

# 에너지 효율 향상을 위한 직렬형 머니플레이터의 관성 파라미터 설계 최적화 방법

황순웅<sup>1</sup>, 김현국<sup>1</sup>, 최윤성<sup>2</sup>, 신규식<sup>3</sup>, 한창수<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 메카트로닉스공학과, <sup>2</sup>한양대학교 기계공학과, <sup>3</sup>한양대학교 로봇공학과

## Design Optimization Method of Inertial Parameters of Serial Manipulators for Improving the Energy Efficiency

Soon-Woong Hwang<sup>1</sup>, Hyeon-Guk Kim<sup>1</sup>, Youn-Sung Choi<sup>2</sup>,  
Kyoo-Sik Shin<sup>3</sup>, Chang-Soo Han<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechatronics Engineering, Hanyang University

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

<sup>3</sup>Department of Robot Engineering, Hanyang University

**요약** 이 논문은 직렬형 머니플레이터의 관성 성질을 고려하여 에너지 효율을 향상 시키기 위한 설계 방법에 대해 논하였다. 이 방법은 운동방정식에 가장 많은 영향을 끼치는 관성 행렬을 분석하여 최적화 문제의 구속 조건에 대입하는 방식이다. 이를 위해, 첫 번째로 초기에 설계된 머니플레이터에 대한 동적 모델링을 도출하고 여기서 표현되는 관성 행렬의 특성을 분석한다. 두 번째로 분석된 관성 행렬의 변화 정도를 정량화하는 지표를 정의하여 구속 조건과 설계 파라미터의 경계조건을 설정하였다. 마지막으로 토크를 목적 함수로 정하고 앞서 정의된 구속 조건과 경계조건을 통하여 최적화를 수행한다. 또한, 목적 함수 외에 관성, 에너지 및 질량에 관련된 보조 지표를 정의하고 최적화된 파라미터가 요구성능을 만족하는지 다시 한번 확인하는 과정을 거치는 설계 알고리즘을 제안하였다. 제안한 설계 알고리즘의 수행 결과로 토크 최소화를 통하여 에너지 효율이 향상되었으며, 제안된 방법을 공간상의 3 자유도 직렬 머니플레이터에 시뮬레이션 테스트 하였다. 이 설계 알고리즘은 일반적으로 n 자유도를 가지는 머니플레이터에도 적용이 가능하다.

**Abstract** This paper presents a design methodology for improving the energy efficiency by considering the inertial properties of serial manipulators. This method employed is to put the inertia matrix, which has a critical effect on the equation of motion, into the constraints of the optimization problem. Through the optimization process, we propose a design algorithm that can double-check whether the optimized parameters satisfy the required performance or not by using an auxiliary index associated with the inertia and energy. Using this design algorithm, we were able to improve the energy efficiency by minimizing the torque. We applied this method to a 3 degrees of freedom serial manipulator and simulated it.

**Keywords** : Inertia Property, Energy Efficiency, Torque Optimization, Optimal Design, Serial Manipulator

### 1. 서론

로봇은 필요한 작업에 따라서 다양한 형태의 구조를  
본 논문은 산업통상자원부가 출연하고 한국산업기술평가과리원에서 위탁 시행한 산업핵심기술개발사업(과제번호: 10060110) 및  
(no. 10041827)의 지원으로 수행되었음.

가지고 있다. 특히 직렬형 머니플레이터는 산업현장에서  
가장 많이 쓰이고 있는 구조이며 물건이송, 조립, 용접  
등 다양한 작업을 수행하기 위하여 그 형태가 다양해지

\*Corresponding Author : Chang-Soo Han(Hanyang Univ.)

Tel: +82-31-400-5247 email: cshan@hanyang.ac.kr

Received October 10, 2016

Revised October 27, 2016

Accepted November 10, 2016

Published November 30, 2016

고 있다. 최근에는 복잡한 작업도 가능한 여자유도를 가지는 양팔로봇이 활발하게 연구되고 있다.

