

## 불가사리 채집용 4절 링크 매니플레이터의 최적 설계

### Optimal Design of a Four-bar Linkage Manipulator for Starfish-Capture Robot Platform

김지훈<sup>1</sup>, 진상록<sup>1</sup>, 김종원<sup>1</sup>, 서태원<sup>2,✉</sup>, 김종원<sup>3</sup>  
Jihoon Kim<sup>1</sup>, Sangrok Jin<sup>1</sup>, Jong-Won Kim<sup>1</sup>, TaeWon Seo<sup>2,✉</sup>, and Jongwon Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 기계항공공학부 대학원 (Graduate School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.)

<sup>2</sup> 영남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)

<sup>3</sup> 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.)

✉ Co-corresponding author: taewon\_seo@yu.ac.kr, Tel: +82-53-810-2442

Manuscript received: 2013.4.12 / Revised: 2013.7.16 / Accepted: 2013.8.14

*In this paper, we propose an optimal design for starfish capturing manipulator module with four-bar linkage mechanism. A tool link with compliance is attached on the four-bar linkage, and the tool repeats detaching starfish from the ground and putting it into the storage box. Since the tool is not rigid and the manipulator is operating underwater, the trajectory of the tool tip is determined by its dynamics as well as kinematics. We analyzed the trajectory of the manipulator tool tip by quasi-static analysis considering both kinematics and dynamics. In optimization, the lengths of each link and the tool stiffness are considered as control variables. To maximize the capturing ability, capturing stroke of the four-bar manipulator trajectory is maximized. Reaction force and reaction moment, and other kinematic constraints were considered as inequality constraints.*

Key Words: Four-bar Linkage (4절 링크), Optimal Design (최적설계), UVMS (수중 플랫폼-매니플레이터 시스템), Starfish Capturing (불가사리 채집), Quasi-static Analysis (준정적 해석)

#### 1. 서론

불가사리는 남해 해역의 마을어장과 패류어장에 서식하며 양식어중에 피해를 주고 수산자원을 황폐화하는 해적생물이다. 불가사리는 절단된 신체 일부를 다시 자라나게 하는 재생력이 강하며, 마땅한 구제방법과 천적이 없고 번식속도가 빨라 개체 수를 줄이기 쉽지 않고, 다 자란 불가사리 한 마리는 1년에 약 10 kg의 어패류를 포식하는 것으로 알려져 어촌에 매년 큰 피해를 주는 골치거리로 대두되고 있다.

불가사리 구제기구 개발을 위한 노력이 없지 않았으나,<sup>1-3</sup> 실질적인 효과가 적고 어장 생태계를

파괴시키는 등의 문제로 인해 널리 사용되지 못하였다. 현재는 어장에서 건어올린 그물에 붙어있는 불가사리를 어민들이 일일이 수작업으로 떼어내거나, 관련 지방자치단체의 지원으로 해녀와 스쿠버들이 해저에서 직접 채집하는 방식으로 불가사리를 구제하고 있다.<sup>4,5</sup> 그러나 이러한 방법들은 구제량에 비해 인적·물적 자원의 소모가 크고, 특히 해저에서 직접 불가사리를 채집하는 경우 장시간의 잠수는 인체에 해가 되는 등 전반적으로 비효율적인 면이 크다.

불가사리를 채집하는 수중로봇이 해녀와 스쿠버의 역할을 대신하여 이에 대한 해결책이 될 수 있다. 수중로봇이 채집기능을 갖추기 위해서는, 현

재 개발된 수중로봇의 큰 비율을 차지하는 탐사·정찰용 수중로봇과는 달리 채집작업을 위한 매니플레이터를 장착해야 한다. 현재 해저자원 개발, 해양 플랜트 건설 등 산업현장에서 실제 사용되는 수중 매니플레이터는 4~7 자유도의 열린 로봇 팔 구조가 일반적이고, 최근에는 문어다리의 생체모방형 매니플레이터<sup>6</sup> 등 다양한 구조의 수중 매니플레이터가 연구, 개발 중에 있다. 하지만 이러한 매니플레이터들은 동작의 반복성과 제어의 복잡성 등의 측면에서 불가사리 채집의 단순하고 반복적인 작업에는 활용하기 적절하지 않다.

