

기전 시스템의 구동 모터 선정 방법과 견마로봇용 지뢰탐지 구동 장치에의 적용

A Motor Selection Criteria for a Mechatronic System and Its Application to Design
a Mine Detection Manipulator for a Multi-Purpose Dog-Horse Robot

최 창 환* **정 승 호**** **김 석 환***** **이 정 엽*****
Chang-Hwan, Choi Seung-Ho, Jung Seok-Hwan, Kim Jeong-Yeob, Lee

최 덕 선**** **정 상 철****** **박 용 운******
Tok-Son, Choe Sang-Chul, Chung Yong-Woon, Park

ABSTRACT

This paper presents a motor selection technique for a manipulator design that is used in a multi-purpose dog-horse robot. Since the dynamics of a manipulator and its servo drives are closely related to each other, it requires a repetitive analysis to determine a suitable motor. In order to simplify this procedure, Straete et al. proposed a simple normalization method to separate the load dependent terms and the motor dependent terms. This technique is adopted in this paper for selecting a motor in designing a manipulator.

주요기술용어(주제어) : Servo Motor Selection, Manipulator Design

1. 서 론

견마로봇에는 장착되는 지뢰탐지 장치는 최신의 금속 탐지 센서와 GPR(Ground Penetration Radar) 센서 및 이를 구동하기 위한 다자유도 매니플레이터로 구성되어 있다. 정밀한 탐색을 위해서는 매니플레이터를 구동하여 지면과의 간격을 자동으로 조절하면서

지면을 스캐닝할 수 있어야 하고 원격제어를 통하여 쉽게 운용할 수 있어야 한다. 지형 센서를 통하여 지면의 정보를 획득하여 지면이 균일하지 않을 경우에도 일정한 간격을 유지할 수 있어야 하고 짧은 시간 내에 충분한 탐지 영역을 확보하기 위해서는 고속의 움직임도 요구된다.

일반적으로 매니플레이터의 운동 방식은 크게 두가지로 분류할 수 있는데 연속 운동과 증분형 운동 방식이다. 연속 운동의 경우에는 서보 구동 장치가 일정 또는 반복적인 하중을 수 시간 또는 여러 날의 시간 동안 계속해서 동작하는 운동 방식을 말한다. 이 경우 서보 구동 장치가 안정적으로 동작하기 위해서는 구동 장치의 온도 균형이 유지되는 것이 중요하다. 증분형 운동 방식은 공장의 기계 조립이나 원격

† 2007년 9월 11일 접수~2007년 10월 18일 게재승인

* 한국원자력연구원 핵주기원격장치팀

** 한국원자력연구원 원자력로봇팀

*** (주)로텐, 체계 개발 1팀

**** 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : madistcch@kaeri.re.kr

제어와 같이 구동 및 정지가 비주기적으로 이루어지는 경우를 말한다. 지뢰탐지용 구동 장치의 경우에는 반복적인 운동이 필요한 조인트도 있고 지면의 특성에 따라 비주기적으로 움직이는 조인트도 있다.

구동 매니플레이터의 성능을 좌우하는 요소에는 기구부의 설계 및 제어 시스템의 설계가 있는데 동적 특성에 주된 영향을 주는 것은 경량화와 서보 구동 장치의 성능으로 볼 수 있다. 구동 모터의 선정은 고성능의 매니플레이터의 설계에서 가장 중요한 부분 중의 하나이다.

Patch와 Seering^[1]은 관성 부하만 있는 경우에 부하 가속도를 최대로 하거나 이동 시간을 최소화하는 감속비의 선정 방법을 제시하였다. Centinkunt^[2]는 관성 부하일 경우의 기계 부품과 제어기 부품을 선정하기 위한 기법을 제안하였다. 그리고 모터 선정과 관련된 다양한 자료에서도^[3,4] 관성 부하일 경우의 선정 방법을 주로 제시하고 있다. 그러나 이러한 방법은 매니플레이터와 같이 부하 특성이 동적인 경우에는 동역학 해석을 통한 모터 선정 방법이 필요하다. Chedmail과 Gautier^[5]는 반복적인 해석을 통하여 매니플레이터의 구동 모터를 최적으로 선정하기 위한 기법을 제안하였다. 반복적인 방법의 경우 해석 시간이 오래 걸리는 경우에는 효율적이지 못하다. 그러므로 Straete 등^[6]은 부하 토크 및 부하 속도 항을 normalization을 통하여 부하에 관계된 항과 모터에 관계된 항을 분리하여 기존의 반복적인 모터 선정 과정을 간략화하였다. 동일한 저자가 모터 브러쉬의 스위칭 한계 조건과 정격 입력 전류 등의 조건으로 확장하고 인덕션 모터의 경우에도 적용할 수 있는 모터 선정 방법을 제안하였다^[7].

기존에 매니플레이터 링크의 관성만을 고려한 계산 방식이 많이 사용되고 있는데 매니플레이터의 경우 여러 개의 몸체가 연결되어 있고 구동하는 부하에 따라서 다양한 동적 하중을 보이기 때문에 필히 동역학 해석을 통한 결과를 바탕으로 모터를 선정해야 한다. 본 연구에서는 지뢰탐지 장치에 요구되는 성능을 분석하여 매니플레이터의 기준 궤적을 생성하고 동역학 해석을 통하여 필요한 모터의 제원을 결정한다. 동역학 해석을 위하여 상용 다물체 동역학 해석 패키지를 사용하였고 해석 결과를 바탕으로 Straete^[6,7] 등이

제안한 부하 선도 방식을 활용하여 견마로봇의 지뢰탐지 장치 구동에 사용되는 모터를 선정하였다. 제시된 방법은 보다 체계적으로 실제적인 시스템의 설계 자료로 활용할 수 있다.