이러한 로봇들은 요구되는 성능과 작업에 따라서 관절의 구조, 링크의 길이/무게/관성 등의 설계 파라미터들이 결정된다. 그래서 로봇설계에 있어서 중요한 것 중에 하나가 로봇성능에 영향을 미치는 파라미터를 파악하는 것이다[1,2]. 설계 파라미터들을 결정하기 위해 대부분의 설계자들은 경험에 의존하거나 다른 비슷한 제품의 분석을 통해서 진행하게 된다. 이런 방식은 여러 번의 시행착오와 시간과 비용이 발생하게 되는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 시뮬레이션을 통해서 로봇의 성능을 평가하고 향상시키기 위한 최적화문제로 접근하여 설계 파라미터를 결정하는 연구들이 진행되어 왔다 [3-7]. 로봇의 성능을 평가하기 위해서는 로봇 모델과 성능지표가 필요하며, 이것은 기구학적 성능지표와 동적 성능지표로 나눌 수 있다. 기구학적 성능지표는 특정 자세(혹은 특정작업)에 대한 Dexterity를 파악할 수 있는 것으로 Manipulability[8]와 Condition Number[9]등 이 있다. 동적 성능지표는 관절의 토크로부터 말단부의 가속도와 힘의 성능을 측정하는 Dynamic Manipulability [10]와 로봇의 관성행렬이 동적인 등방성을 나타내는 정도를 표현한 Dynamic Conditioning Index[11]등이 있다. 성능지표를 이용한 최적화 연구는 기구학적인 부분만 고려하여 링크길이를 결정하는 것이 대부분이며, 동적인 부분도 단순히 링크질량만을 감소시키거나 특정자세에 대해서만 다루어 졌다. 그러나 로봇에 요구하는 작업이 다양해지면서 기존의 방법으로는 현재 로봇의 설계에 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 요구하는 작업에 대한 분석과 이를 토대로 설계 요구사항이 도출되어야 할 것이며, 도출된 성능에 적합한 지표들을 선정하여야 한다. 그리고 이 성능지표에 영향을 많이 끼치는 파라미터들을 도출하여 최적화 시키는 방법이 기본이 되어야 한다. 작업분석을 토대로 성능을 도출하는 과정에서 작업을 그대로 잘 수행할 수 있도록 요구성능을 도출하는 방법과 worst-case를 설정하여 요구성능을 도출하는 방법으로 나눌 수 있으며, 요구사항에 따라 설계방식이 달라 지므로 설계자는 이를 잘 파악하여 방법을 선택하여야 한다.

이 논문은 직렬형 머니플레이터의 분석된 관성 특성을 기반으로 토크를 최소화하는 최적화문제에 적용하여 로봇이 작업을 하기 위해 필요한 성능을 내기 위하여 예

너지 효율을 향상시키기 위한 설계방법을 제안하였다. 첫 번째로, worst-case를 가정하였고, 목적함수는 로봇 작업에 필요한 전체 토크 값으로 정하였다. 두 번째로, O. Ma와 J. Angeles[11]가 제시한 이상적인 관성행렬을 참조하여 최적화문제의 구속조건에 적용하였다. 세 번째로, 로봇이 작업에 필요한 성능을 내기 위하여 링크 관성의 크기 변화가 심하지 않도록 조건을 부여하였다. 위 내용들이 포함된 설계 알고리즘을 제안하였으며, 공간상에서 움직이는 3자유도 직렬 머니플레이터에 시뮬레이션 하였다. 이를 통해, 에너지 효율이 향상됨을 보일 것이며, 제안한 방법은 n 자유도를 가지는 직렬형 머니플레이터에도 적용이 가능하다.

## 2. 로봇의 동적 모델링과 관성행렬 분석

### 2.1 직렬형 머니플레이터의 동적 모델링

로봇의 운동방정식을 도출하기 위해 가장 많이 사용되는 방법은 2가지가 있다. 첫 번째 방법은 에너지 기반의 오일러-라그랑지 방법(Euler-Lagrange method)이며, 동적인 성질과 제어방식을 분석하는데 좋다. 두 번째 방법은 힘/토크 균형에 기반한 뉴턴-오일러 방법(Newton-Euler method)이며, 제어방법을 구현하는데 좋고 계산속도가 빠르다. 여기서는 동적인 성질을 분석하고 설계에 사용하기 위해 첫 번째 방법을 사용하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

$$L = K - U = \sum_{i=1}^n (K_i - U_i) \quad (2)$$

여기서 L은 라그랑지안(Lagrangian)이고, i번째 링크에 대한 운동에너지(3)와 포텐셜 에너지(4)는 다음과 같다.