이에 본 연구에서는 4절링크 원리를 이용한 불가사리 채집 기구부 메커니즘을 제안하고 이를 최적화하였다. 4절링크 구조는 단순한 회전운동을 일정한 궤적을 따라 반복하는 왕복운동으로 변환하고, 각 링크의 길이를 변화시켜 궤적의 형상을 다양하게 조절할 수 있기 때문에 불가사리 구제 작업의 반복적인 움직임을 구현하기 적합하다. 4절링크 구조의 최적화에 관련하여는 도마뱀 주행 모사 로봇의 다리 궤적,<sup>7</sup> 4절연쇄기구,<sup>8</sup> 2족 보행로봇 무릎 관절의 궤적<sup>9</sup> 등 다양한 분야에서, 순차적 2차 프로그래밍(SQP method),<sup>9</sup> 유전 알고리즘(Genetic algorithm),<sup>10</sup> 다중 목적 유전 알고리즘(Multi-objective genetic algorithm)<sup>11</sup> 등의 다양한 방법으로 4절링크 구조의 최적화 연구가 진행된 바 있지만, 각각의 사례에 국한되고 널리 적용하기 어렵다.

특히 본 연구에서는 강체로 이루어진 4절링크 뿐 아니라, 유연성이 있는 채집 기구가 더해지고 여기에 수중이라는 환경적 특성까지 고려되었다. 따라서 궤적의 형상이 링크 길이의 기구학적 특성 뿐 아니라 채집 기구의 강성, 4절링크 모터의 속도 등 동역학적 특성에도 영향을 받는 특징이 있다. 4절링크를 이용함으로써, 기구부의 제어와 불가사리의 반복적인 채집이 매우 용이하고, 불가사리의 위치, 해류 외란 등 작동 환경의 변화에 대해 강한 성능을 갖는다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 먼저 채집 기구부의 개념설계를 보이고, 3장에서 시뮬레이션으로 채집 기구부의 궤적을 구하는 과정을 보인다. 4장에서는 최적화 문제의 목적함수, 설계변수, 제한조건 등을 제시하고, 5장에서는 최적화의 결과를 도출, 분석하여, 최종적으로 6장에서 결론을 제시한다.

## 2.4 절링크 매니플레이터

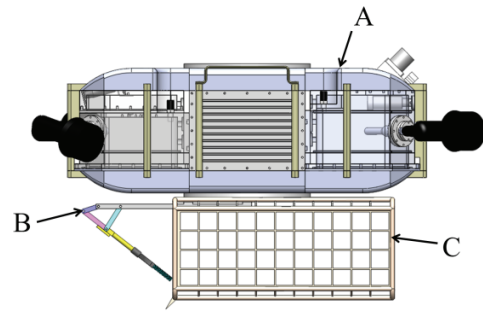


Fig. 1 Configuration of starfish capturing robot. A: Mobile underwater robotic platform. B: Starfish capturing manipulator with four-bar mechanism. C: Starfish storage box

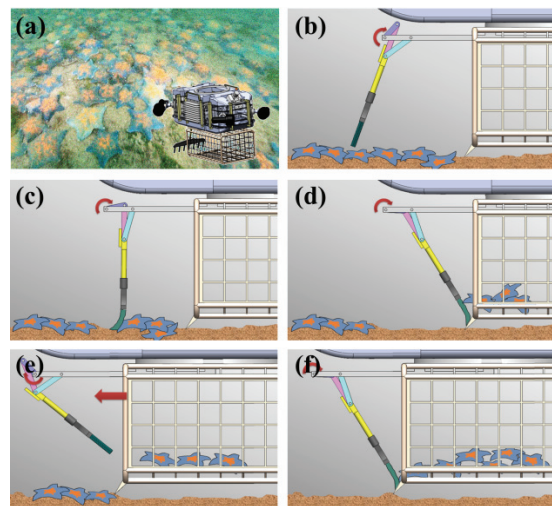


Fig. 2 Starfish capturing procedure

Fig. 1의 A와 같은 수중운행 플랫폼을 설계·제작한 바 있고,<sup>12</sup> 본 연구의 대상인 4절링크 매니플레이터는 Fig. 1의 B, C와 같이 플랫폼의 밑면에 모듈식으로 결합된다.