2. 모터 선정 방법

일반적으로 매니플레이터 구동용 모터의 경우에는 다음과 같은 조건들이 만족해야 한다.

- (C1) 모터 축으로 환산된 부하의 최대 회전수는 모터의 최대 회전수보다 적어야 한다.
- (C2) 모터 축으로 환산된 부하의 최대 토크는 모터의 최대 토크보다 적어야 한다.
- (C3) 모터가 반복적인 부하 상황에서도 안정적으로 동작해야 한다.

(C1)과 (C2)의 조건으로부터 유도된 식은 다음과 같다.

$$\| \omega_i n \|_i \leq \omega_{j,motor} \quad (1)$$

$$\left\| \frac{T_i(t)}{n} + J_m n \alpha_i(t) \right\|_i \leq T_{j,motor} \quad (2)$$

여기에서 $T_i(t)$, $\alpha_i(t)$, ω_i 는 부하를 구동하기 위한 토크, 부하의 각가속도와 속도를 각각 나타낸다. $\omega_{j,motor}$, $T_{j,motor}$, J_m 는 모터의 회전수, 모터의 토크, 회전자의 관성을 나타내고 n 은 감속비를 나타낸다. 식 (1)과 (2)의 좌변은 부하의 토크를 속도 및 토크를 기어비를 고려하여 모터 축으로 환산한 수식이고 우변은 모터의 성능을 나타낸다. i 는 모터 축 부하 토크를 구하기 위한 norm 형태를 나타내는데 ∞ -norm을 사용하면 $\omega_{j,motor}$ 는 모터의 최대 회전수, $T_{j,motor}$ 는 모터의 최대 토크가 되어 각각 (C1) 및 (C2)의 조건이 되고 2-norm을 사용하면 $\omega_{j,motor}$ 는 모터의 연속 회전수, $T_{j,motor}$ 는 모터의 연속 토크가 되어 (C3)의 조건이 된다. 위 수식을 보면 좌변과 우변이 모두 모터 및 감속비에 관련된 변수와 부하에 관련된 변수가 커

플링 되어 있기 때문에 위 조건을 판별하기 위해서는 특정 모터 및 감속비를 선택한 후 동역학 해석을 통하여 부하관련 변수들을 결정하고 좌우변에 선정된 모터의 특성을 대입하여 조건의 만족 여부를 결정해야 한다. 이러한 방식의 경우 만약 선정된 모터나 감속비가 적절치 않으면 다른 모터 및 감속비를 선정하여 다시 해석을 수행하는 식의 반복적인 동역학 해석이 동반된다. 해석 시간이 오래 걸릴 경우에는 모터 및 감속비 선정에 많은 시간이 소요된다.

부하 특성과 모터의 특성을 분리하기 위하여 좌우변항을 $\sqrt{J_m}$ 로 나누고 정리하면 감속비를 다음과 같은 normalize된 형태로 표현할 수 있다.

$$n^* = \sqrt{J_m} \cdot n \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 식 (1)과 (2)를 정리하면 다음과 같은 수식으로 정리할 수 있다.

$$\| \omega_i n^* \|_i \leq \omega_{j,motor} \sqrt{J_m} \quad (4)$$

$$\left\| \frac{T_l(t)}{n^*} + n^* \alpha_l(t) \right\|_i \leq \frac{T_{j,motor}}{\sqrt{J_m}} \quad (5)$$

위 수식들에서 좌변 항을 보면 부하에 관련된 변수와 n^* 에 관한 수식으로 표현되고 우변 항은 모터에 관련된 변수만으로 표현되어 있는 것을 볼 수 있다. 좌변 항을 다음과 같이 정의하자.

$$\omega^*(n^*) \equiv \| \omega_i n^* \|_i \quad (6)$$

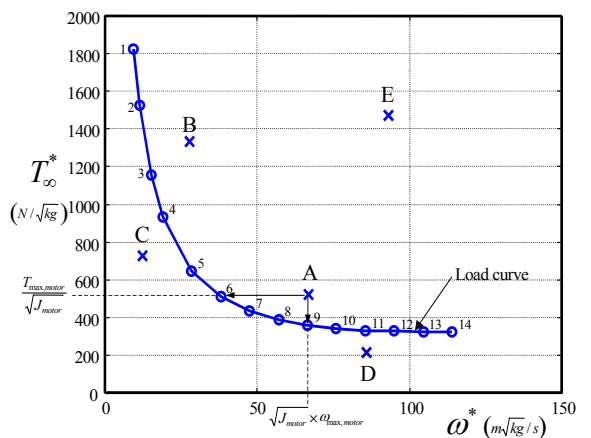
$$T_p^*(n^*) \equiv \left\| \frac{T_l(t)}{n^*} + n^* \alpha_l(t) \right\|_i \quad (7)$$

그러면 좌변 항들이 n^* 를 파라미터로 하는 수식으로 표현된다. n^* 의 경우 물리적인 의미는 실제 감속비에 모터 회전자의 관성의 제곱근을 곱한 값이지만 회전자의 관성을 1로 보면 n^* 를 임의의 파라미터로 볼 수 있다. 그러면 좌변은 부하와 임의의 파라미터에 관련된, 즉 특정 모터와는 관계가 없는 항으로 표

현할 수 있다.

결과적으로 모터 및 감속비를 선정하는 문제는 부등식 (4)와 (5)를 만족하는 n^* 값을 찾아내는 것으로 바뀌게 된다. n^* 를 파라미터로 하여 그린 식 (6)과 (7)의 그래프를 부하 선도라고 한다.