$$K_i = \frac{1}{2} m_i v_{\alpha}^T v_{\alpha} + \frac{1}{2} \omega_i^T I_i \omega_i \quad (3)$$

$$U_i = m_i g^T P_{\alpha} \quad (4)$$

$v_{\alpha}$ 는 링크 i의 질량중심에 대한 선속도이고,  $\omega_i$ 는 링크 i의 각속도이다.  $I_i$ 는 링크 i의 질량중심에 대한 관성 텐서(inertia tensor)이고,  $P_{\alpha}$ 는 기준좌표계에서 측정한

링크  $i$ 의 질량중심에 대한 위치 벡터이다. 식(3)과 (4)를 식(1)에 대입하여 운동 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^n M_{ij}(q)\ddot{q}_j + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n C_{kj}^i(q)\dot{q}_k\dot{q}_j + G_i(q) = \tau_i \quad (5)$$

$1 \leq i, j, k \leq n$

여기서,  $\tau_i$ 는 링크  $i$ 의 토크이며,  $q, \dot{q}, \ddot{q}$ 는 각각 위치, 속도, 가속도이다. 이것은 모두 관절 공간의 값이다. 식(5)의 첫 번째 항은 관성에 대한 토크이며, 두 번째 항은 Coriolis and centrifugal에 대한 토크로 아래와 같이 표현된다.

$$C_{kj}^i = \frac{\partial}{\partial q_k} M_{ij}(q) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q_i} M_{ij}(q) \quad (6)$$

$G(q)$ 는 중력에 의한 토크이며 아래와 같다.

$$G_i(q) = - \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^n g_k m_j P_{ki}^j(q) \quad (7)$$

## 2.2 관성행렬 분석

로봇에 있어서 경량화는 설계상에 있어서 중요한 요소이다. 특히 산업용 로봇 같은 경우에 고속으로 움직여야 하며, 이것은 경량화를 통해 적은 에너지로 빨리 움직일 수 있음을 말한다. 그러나 직렬 머니플레이터의 경우 일반적으로 회전운동을 하기 때문에 링크가 단순히 가벼운 것 뿐만아니라 관성 모멘트가 작아지도록 설계해야 한다.

O. Ma와 J. Angeles는 식(5)의 첫 번째 항인 관성행렬의 가장 이상적인 구조가 식(8)과 같아야 한다고 제안하였다[11].

$$M = \sigma \mathbf{1} \quad (8)$$

여기서  $\sigma$ 은 양의 스칼라 값이고,  $\mathbf{1}$ 은 단위행렬이다. 하지만 관성행렬은 관절의 위치에 따라 변하기 때문에 특정 자세만 유지해야하는 로봇이 아닌 경우에는 식(8)과 같이 설계하는 것은 불가능 하다. 실제 직렬형 머니플레이터는 링크간에 서로 강하게 연결되어 있기 때문에 관성행렬은 대각선 행렬뿐만 아니라 다른 값들도 존재한다. 다시 말해서 일반적으로 symmetry positive definite matrix의 형태로 존재한다.

현실적인 설계를 하기 위해서는 이상적인 형태에 가능한 가깝게 하는 것에 더해져서 작업 시 변화하는 관성의 크기가 심하지 않도록 하는 것도 중요하다. 이와 관련된 자세한 내용은 3장에서 다시 논의될 것이다.

설계에서 관성행렬을 중요시하는 또 하나의 이유는 제어적인 관점에서 살펴 볼 수있다. 식(5)와 식(6)을 보면 운동방정식이 관성행렬의 변화에 크게 영향을 받을 수 있다. 이 절에서 설명한 설계 방식을 통해서 결과적으로 관절에 작용하는 토크뿐만 아니라 운동에너지를 감소시킬 수 있으며, 식(6)의 비선형 부분의 감소를 통해서 제어기의 성능도 향상 시킬 수 있다[12].

## 3. 에너지 효율 향상 방법

### 3.1 토크 최소화를 위한 정식화 및 보조지표

제안된 방법은 분석된 관성행렬을 기반으로 하여 총 토크의 크기를 감소시키는 것으로 머니플레이터를 설계하기 위한 요구사항들은 다음과 같다.

- 운동시 변화하는 링크 관성의 크기변화가 크지 않아야 한다.
- 각 축에 대응하는 링크의 관성 및 질량의 크기가 기본부에서 말단부로 갈수록 작아져야 한다.
- 각 링크의 무게중심은 회전축에 가까워야 한다.

