} + 2\vec{\omega} \times \vec{v}_{E/xyz} \quad (33)$$

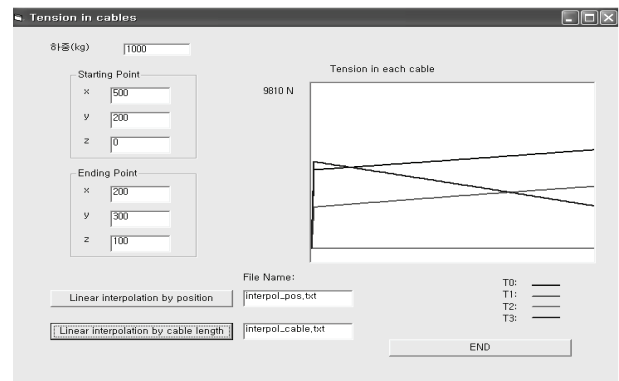


Fig. 9 GUI for analysis of tensions in cables

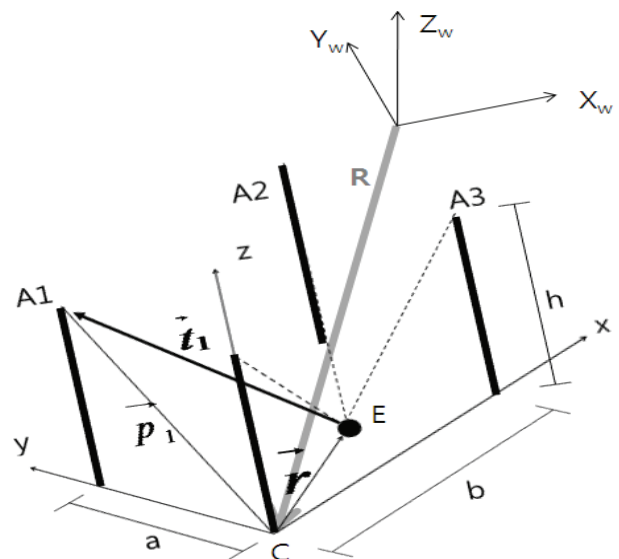


Fig. 10 Coordinate systems considering ship motion

식 (33)에서 $\ddot{\mathbf{R}}$ 은 좌표계 xyz 원점의 가속도, $\vec{\omega}, \dot{\vec{\omega}}$ 는 각각 좌표계 xyz의 회전 각속도 및 회전 각가속도를 의미하며 배의 운동에 따라 결정된다. 반면에 $\vec{v}_{E/xyz}, \vec{a}_{E/xyz}$ 는 end-effector 및 화물의 xyz좌표계에 대한 상대속도 및 상대 가속도항으로 케이블 구동에 따른 항이 된다. 따라서 실제 배의 운동을 고려하면 각 케이블에 걸리는 장력은 식 (34)와 같으며 이에 대한 자세한 분석은 향후 연구로 진행된다.

$$\begin{bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_i & x'_j & x'_k \\ y'_i & y'_j & y'_k \\ z'_i & z'_j & z'_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} ma_x \\ ma_y \\ mg + ma_z \end{bmatrix} \quad (34)$$

3.3 작업영역에 따른 구동모터

각 cable과 end-effector의 연결은 Fig. 10에 예시한 바와 같이 한 점에서 연결되어 있다. 공간 상 한 점은 독립적인 3개의 케이블 길이로 결정되므로 end-effector의 위치에 따라 4개의 모터 중 구동 모터 3개가 정해지게 된다. 또한 본 시스템의 경우 물리적으로도 하나의 케이블은 구동 케이블 역할을 할 수가 없다. 예를 들어 Fig. 11의 상황에서 M₀, M₁, M₂ 모터 또는 M₃, M₀, M₁ 모터를 이용할 경우 M₀에 연결된 케이블에 음의 장력이 걸려야만 하므로 물리적으로 불가능 하다. 따라서 Fig. 11에서와 같이 x-y 평면상에서 end-effector로 부터 가장 가까운 즉, 그림 상 원안에 들어오는 3개의 모터가 구동모터가 된다.

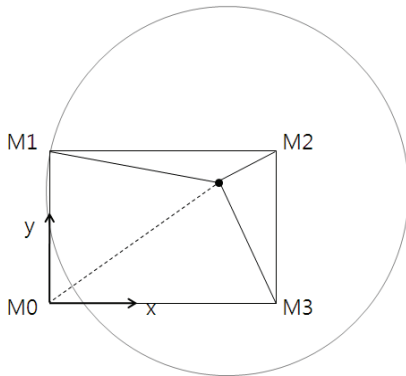


Fig. 11 The set of active motors at a position of end-effector

4. 결론

Cable array robot은 상대적으로 저가에 구현이 가능하고 자체 무게 대비 중하중의 물건을 다룰 수 있다. 또한 작업영역이 넓고 확장이 가능하며 설치가 간단하다는 장점이 있다. 본 논문에서는 해상 하역용으로 사용될 수 있는 cable array robot 의 기반 연구로서 4개의 cable를 이용한 cable array robot system을 설계하고 구현하였다.

로봇의 경로 제어를 위한 두 가지 직선 보간 방법을 제시하였으며, 그 중 케이블 길이를 기준으로 한 보간 방법을 구현하였다.

케이블은 장력만을 줄 수 있으므로 안전 작업범위 설정, 경로계획 및 모니터링에 사용할 수 있도록 케이블에 걸리는 장력을 분석하였다. 향후 end-effector 위치를 기준으로 하는 직선 보간 제어 시스템으로 대체하여 실질적인 경로 제어 시스템을 구축할 예정이다. 또한 현재는 end-effector의 위치만을 제어하나 향후 end-effector에 자세 제어 기능을 추가할 계획이다.

후 기

본 연구는 울산대학교 조선해양 일류화 사업(SOTOP)에서 일부 지원을 받아 수행된 과제입니다.

참 고 문 헌

Bruckmann, T. Mikelsons, L. Hiller, M. & Schramm, D., 2008. Continuous workspace analysis, synthesis and optimization of wire robots, *Proceeding of the ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, pp.1-8.

Gorman, J.J. Jablowski, K.W. & Cannon, D.J., 2001. The cable array robot: Theory and Experiment, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp.2804-2810.

Mejias, L. Campoy, P. Usher, K. Roberts, J. & Corke, P., 2006. Two seconds to touchdown/ vision-based controlled forced landing, *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and systems*, pp.3527-3532.

Mo, S., 2003. Marine freight transportation and cargo handling capacity of ports, *Journal of Korea Port Economic Association*, 19(2), pp.55-67.

Oh, S.-R. Mankala, K. K. Agrawal, S. K. & Albus, J. S., 2005. Dynamic Modeling and Robust Controller Design of a Two-Stage Parallel Cable Robot, *Multibody System Dynamics*, 13(4), pp.385-399.

Usher, K. Winstanley, G. Corke, P. Stauffacher, D. & Carnie, R., 2005. Air Vehicle Simulator: an Application for a cable Array robot, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics & Automation* pp. 2241-2246.



신 동 목



이 연 암