그림 1은 식 (4)와 (5)로부터 구한 대표적인 부하 선도를 보여 주고 있다. 0보다 큰 n^* 의 값을 임의로 정하여 그린 그림이다. 부하 선도가 그려지면 후보 모터를 선정할 다음 모터의 특성, 즉 최대 속도, 최대 토크, 회전자의 관성을 이용하여 식 (4)와 (5)의 우변을 계산한다. 계산된 값을 부하 선도에 그리면 그림 1의 A, B, C, D, E와 같이 해당 하는 모터가 부하선도의 위쪽 또는 아래쪽에 한 점으로 나타나게 된다. 사용된 값은 표 1에 표현되어 있다. 부하 선도의 위쪽에 나타나는 모터는 식 (4)와 (5)의 부등식을 만족하는 모터이므로 조건 (C1)과 (C2)를 만족하는 모터가 된다. 부하 선도의 아래쪽에 있는 모터는 적합하지 않은 모터가 된다. 다시 말해 모터 A, B, E는 적합한 모터이며 모터 C, D는 부적합하다. 적합한 모터 중에 B의 경우 부하에 비해 너무 높은 토크를 내는 모터이고 모터 E의 경우 작용하는 부하에 비해 최대 토크와 속도가 너무 큰 모터임을 알 수 있다. 그러므로 위 모터 중에는 모터 A가 가장 적합하다고 할 수 있으며 그 때의 적절한 감속비는 n^* 가 6번에서 9번 사이에 있다. 여기에서 식 (3)을 이용하여 실제 감속비를 구할 수 있다.



[그림 1] 대표적인 부하선도

[표 1] 모터의 종류에 따른 적합도 판정

모터	Jmotor (kg m ²)	Tmax (N.m)	ωpeak (rpm)	적합
A	0.02	73.5	4389.0	O
B	0.07	357.2	974.5	O
C	0.07	198.4	137.0	X
D	0.08	56.6	2870	X
E	0.10	490.0	2717.0	O

유도 과정에서 알 수 있듯이 부하 곡선은 모터의 특성은 배제되어 있기 때문에 모터 종류에 상관없이 동일한 부하 곡선을 얻게 된다. 다시 말해 반복적으로 동역학 해석을 수행할 필요가 없다는 의미가 되므로 효율적으로 모터 및 감속비를 선정할 수 있다.

3. 지뢰탐지 구동 장치 요구 성능 분석

가. 구동 장치 요구 성능 분석

지뢰 탐지 장치에 요구되는 주된 성능은 지뢰 탐지 오차 없이 빠른 시간 내에 넓은 지역에 대해서 지뢰 탐지 작업을 수행하는 것이다. 지뢰 탐지 작업의 오차는 탐지 센서의 성능에 기인하기 때문에 본 연구의 범위에서 벗어나므로 제외하기로 하고, 빠른 시간에 넓은 지역을 탐지하기 위해서는 지뢰 탐지 센서를 구동해 주는 매니퓰레이터가 고속으로 동작할 수 있어야 한다. 그러나 지뢰 탐지 센서에는 탐지 스캐닝 속도에 제한이 있기 때문에 매니퓰레이터의 속도를 높여서 탐지 속도를 향상시키는 데에는 한계가 있다. 탐지 속도는 탐지 센서가 로봇의 차체 폭정도 지면의 모든 영역을 탐지하고 지나가는 상황에서의 로봇의 주행 속도를 최대로 하면 된다. 요약하면 다음과 같다.

목적 : 로봇의 주행 속도가 최대로 되어야 한다.

제한조건 :

- (1) 센서가 지면의 모든 영역을 검사해야 한다.
- (2) 탐지 속도가 센서의 최대 스캐닝 작동 범위 내에 있어야 한다.

최적화 문제로 형식화 하면

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \dot{y}_1 \\ & \text{s.t. } \sqrt{\dot{p}_{1x}^2 + \dot{p}_{1y}^2} \leq v_s \\ & \dot{y}_1 t \leq \frac{d_s}{2} \end{aligned} \tag{8}$$

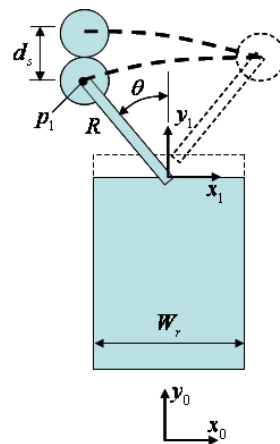
이다. 여기에서 각 변수의 값은 그림 2에 표시되어 있다. y_1 은 차량의 주행 방향 거리, p_{1x}, p_{1y} 는 지뢰 탐지 센서의 절대 속도, v_s, d_s 는 지뢰탐지 센서의 최대 스캐닝 속도와 탐지 센서의 탐지 직경, t 는 매니퓰레이터가 한번 왕복하는 데 걸리는 시간이다. 지뢰탐지 센서의 절대 위치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} p_{1x} &= R \sin \theta \\ p_{1y} &= y_1 + R \cos \theta \end{aligned} \tag{9}$$

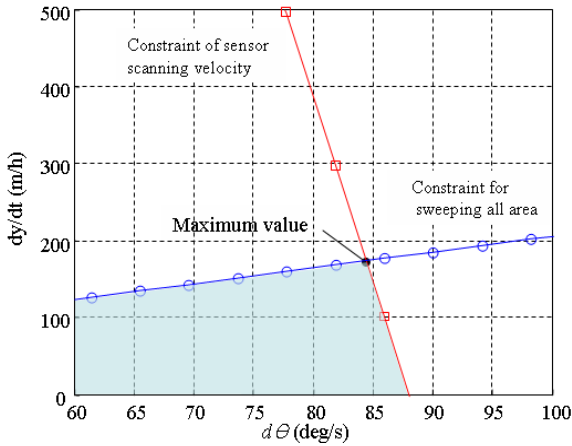
여기에서 R, θ 은 매니퓰레이터의 길이와 회전 각도를 나타낸다. 위식을 식 (8)에 대입하면 비교적 간단한 연립방정식을 얻을 수 있고 문제를 풀면 다음과 같이 로봇의 속도에 관한 부등식을 구할 수 있다.