이를 바탕으로 머니플레이터 설계를 위한 파라미터들의 최적화를 위한 정식화와 보조지표를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min \quad & \tau^T \tau \\ \text{subject to} \quad & m_i < m_{i-1} < \dots < m_1, \quad i = 1, \dots, n \\ & N_i < N_{i-1} < \dots < N_1 \\ & 0 < l_{ci} < 0.5l_i \end{aligned}$$

여기서  $m_i$ 와  $l_{ci}$ 는 각각 링크  $i$ 의 질량과 질량중심까지의 길이이고,  $l_i$ 는  $i$ 번째 링크 길이이다. 그리고 최적화를 통해 도출된 모델이 위에서 정의한 요구사항들을 만족하는지를 알아보기 위해 다음의 보조지표들을 정의하였다[14].

$$\sum_{i=1}^n \delta N_i, \quad \delta N_i = \max N_i - \min N_i \quad (9)$$

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n N_i u_i^2 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n m_i \quad (11)$$

식(9)는 관성의 크기 변화를 측정할 수 있는 값으로서 변화를 최소화 시킬 수 있도록 설계를 수정하는데 사용한다. 여기서  $N$ 은 로봇 관성행렬을 congruence transformation에 의해서 식(12)와 같이 수학적으로 분리된(decoupled) 대각선 행렬 형태의 관성행렬이다[13]. 식(10)은 운동에너지이며 여기서  $u_i$ 는 congruence transformation에 의한 generalized velocity components이다. 식(11)은 초기 모델과 최적화로 도출된 모델의 총 질량 값을 비교하기 위한 지표이다.

$$N = \begin{pmatrix} N_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & N_n \end{pmatrix} \quad (12)$$

### 3.2 설계 알고리즘

3.1절에서 제시된 방법을 적용하기 위한 설계 알고리즘을 Fig. 1에 표현하였다.

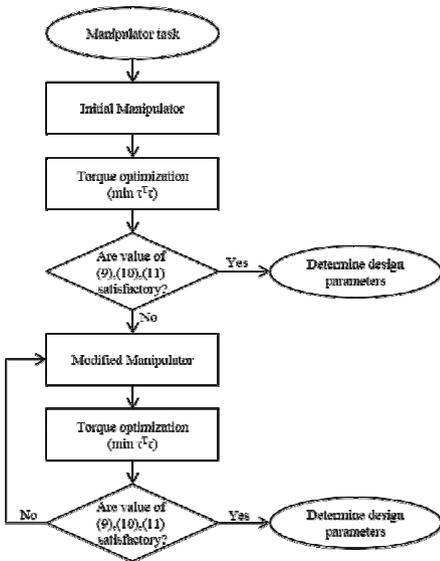


Fig. 1. Flow diagram of design algorithm

- ① 우선 머니플레이터의 운동 가능한 범위 내에서 관절 공간상에 경로를 정의하고 초기 머니플레이터의 설계 파라미터와 구속조건을 결정한다.
- ② 초기 머니플레이터로부터 구속조건을 만족하도록

토크 최적화를 수행한다.

- ③ 최적화로부터 구한 설계 파라미터를 보조지표 식 (9), (10), (11)에 대입 계산하여 만족하는 값을 얻었으면 끝내고, 그렇지 않으면 설계 파라미터의 경계조건을 변경한다.
- ④ 수정된 조건에 대해서 앞의 과정을 통해 만족하는 값을 얻을 때까지 반복한다.

제안한 설계 알고리즘의 3번 과정에서 보조지표를 만족하는 값이라 함은 다음을 이야기한다. 최적화 과정을 통하기 때문에 실제로 초기 모델보다는 성능이 좋아지는 것은 당연한 일이다. 하지만 이 값이 초기설계단계 전에 정의되는 요구사항을 만족하는 것과는 다른 이야기이다. 그렇기 때문에 설계목적에 맞는 요구사항에 대한 정의를 확실히 하고 그것에 만족하는 결과를 얻기 위한 보조지표를 정의하여 비교 판단함을 말한다.

## 4. 시뮬레이션 결과 및 토의

이번 장에서는 관성을 고려한 토크 최소화를 통해서 에너지 효율을 향상시키는 과정을 시뮬레이션에 의해서 보여준다. 3개의 회전 관절을 가지는 공간상의 3자유도 머니플레이터에 대해서 시뮬레이션 하였다. 이에 관련된 기구학적 구조(kinematic architecture)가 Fig. 2에 묘사되어 있으며, Table 1은 머니플레이터에 대한 파라미터 값들을 표시하였다.  $m_i$ 는 링크 질량,  $J_{x_{xi}}, \dots, J_{z_{zi}}$ 는 링크 관성,  $l_i$ 는 링크의 질량중심까지의 길이,  $l_i$ 는 링크길이를 나타낸다.