Fig. 2는 4절링크 매니플레이터가 불가사리를 채집하는 과정을 시간 순으로 보인 것이다. a) 로봇에 설치된 카메라를 통해 조종자가 불가사리가 근접하여 있는 장소를 발견 후, 조종하여 불가사리 근처로 이동한다. b) 로봇의 자세제어를 통해, 다량의 불가사리를 채집할 수 있는 적절한 위치와 자세에서 정지운행한다. c), d) 4절링크 구동모터가 작동함에 따라, 4절링크가 불가사리를 보관함쪽으로 이동시키고 저장한다. 이 때 링크의 끝단은 강체가 아닌 형태의 변형이 가능한 유연한 빗자루로

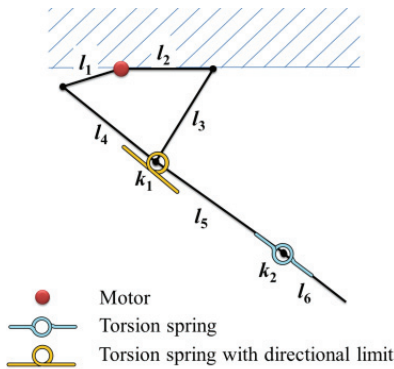


Fig. 3 Modeling of four-bar manipulator for simulation

되어 있어 로봇의 높이가 변하지 않아도 링크의 끝단이 바닥면과의 접촉을 유지하며 불가사리를 모두 채집할 수 있다. e) 1회의 채집이 완료된 후 로봇이 앞 쪽으로 이동하여 다음의 채집작업을 준비한다. 이 때 빗자루가 부착된 4절링크의 마지막 링크는 보관함에서 멀어지는 방향으로 이동하게 되는데, 그림과 같이 링크가 뒤쪽으로 회전하여, 빗자루가 지면을 반대방향으로 쓰는 일이 없도록 한다. f) b)~e)의 과정을 반복하여 다량의 불가사리를 연속적으로 채집한다. 실제 불가사리는 바닥면에 대해 접촉력이 거의 없으므로, 반복적으로 쓸어 담는 동작을 이용하여 빠른 속도로 불가사리를 포획할 수 있다.

본 연구에서는 수중환경에서 4절링크에서의 움직임을 Matlab Simulink를 이용하여 구현하였다. 시뮬레이션 상에서 4절링크 매니플레이터는 Fig. 3과 같이 간략화하여 모델링하였다.

Fig. 3과 같이 공간 상에 고정되어 있다고 가정 한 플랫폼에 4절링크의 링크2가 고정되어 있고, tool-link와 4절링크 사이에는 앞서 언급한 바와 같이 한 쪽 방향으로만 변형이 가능한 토션 스프링을 배치하였다.

또한 매니플레이터 끝단의 빗자루 솔과 같이 연속적으로 형태가 변화하는 형상은 수중이라는 환경적 특성에서 특히나 그 거동을 해석하기 쉽지 않다. 따라서 Fig. 3과 같이 빗자루 솔을 토션 스프링을 사이에 둔 두 강체 링크5와 링크6으로 단순화하였다.

### 3. 매니플레이터의 동역학 해석

본 장에서는 Matlab Simulink를 이용한 시뮬레

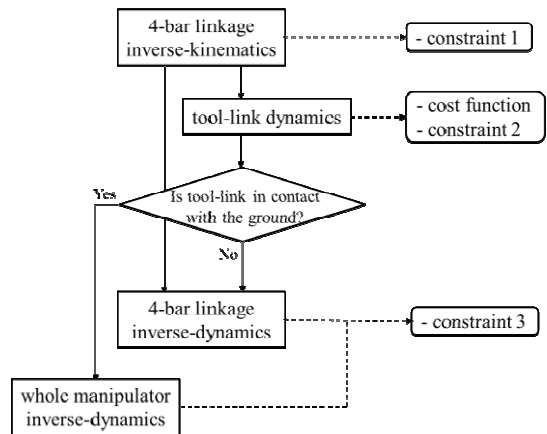


Fig. 4 Flow chart of the manipulator trajectory analysis

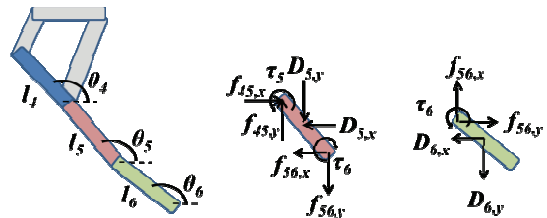


Fig. 5 Free body diagram of the tool links

이션 상에서 각 링크 사이의 내력, 토션 스프링의 복원력, 수중 항력, 지면과의 반력 등을 구현하여 매니플레이터의 움직임을 준정적으로 해석하고 계산하였다.