$$0 \leq \dot{y}_1 \leq -R\dot{\theta} \sin \alpha + \sqrt{v_s^2 - R^2\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha} \tag{10}$$

$$0 \leq \dot{y}_1 \leq \frac{d_s \dot{\theta}}{4\alpha} \tag{11}$$



[그림 2] 매니퓰레이터 요구 성능 해석



[그림 3] 매니플레이터 요구 성능 해석 결과

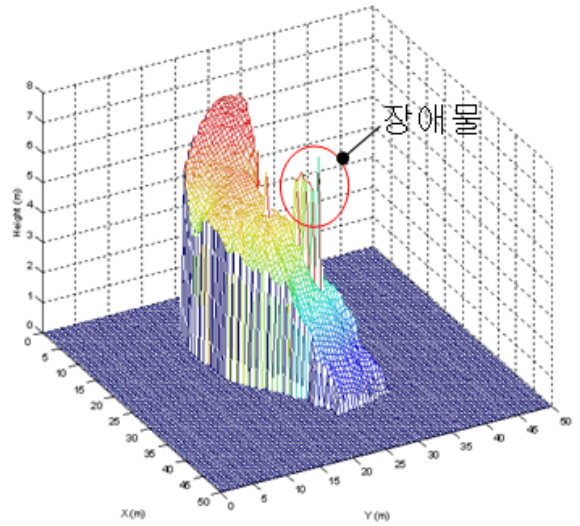
여기에서

$$\alpha = \arccos \frac{W_t}{2R}, t = \frac{2\alpha}{\dot{\theta}}$$

본 연구에서 사용 예정인 ERA & VALLON Minehound VMR2 [Metal Detector + Ground Penetration Radar type]의 탐지 센서의 경우 탐지 최대 속도 1.5m/s, 탐지 영역 220mm이다. 그리고 매니플레이터의 길이를 0.746m, 로봇의 차체 폭을 1.62 m라고 가정하여 식 (10)과 (11)의 방정식을 도식하면 그림 3과 같은 결과를 얻을 수 있다. 식 (10)은 탐지 센서의 스캐닝 속도 제한으로부터 나온 조건이고 식 (11)은 지면의 모든 영역을 스캐닝하기 위한 조건식이다. 두 식을 모두 만족하는 영역 내에서 로봇의 이동 속도를 최대로 할 수 있는 매니플레이터의 회전 속도 값을 그림과 같이 구할 수 있다. 그러면 매니플레이터의 속도는 84.4deg/s \approx 90deg/s일 때에 로봇의 이동 속도는 173m/h를 확보할 수 있다.

나. 구동 장치 추종 지형 요구 성능 분석

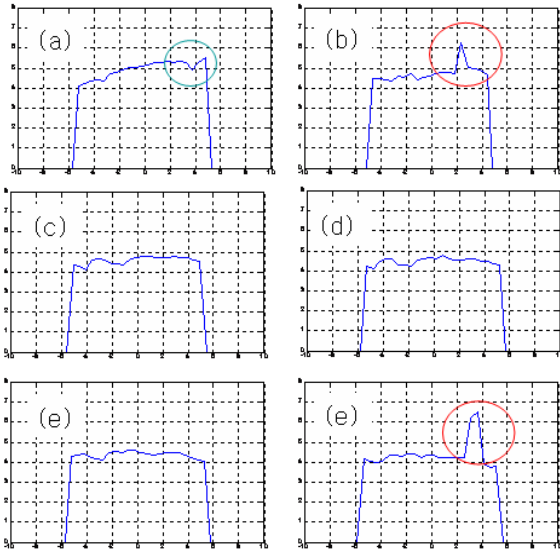
지뢰 탐지 장치가 임의의 지형에서 다양한 검사 작업을 수행하기 위해서는 평지뿐만 아니라 비정형적인 지형에서도 적용이 가능해야 하고 앞 절에서 해석한 좌우 선회 방향의 요구 속도를 만족할 수 있도록 설계해야 한다. 본 연구에서는 국방과학연구소에서 측정



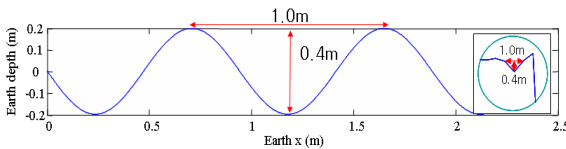
[그림 4] 로봇 시험장의 지형 데이터

한 로봇 시험장의 지형 데이터를 바탕으로 비정형 지형에서의 지뢰 탐지 센서 구동 장치의 요구 성능을 정의한다. 비정형 지형은 탐지 센서가 최대 속도를 유지한 상태에서 검사할 수 있는 지형을 대상으로 한다.