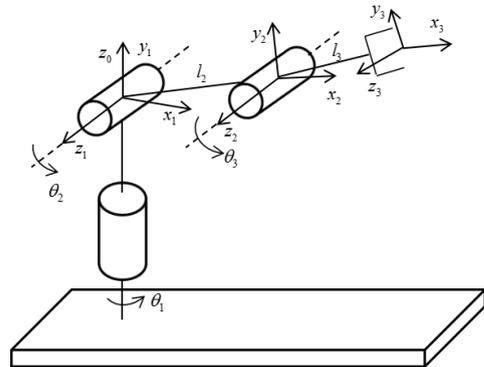


Fig. 2. Kinematic architecture of 3R spatial manipulator

Table 1. Parameters of the initial manipulator

Link Parameters	Link Number $i$		
	1	2	3
$m_i$ (kg)	7.89	11.82	5.77
$J_{xx}$ (kgm <sup>2</sup> )	0.0852	0.043	0.01
$J_{yy}$ (kgm <sup>2</sup> )	0	0	0
$J_{zz}$ (kgm <sup>2</sup> )	0	0	0
$J_{xy}$ (kgm <sup>2</sup> )	0	0	0
$J_{yz}$ (kgm <sup>2</sup> )	0	0	0
$J_{zx}$ (kgm <sup>2</sup> )	0.0670	0.186	0.09
$J_{xy}$ (kgm <sup>2</sup> )	0	0	0
$J_{yz}$ (kgm <sup>2</sup> )	0	0	0
$J_{zx}$ (kgm <sup>2</sup> )	0.0841	0.161	0.09
$l_{cxi}$ (m)	0	0.12	0.15
$l_{cxi}$ (m)	0	0	0
$l_{cxi}$ (m)	0.034	0	0
$l_i$ (m)	0.12	0.3	0.45

시뮬레이션을 통해 머니플레이터의 운동 상태를 구하기 위하여 입력을 등가속도로 설정하였으며, 관절의 위치와 각속도는 입력 각가속도의 적분을 통하여 구하도록 설정하였다. 각 관절의 각가속도의 입력 값이 각각 1 초 동안 1.57 rad/s<sup>2</sup> 일 때를 worst-case로 가정하여 운동 상태를 해석 하였다. 여기서는 작업을 하는 도중 singular에 빠져서 모든 관절이 동시에 actuator가 낼 수 있는 최고 각가속도로 움직이는 상황을 worst-case로 가정하였다.

### 4.1 초기 머니플레이터 분석

최적화를 수행하기 위해 필요한 정식화를 정의하기 위해서 초기 머니플레이터에 대한 관성과 운동에너지에 대한 분석을 하였으며, 이에 대한 것을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