4절링크 매니플레이터를 이산 시간(discrete-time) 시스템으로 가정하고, 시간을 잘게 나누어 각 미소시간에서 준정적(quasi-static)하게 기구학, 동역학을 분석하여 매니플레이터의 거동을 해석하였다. 매니플레이터가 비틀림 스프링을 갖지 않고 강체 링크들로만 이루어져 있다면 동역학을 계산하지 않고 기구학으로만 매니플레이터의 궤적이 결정되지만, 링크가 스프링의 복원력과 수중 항력 등에 의해 각도가 변화하기 때문에 동역학을 풀어야 완전한 궤적을 구할 수 있다. Fig. 4는 전체 해석과정을 간단하게 순서도로 나타낸 것이다.

먼저 4절링크의 주동축이 등속으로 회전함에 따라, 4절링크를 이루는 네 관절의 위치와 속도가 정기구학으로 결정된다.

4절링크를 이루는 링크들의 기구학적 특성이 결정되면, 이를 이용해 두 링크와 두 비틀림 스프링으로 이루어진 강체 링크의 동역학을 분석할 수 있다.

Table 1 Definitions of symbols used in analysis

Symbol	Definition
$l_i$	length of $i$ -link
$r_i$	half of $l_i$
$\theta_i$	angle of $i$ -link
$c_i$	$\cos(\theta_i)$
$s_i$	$\sin(\theta_i)$
$x_i$	$x$ -coordinate of center of mass of $i$ -link
$y_i$	$y$ -coordinate of center of mass of $i$ -link
$m_i$	mass of $i$ -link
$I_i$	mass moment of inertia of $i$ -link
$f_{ij,x}$	reaction force between $i$ - and $j$ -link in $x$ -coordinate
$f_{ij,y}$	reaction force between $i$ - and $j$ -link in $y$ -coordinate
$D_{i,x}$	drag force of $i$ -link in $x$ -coordinate
$D_{i,y}$	drag force of $i$ -link in $y$ -coordinate
$\tau_i$	spring torque between $i$ - and $(i-1)$ -links

강체 링크의 자유물체도를 그려보면 Fig. 5와 같고, 해석에 쓰이는 심볼들을 Table 1에 정리하였다.

두 링크에 대해 수평방향 힘, 수직방향 힘, 모멘트의 힘 평형 방정식을 세우면 아래와 같다. 이 단계에서는 링크의 움직임에 따른 수중항력, 링크들 간의 내력, 지면과 접촉 시에 발생하는 반력이 고려된다.

$$f_{45,x} - f_{56,x} - D_{5,x} + \frac{\tau_5}{r_5} s_5 + \frac{\tau_6}{r_5} s_5 = m_5(\ddot{x}_4 + r_5 c_5 \dot{\theta}_5^2 + r_5 s_5 \ddot{\theta}_5), \quad (1)$$

$$f_{45,y} - f_{56,y} - D_{5,y} - \frac{\tau_5}{r_5} c_5 - \frac{\tau_6}{r_5} c_5 = m_5(\ddot{y}_4 + r_5 s_5 \dot{\theta}_5^2 - r_5 c_5 \ddot{\theta}_5), \quad (2)$$

$$\tau_5 - \tau_6 + r_5 f_{45,y} c_5 + r_5 f_{56,x} s_5 - r_5 f_{45,x} s_5 - r_5 f_{56,y} c_5 = I_5 \ddot{\theta}_5, \quad (3)$$

$$f_{56,x} - D_{6,x} + \frac{\tau_6}{r_6} s_6 = m_5(\ddot{x}_4 + l_5 c_5 \dot{\theta}_5^2 + l_5 s_5 \ddot{\theta}_5 + r_6 c_6 \dot{\theta}_6^2 + r_6 s_6 \ddot{\theta}_6), \quad (4)$$

$$f_{56,y} - D_{6,y} - \frac{\tau_6}{r_6} c_6 = m_5(\ddot{y}_4 + l_5 s_5 \dot{\theta}_5^2 - l_5 c_5 \ddot{\theta}_5 + r_6 s_6 \dot{\theta}_6^2 - r_6 c_6 \ddot{\theta}_6), \quad (5)$$

$$\tau_6 - D_{6,x} r_6 s_6 + D_{6,y} r_6 c_6 = (I_6 + m_6 r_6^2) \ddot{\theta}_6 \quad (6)$$

위 식에서 미지수는 링크들 간의 내력  $f_{45,x}$ ,  $f_{45,y}$ ,  $f_{56,x}$ ,  $f_{56,y}$  와 두 링크 각도의 2계 변화율  $\dot{\theta}_5$ ,  $\dot{\theta}_6$  로, 미지수와 식의 수가 6으로 같게 되고 이는 간단한 행렬의 계산으로 풀 수 있게 된다. 이 때 수중항력 등의 계산에 필요한 두 링크의 위치와 속도는  $\dot{\theta}_5$  와  $\dot{\theta}_6$  을 적분한 결과를 되먹임하여 사용한다.