그림 4는 3차원 측정기로 측정된 지형 데이터를 그린 그림이다. 6.2m 정도의 고도 차이가 있는 오르막 길이며 비정형의 지면 형상을 가지고 있고 장애물이 있는 형상을 가지고 있다. 그림 5는 동일 지형을 도로의 길이 방향으로 절단해가면서 가장 열악한 경우의 지면 형상을 구해 본 것이다. 각각 12.25, 20.75, 21.75, 22.75, 23.75, 24.75 m에서의 단면을 보여 주고 있다. 그림 5(b)와 (e)에 가장 굴곡이 심한 면이 있는데 이것은 장애물이라고 가정하고 탐지 센서가 이 부분을 지날 때에는 매니플레이터를 감속하여 검사하거나 로봇이 장애물을 회피한다고 가정하여 최대 속도에서의 탐지 작업에서는 제외한다. 그러면 그림 5(a)의 굴곡이 가장 심한 굴곡이라고 할 수 있다. 지형 데이터로부터 굴곡의 길이와 깊이를 계산하면 대략 굴곡의 길이는 1m, 깊이는 0.4m 정도의 굴곡이 된다. 이러한 굴곡을 매니플레이터의 최대 요구 속도인 90 deg/s를 유지한 상태에서 탐지할 수 있는 매니플레이터의 설계를 목적으로 한다. 그림 6의 기준 궤적은 매니플레이터가 반주기 회전하는 동안의 지면의 형상이라고 할 수 있다. 지뢰 탐지 센서는 지면과의 기울기



[그림 5] 지형 데이터의 주행 방향 단면도



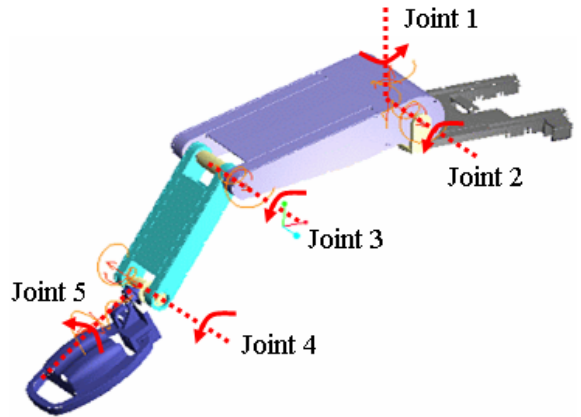
[그림 6] 지뢰 탐지 센서의 요구되는 기준 궤적

와 지면의 깊이를 유지하면서 위 지면의 형상을 추종할 수 있어야 한다. 그림 6은 이후 매니플레이터를 설계하기 위한 기준 궤적이 된다.

4. 지뢰탐지 구동 장치 동역학 모델링 및 해석

가. 매니플레이터 모델링

지뢰탐지 구동 장치는 지면과 수평을 이루고 동일한 거리를 유지한 상황에서 지면을 탐색해 나가게 된다. 그림 7은 5자유도를 가진 지뢰탐지 구동 매니플레이터를 보여 주고 있다. 장탈착을 위한 슬라이더를 제외하면 총 5자유도를 가진 매니플레이터이다. Joint 1, 2, 3은 센서 헤드를 지면의 임의의 위치에 위치시키기 위한 조인트이고 Joint 4, 5는 센서 헤드를 지면과 수평을 이루도록 제어하기 위한 조인트이다. 센서는 일반적으로 지면과 수평만 이루면 되기 때문에 지



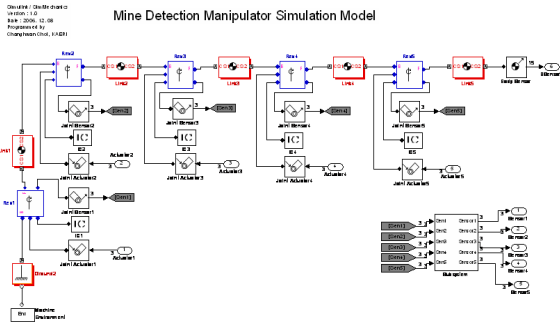
[그림 7] 매니플레이터의 구조

면과 수직인 방향의 회전은 고려할 필요가 없다.

제안된 지뢰탐지 구동 장치가 제3절에서 분석한 요구 성능을 만족하는 기준 궤적을 충분히 추종할 수 있도록 구동 모터의 제원을 결정하기 위해서는 매니플레이터의 동적 특성을 고려한 해석을 통하여 부하 토크와 부하 속도를 살펴보아야 한다. 이러한 동특성 해석을 위해서는 매니플레이터의 동적 특성을 고려한 모델링이 필요한데 본 연구에서는 MATLAB/SIMULINK의 Simmechanics 툴박스를 사용한다. Simmechanics는 3차원 다물체 동역학 해석용 툴박스로서 임의의 기계 시스템을 비교적 쉽게 모델링할 수 있고 MATLAB 환경에서 제어시스템과 쉽게 연계될 수 있다는 장점이 있다. 그림 8은 매니플레이터의 동역학 해석 모델을 보여 주고 있다. 지뢰 탐지 센서의 기준 궤적(그림 6)을 추종하기 위한 구동 모터의 요구 토크 및 속도를 계산하기 위해서는 기준 궤적을 입력으로 하여 역동력학 해석을 통하여 구할 수 있는데 그림 8의 모델에서 각 조인트의 Joint actuator 블록의 입력을 motion으로 설정한 다음 각 조인트의 기준 궤적을 대입하면 구할 수 있다. 그러나 역동력학 해석으로 토크를 구할 경우 기준 궤적을 정교하게 결정하지 않으면 요구되는 모터의 토크가 너무 커지는 결과를 얻게 된다. 그러므로 본 연구에서는 각 조인트에 PID 제어를 설계하여 추종 제어를 통하여 나오는 제어 입력, 즉 조인트 토크를 모터 선정을 위한 기준 자료로 활용하였다. 그림 9는 각 조인트에 연결된 독립 조인트 제어기의 블록다이아그