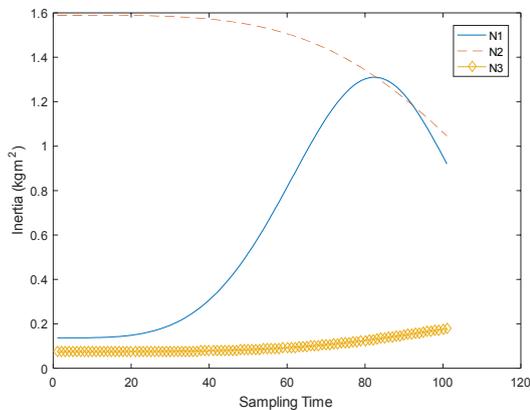


Fig. 3. Inertia of the initial manipulator

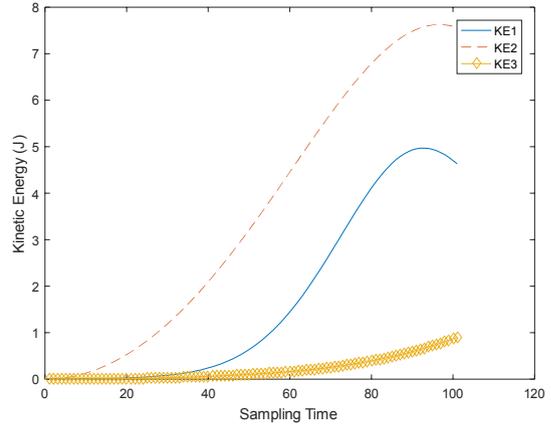


Fig. 4. Kinetic energy of the initial manipulator

Fig. 3을 보면 각 회전축에 대한 관성의 크기와 변화를 알 수 있으며, Fig. 4와 비교해 봤을 때 관성의 크기에 따라 각 링크의 운동에너지에 대한 크기가 변하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 관성의 크기와 변화를 변경시켜주면 에너지효율을 향상시킬 수 있음을 알려준다. 또한, 관성의 크기가  $N3 < N1 < N2$  인 것을 확인할 수 있으며 이와 같이 2번째 관절이 부담해야 하는 관성이 커지면 설계 과정에서 actuator를 선정할 때에 전체 무게가 증가될 수 있는 상황이 생길 수 있다. 그렇기 때문에 3장에서 제시한 에너지효율을 향상시키기 위한 최적화 방법을 통해 설계파라미터를 다시 선정해야 한다.

### 4.2 설계 최적화 결과 및 토의

3장에서 제시한 설계 알고리즘을 통해서 최적화를 수행하였다. 이 논문은 최적화 알고리즘의 효율성보다는 설계 최적화를 위한 정식화에 더 관심을 두고 있다. 그리고 정의된 정식화는 비선형성이 강하고 변수가 많아 최적 값을 얻기 위한 수행 알고리즘으로 유전자 알고리즘을 사용 하였다. 그에 대한 결과는 Table 2에 표시하였고, 초기 모델과 최적화 모델을 비교하기 위한 보조지표들의 값을 Table 3에 표시하였다. 또한, 직관적인 비교를 위하여 Fig. 6과 Fig. 7에 토크와 에너지에 대한 비교데이터를 그래프로 표현 하였다.

제시한 설계 알고리즘을 통한 결과를 살펴보면 목적 함수인 토크와 보조지표인 관성, 에너지, 질량에 대한 값들이 초기 머니플레이터에 대한 성능보다 좋아졌음을 확인할 수 있다. 관성의 크기 변화를 나타내는 식(9)에 의한 값은 약 49.1%, 에너지에 대한 식(10)은 64.5%, 총

질량을 표시한 식(11)은 약 17.6%를 낮추었다. 또한 Fig. 5에서 보는 것과 같이 초기 자세에 의한 관성의 크기에는 큰 영향을 주지 못하지만 주요 운동 구간에서 원하는 성능을 만족함을 볼 수 있다. 이것은 머니플레이터의 설계뿐만 아니라 작업을 시작하는 초기의 자세를 선정하는 방법도 제시할 수 있음을 알려준다. 그리고 Fig. 6과 Fig. 7의 전체 토크와 에너지에 대한 구간을 분석해 보면 초기 머니플레이터의 성능보다 향상되었음을 알 수 있다.

Table 2. Optimization result

Link Parameters	Link Number $i$		
	1	2	3
$m_i$ (kg)	12.004	6	3
$J_{xx}$ (kgm <sup>2</sup> )	1	0.43	0.011
$J_{yy}$ (kgm <sup>2</sup> )	0	0	0
$J_{zz}$ (kgm <sup>2</sup> )	0	0	0
$J_{yy}$ (kgm <sup>2</sup> )	0.288	0.002	0.006
$J_{yz}$ (kgm <sup>2</sup> )	0	0	0
$J_{zz}$ (kgm <sup>2</sup> )	0	0	0.004
$l_{cxi}$ (m)	0	0.1	0.1
$l_{cxi}$ (m)	0	0	0
$l_{czi}$ (m)	0.033	0	0
$l_i$ (m)	0.12	0.3	0.45
Objective function	Initial value		Optimal value
	31402		5113.8

Table 3. Values of auxiliary indices

	Initial value	Optimal value
Eq. (9)	1.2148	0.6182
Eq. (10)	4.5361	1.6115
Eq. (11)	25.48	21.004

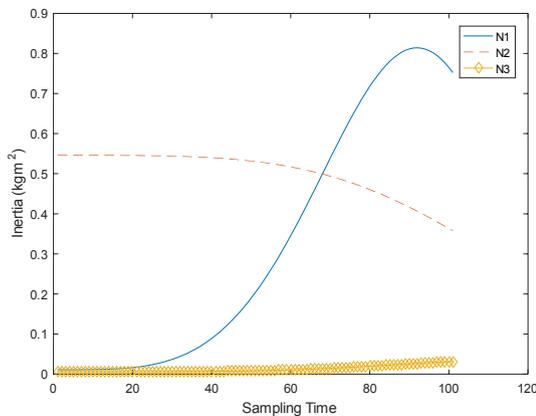


Fig. 5. Inertia of the optimal manipulator

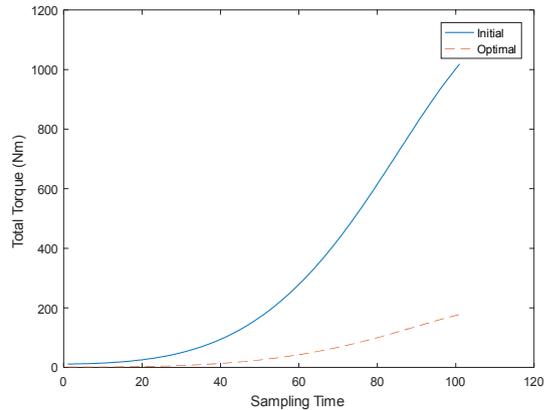


Fig. 6. Total torque of the initial and optimal manipulator

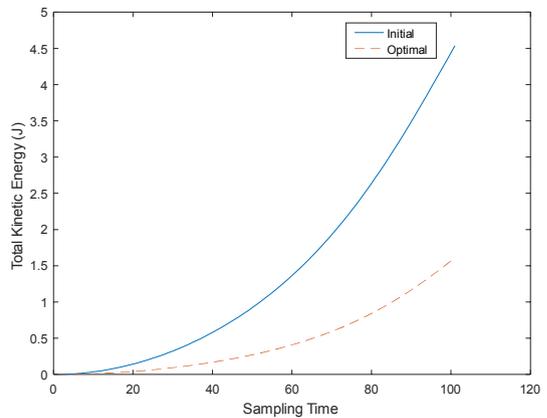


Fig. 7. Total kinetic energy of the initial and optimal manipulator

## 5. 결론

이 논문은 직렬 머니플레이터의 관성특성을 분석하고 이를 이용하여 토크를 최소화시키는 설계 파라미터를 찾아내어 에너지효율을 향상시키는 설계 방법론을 제안하였다. 첫 번째 단계에서는 초기 설계된 머니플레이터에 대한 동역학 모델을 통해서 관성행렬에 대한 분석이 이루어졌다. 두 번째 단계에서는 분석된 관성행렬을 바탕으로 정식화에 적용될 구속조건과 설계 파라미터들의 경계조건을 설정하였다. 세 번째 단계에서는 설정된 정식화를 통해 최적화된 모델을 초기모델과 목적함수 및 보조지표를 통해 비교 분석하여 조건을 만족하면, 제안한 설계 알고리즘과정을 멈추고 그렇지 않다면 다시 반복하였다. 이 과정을 3자유도를 가지는 직렬 머니플레이터에

시뮬레이션 적용하였으며, 그 결과를 분석하였다. 목적 함수인 토크는 약 16.3% 감소하였고, 관성의 크기 변화, 에너지 그리고 총질량의 크기를 나타내는 식(9), (10), (11)의 값은 각각 약 49.1%, 64.5%, 17.6%가 감소 되었음을 확인하였다. 이런 결과를 통해서 이 방법론이 에너지 효율을 향상 시킬 수 있었음을 확인하였다. 또한, 이 방법은 3자유도 뿐만 아니라 n자유도를 가지는 직렬 머니플레이터에도 적용이 가능하다.