램을 보여 주고 있다. PID 제어 계인은 다른 조인트를 고정한 상태에서 응답이 가장 좋은 경우로 결정하였다. 그림 10은 매니플레이터의 동역학 해석 모델과

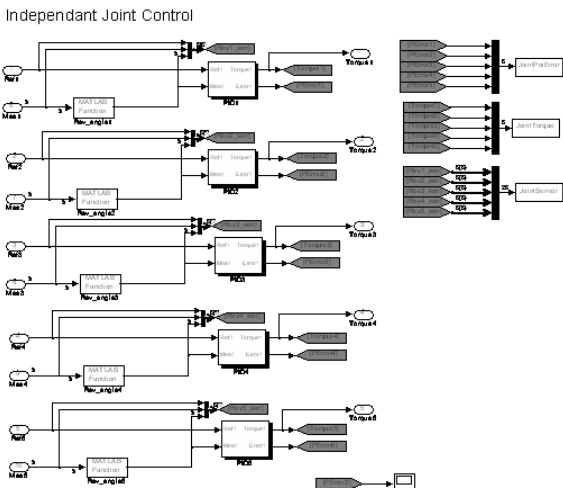
제어기를 포함한 전체 블록다이어그램을 보여 주고 있다. 매니플레이터가 5자유도이므로 해석 수행 결과를 쉽게 알 수 있도록 3차원 그래픽을 활용한 가상의 매니플레이터 구성하고 VR 툴박스를 이용하여 해석 결과와 연동하였다.



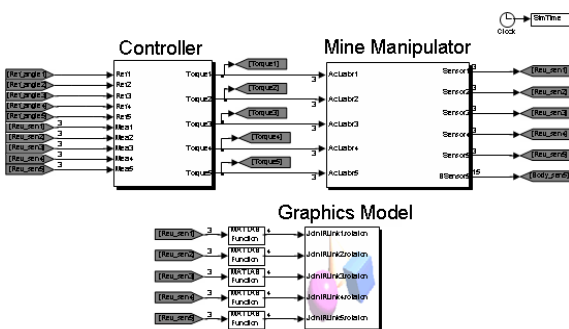
[그림 8] 매니플레이터의 동역학 해석 모델

나. 동역학 해석 결과

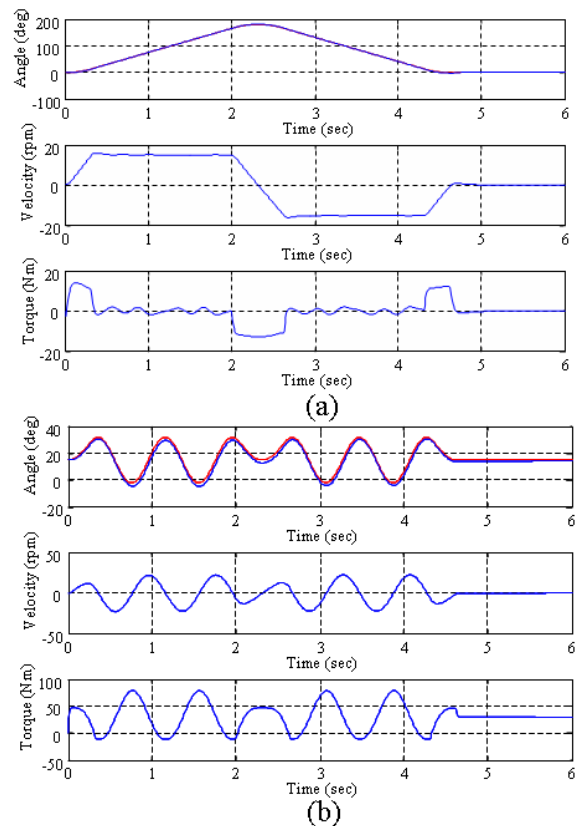
제어기의 기준 입력은 기준 궤적(그림 6)을 추종할 수 있는 각 조인트의 기준 궤적을 구한 다음 대입하였다. 그림 11은 각 조인트의 각도, 각속도, 토크 응답을 보여 주고 있다. 모든 조인트에서 기준 궤적에 잘 추종하고 있는 것을 볼 수 있고 이때의 부하 토크, 속도, 가속도 정보를 구할 수 있다. 표 2는 해석 결과로부터 구한 최대 부하 토크와 평균 토크를 보여 주고 있다.



[그림 9] 독립 조인트 제어기 블록다이어그램



[그림 10] 매니플레이터 해석용 전체 블록다이어그램



[그림 11] 동역학 해석 결과. (a) Joint 1 (b) Joint 2의 조인트 각도, 각속도, 토크

[표 2] 부하 토크 해석 결과

모터	최대 토크(Nm)	평균 토크(Nm)
1	13.5	2.8
2	79.3	29.6
3	26.8	9.5
4	5.3	1.7
5	2.0	0.5

5. 모터 선정 결과

가. 최대 토크 조건

조건 (C1)과 (C2)를 이용하여 그림 11의 부하를 구동할 수 있는 각 조인트 모터를 구해 본다. 최대 토크 조건을 구하는 것이므로 식 (6)과 (7)에서 ∞ -norm을 사용한다. 그러면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\max_t |\omega_l(t)n| \leq \omega_{pm} \quad (12)$$

$$\max_t |T_{mot}(t)| \leq T_{pm} \quad (13)$$

여기에서 ω_{pm} , T_{pm} 은 모터의 최대 속도와 토크이다. 모터의 토크는 부하 토크와 모터의 관성에 의한 토크의 합으로 나타나므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