## References

- [1] X. J. Liu and J. Wang, "Performance atlases and optimum design of planar 5R symmetrical parallel mechanisms," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 41, no. 2, pp. 119-144, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2005.05.004>
- [2] B. K. Rout and R. K. Mittal, "Screening of factors influencing the performance of manipulator using combined array design of experiment approach," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 25, no. 3, pp. 651-666, 2009.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2008.05.004>
- [3] J. R. Singh and J. Rastegar, "Optimal Synthesis of Robot Manipulators Based on Global Kinematic Parameters," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 30, no. 4, pp. 569-580, 1995.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0094-114X\(94\)00051-L](http://dx.doi.org/10.1016/0094-114X(94)00051-L)
- [4] B. K. Rout, R. K. Mittal, "Parametric Design Optimization of 2-DOF R-R Planar Manipulator-A design of experimental approach," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 24, no. 2, pp. 239-248, 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2006.10.008>
- [5] S. Kucuk and Z. Bingul, "Comparative study of performance indices for fundamental robot manipulators," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 54, no. 7, pp. 567-573, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2006.04.002>
- [6] S. Kucuk and Z. Bingul, "Link mass optimization of serial robot manipulators using genetic algorithm," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4251, pp.138-144, 2006.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/11892960\\_17](http://dx.doi.org/10.1007/11892960_17)
- [7] F. A. Lara-Molina, J. M. Rosario and D. Dumur, "Multi-Objective Optimization of Stewart-Gough Manipulator Using Global Indices," *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 79-85, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/aim.2011.6026996>
- [8] T. Yoshikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 4, no. 2, pp. 3-9, 1985.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/027836498500400201>
- [9] J. P. Merlet, "Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots," *Journal of Mechanical Design*, vol. 128, no. 1, pp. 199-206, 2005.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2121740>
- [10] T. Yoshikawa, "Dynamic Manipulability of Robot Manipulators," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol 2, pp. 1033-1038, 1985.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/robot.1985.1087277>
- [11] O. Ma and J. Angeles, "The concept of dynamic isotropy and its applications to inverse kinematics and trajectory planning," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 48-486, 1990.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.1990.126024>
- [12] J. L. Pons, R. Ceres, A. R. Jimenez, L. Calderon and J. M. Martin, "Nonlinear Performance Index (npi): A Tool for Manipulator Dynamics Improvement," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 277-287, 1997.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1007902913510>
- [13] T. A. Loduha and B. Ravani, "On First-Order Decoupling of Equation of Motion for Constrained Dynamical Systems," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 62, no. 1, pp. 216-222, 1995.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2895905>
- [14] P. Herman, "Dynamical coupling reduction for rigid manipulators using generalized velocity components," *Mechanics Research Communications*, vol. 35, no. 8, pp. 553-561, 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechrescom.2008.06.005>

## 황순웅(Soon-Woong Hwang)

[정회원]



- 2009년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 한양대학교 메카트로닉스공학과 (공학박사)
- 2016년 3월 ~ 6월 : 한국산업기술대학교 외래교수
- 2016년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 박사후과정

<관심분야>

로봇의 수학적 모델링, 성능해석, 설계 방법론, 모션 최적화, Biomechanics

**김 현 국(Hyeon-Guk Kim)**

[정회원]



- 2012년 8월 : 한양대학교 일반대학원 메카트로닉스공학과 (공학석사)
- 2012년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 일반대학원 메카트로닉스공학과 박사과정

<관심분야>

로봇 설계 방법론, 불충분구동 시스템, 인간 운동 모션

**한 창 수(Chang-Soo Han)**

[정회원]



- 1985년 2월 : Texas at Austin 기계공학과 (공학석사)
- 1989년 2월 : Texas at Austin 기계공학과 (공학박사)
- 1990년 3월 ~ 2012년 12월 : 한양대학교 기계정보경영학부 교수
- 2013년 1월 ~ 현재 : 한양대학교 로봇공학과 교수

<관심분야>

로봇 메커니즘 설계 및 해석, 건설로봇, 서비스로봇, 재활로봇, Wearable robot

**최 윤 성(Youn-Sung Choi)**

[정회원]



- 2009년 8월 : 한양대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2009년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>

로봇 모션 플래닝, 로봇 제어

**신 규 식(Kyoo-Sik Shin)**

[정회원]



- 1990년 5월 : University of Texas at Austin (공학석사)
- 1995년 8월 : University of Texas at Austin (공학박사)
- 1995년 5월 ~ 2008년 3월 : 삼성 SDS R&D Consultant
- 2008년 3월 ~ 2009년 8월 : 포항 지능로봇연구소 연구부장

- 2009년 9월 ~ 2012년 12월 : 한양대학교 기계정보경영학부 부교수
- 2013년 1월 ~ 2015년 8월 : 한양대학교 로봇공학과 부교수
- 2015년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 로봇공학과 교수

<관심분야>

로봇 설계 방법론, 고효율 에너지 로봇설계