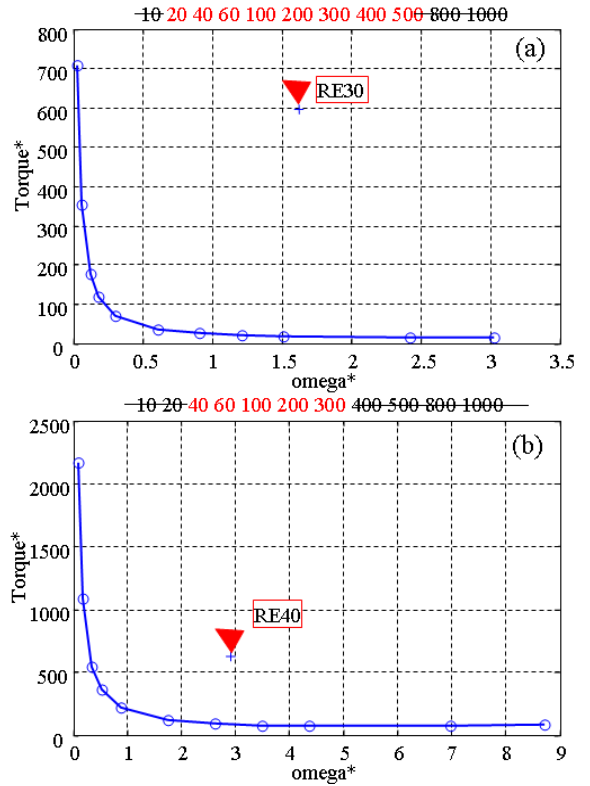
$$\max_t \left| \frac{T_l(t)}{n} + J_m n \alpha_l(t) \right| \leq T_{pm} \quad (14)$$

식 (12)와 식 (14)를 normalize하면 다음과 같다.

$$\max_t |\omega_l(t)n^*| \leq \frac{\omega_{pm}}{\sqrt{J_m}} \quad (15)$$

$$\max_t \left| \frac{T_l(t)}{n^*} + \alpha_l(t)n^* \right| \leq \frac{T_{pm}}{\sqrt{J_m}} \quad (16)$$

그림 11의 동역학 해석 결과를 식 (15)과 (16)의 좌변에 대입하여 부하 선도를 구하고 임의의 n^* 를



[그림 12] 최대 부하 토크 조건으로부터 구한 (a) Joint 1 (b) Joint 2의 부하 선도.

선정하여 n^* 에 관하여 가로축은 식 (15)의 우변, 세로축은 식 (16)의 우변으로 정하여 그래프를 그리면 그림 12와 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기에서 부하 선도의 위쪽 영역은 식 (15)과 (16)을 만족하는, 즉 주어진 부하를 구동할 수 있는 모터의 영역이고 아래 부분은 구동할 수 없는 영역이 된다.

부하 선도가 그려지면 후보 모터군을 선정하여 가능한 모터를 선정하게 된다. 후보 모터의 특성을 식 (15)와 식 (16)의 우변에 대입하고 각각 가로축과 세로축의 좌표 값으로 하면 각 모터에 대하여 부하 선도에 하나의 점을 찍을 수 있는데 이 점이 부하선도의 위쪽이나 아래쪽이나에 따라 적용 가능 여부가 결정되게 된다. 후보 모터는 Maxon사의 RE30, RE40 모델을 선정하고 해당 하는 모터의 특성을 대입하여 부하 선도에 표시하면 그림 12의 삼각형 표시와 같다. 모터가 부하 선도의 위쪽에 있기 때문에 적절한

모터라고 할 수 있다. 각 모터에 적합한 감속비를 선정하기 위해서는 선정된 모터를 나타내는 점에서 가로, 세로로 선을 그어 부하선도와 만나는 점에서의 감속비를 선정하면 된다. 감속비로 환산한 값을 각 그림의 위쪽에 표시하였다. Joint 1 모터의 적절한 감속비는 20~500이 되고 Joint 2 모터의 적절한 감속비는 40~300이 된다. 여기에서 감속비는 모터에 장착된 감속기의 감속비와 외부 감속의 포함한 감속비이다.

나. 평균 토크 조건

모터가 주어진 부하를 지속적으로 구동이 가능할지를 알아보는 지표가 평균 토크 조건이다. 평균 토크는 모터의 발열량과 관계되는 것으로서 실제로는 베어링 발열이 속도에 따라 달라 질수도 있고 내부의 팬의 영향으로 냉각이 높아져 동작 범위 내에서 정상 상태에 도달할 수도 있으나 이러한 영향을 무시한다면 속도와는 무관하다고 가정할 수 있다. 그러면 조건 (C3)만을 이용하여 부하 선도를 구하면 된다. 그림 11의 부하를 지속적으로 구동할 수 있는 각 조인트 모터를 구해 본다. 평균 토크 조건을 구하는 것이므로 식 (7)에서 2-norm을 사용하여 정리하면 다음과 같다.

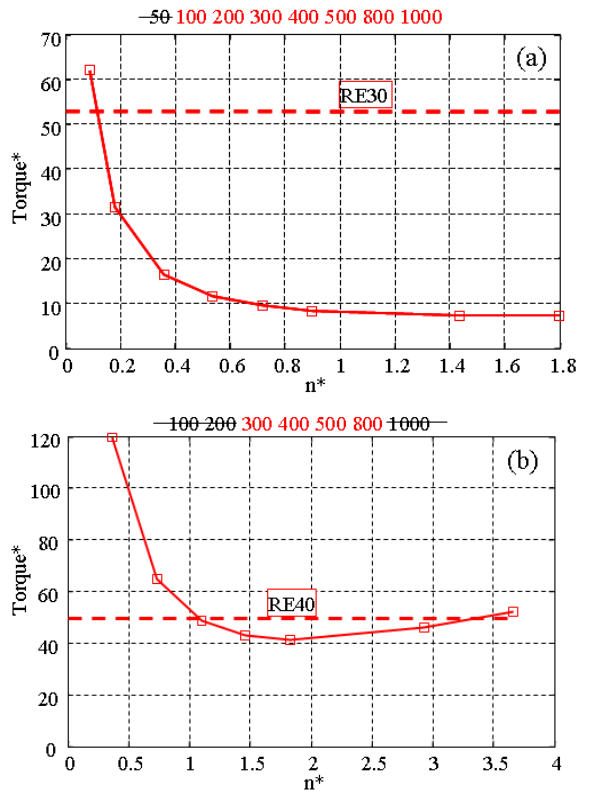
$$T_{mot,avg} \equiv \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T T_{mot}(t)^2 dt} \leq T_{con} \quad (17)$$

여기에서 T_{con} 은 연속 모터 토크이다. 모터의 토크는 부하 토크와 모터의 관성에 의한 토크의 합으로 나타나므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{T_l(t)}{n} + J_m n \alpha_l(t) \right]^2 dt} \leq T_{con} \quad (18)$$

식 (18)을 normalize하면 다음과 같다.

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{T_l(t)}{n^*} + n^* \alpha_l(t) \right]^2 dt} \leq \frac{T_{con}}{\sqrt{J_m}} \quad (19)$$



[그림 13] 평균 부하 토크 조건으로부터 구한 (a) Joint 1 (b) Joint 2의 부하 선도.

그림 11의 동역학 해석 결과를 식 (19)의 좌변에 대입하여 부하 선도를 구하고 임의의 n^* 를 선정하여 n^* 를 가로축으로 하고 세로축은 식 (19)의 좌변으로 정하여 그래프를 그리면 그림 13과 같은 결과를 얻을 수 있다.

동일한 후보 모터의 특성들을 식 (19)의 우변에 대입하면 가로축으로 선을 하나 그을 수 있다. 그때에 선이 부하 선도의 위에 있는 영역이 가능한 기어비가 된다. 모터가 모두 부하 선도 만나서 위에 존재하는 영역이 있기 때문에 지속적으로 구동이 가능한 감속비는 가로선과 부하 선도가 만나는 지점의 값이 된다. 감속비로 환산한 값을 각 그림의 위쪽에 표시하였다.

결과적으로 Joint 1의 경우는 최대 속도 및 토크 조건으로는 20~500까지의 감속비가 가능한데 평균 토크 조건으로 보면 100~1000정도가 가능하다. 실제

로는 1000이상도 가능하지만 해석 결과에서 적절한 범위의 값으로 1000까지 했기 때문에 이를 최대값으로 보자. 그러면 두 조건이 모두 만족하기 위해서는 모터를 RE30으로 했을 경우 100~500 정도의 기어비를 가져야 해당 부하를 지속적으로 구동할 수 있는 기어비의 범위가 된다. 유사한 방식으로 Joint 2의 경우에는 최대 속도 및 토크 조건으로는 40~300까지의 감속비가 가능한데 평균 토크 조건으로 보면 300~800정도가 가능하다. 그러면 두 조건을 모두 만족하기 위해서는 300이 적절한 값이 됨을 알 수 있다. Joint 2의 경우는 가능한 기어비의 영역이 좁은 것을 알 수 있는데 이것은 현재 선정된 모터가 토크나 속도에 여유 없이 두 조건을 만족하는 경우를 나타내고 Joint 1의 경우는 기어비가 충분히 넓은데 이것은 모터가 주어진 부하에 대하여 과도하게 높은 성능으로 선정되어 있다고 볼 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 다양한 동적인 부하 특성을 가진 시스템에 적용할 수 있는 모터 선정 방법을 제안하였다. 제안된 방식은 기존의 방식에서 사용되었던 반복적인 동역학 해석을 한 번의 해석으로 간략화 했기 때문에 모터 선정의 효율성을 향상시켰다. 그리고 여러 가지 후보 모터들이 하나의 부하선도에 대입되므로 모터들 간의 상대적인 비교도 가능하다. 제안된 방식은 보다 체계적인 시스템 설계에 활용될 수 있다. 제안된 방식을 견마 로봇의 지퍼 탐지 구동장치 설계에 적용하여 활용하였다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청/민군겸용기술센터와 정보통신부/정보통신연구진흥원의 민군겸용기술개발사업의 일환으로 수행하였음.[06-DU-LC-01, 네트워크 기반 다목적 견마형 로봇 기술 개발]

참고 문헌

- [1] K. A. Pasch and W. P. Seering, "On the Drive Systems for High Performance Machines", Trans. on ASME, Vol. 106, pp. 102~108, 1984.
- [2] Minimotor Catalogue, 2007.
- [3] Maxonmotor Catalogue, 2007.
- [4] S. Cetinkunt, "Optimal Design Issues in High-Speed High-Precision Motion Servo Systems", Mechatronics, Vol. 1, No. 2, pp. 187~201, 1991.
- [5] P. Chedmail and M. Gautier, "Optimum Choice of Robot Actuators", J. of Engineering for Industry, Vol. 112, pp. 361~367, 1990.
- [6] H. J. Van de Straete, P. Degezelle, J. De Schutter, and R. Belmans, "Servo Motor Selection Criterion for Mechatronics Applications", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 3, No. 1, pp. 43~50, 1998.
- [7] H. J. Van de Straete, J. De Schutter, and R. Belmans, "An Efficient Procedure for Checking Performance Limits in Servo Drive Selection and Optimization", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 4, No. 4, pp. 378~386, 1999.