이러한 준정적 동역학 해석과정을 행렬로 정리하면 아래와 같다.

$$[f_{45,x} \ f_{45,y} \ f_{56,x} \ f_{56,y} \ \ddot{\theta}_5 \ \ddot{\theta}_6]^T = A^{-1}b, \quad (7)$$

where,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & -m_5 r_5 s_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & m_5 r_5 c_5 & 0 \\ -r_5 s_5 & r_5 c_5 & r_5 s_5 & -r_5 c_5 & -I_5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -m_6 l_5 s_5 & -m_6 r_6 s_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & m_6 l_5 c_5 & m_6 r_6 c_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_6 + m_6 r_6^2 \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} D_{5,x} - \frac{\tau_5}{r_5} s_5 - \frac{\tau_6}{r_5} s_5 + m_5 \ddot{x}_4 + m_5 r_5 c_5 \dot{\theta}_5^2 \\ D_{5,y} + \frac{\tau_5}{r_5} c_5 + \frac{\tau_6}{r_5} c_5 + m_5 \ddot{y}_4 + m_5 r_5 s_5 \dot{\theta}_5^2 \\ -\tau_5 + \tau_6 \\ D_{6,x} - \frac{\tau_6}{r_6} s_6 + m_6 \ddot{x}_4 + m_6 l_5 c_5 \dot{\theta}_5^2 + m_6 r_6 c_6 \dot{\theta}_6^2 \\ D_{6,y} + \frac{\tau_6}{r_6} c_6 + m_6 \ddot{y}_4 + m_6 l_5 s_5 \dot{\theta}_5^2 + m_6 r_6 s_6 \dot{\theta}_6^2 \\ \tau_6 - D_{6,x} r_6 s_6 + D_{6,y} r_6 c_6 \end{bmatrix}$$

위와 같은 과정을 통해 강체 링크 끝단의 궤적을 구할 수 있다. 이를 이용하여 4장에 제시되어 있는 목적함수와 제한조건을 계산한다.

두 번째 제한조건인 플랫폼으로의 반력은 빗자루 링크의 동역학뿐만 아니라, 4절링크의 동역학까지 고려하여야 구할 수 있다. 4절링크의 경우 앞의 단계를 통해 기구학은 결정되어 있고, 역동역학 해석을 통해 주어진 움직임을 만들어내는 주동축의 필요토크, 그리고 4개의 관절에서 나타나는 링크 내력을 구할 수 있다. 이 단계에서 미지수는 4절링크의 네 조인트에서의 내력과 주동축 구동모터의 토크이다. 네 조인트에서의 내력을 각각 수평

방향과 수직방향으로 분해하여 총 미지수의 수는 9개이고, 식의 개수 또한 1, 3, 4번째 링크의 운동 방정식을 세워 9개를 얻을 수 있다. 앞의 과정과 비슷한 경우로, 다음과 같이 간단한 계산으로 링크들 간의 내력과 주동축 구동 토크를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_{12,x} & f_{12,y} & f_{23,x} & f_{23,y} & f_{34,x} & f_{34,y} & f_{41,x} & f_{41,y} & \tau \end{bmatrix}^T = A^{-1}b, \quad (8)$$

where,

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & c_1/r_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & s_1/r_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_1c_1 & l_1s_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_4s_4 & -r_4c_4 & r_4s_4 & -r_4c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -l_3c_3 & -l_3s_3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$b = [m_1\ddot{x}_1 \quad m_1\ddot{y}_1 \quad 0 \quad m_4\ddot{x}_4 \quad m_4\ddot{y}_4 \quad I_4\ddot{\theta}_4 \quad m_3\ddot{x}_3 \quad m_3\ddot{y}_3 \quad I_3\ddot{\theta}_3]^{-T}$$

위는 매니플레이터 끝단이 지면에 접촉하지 않을 때의 해석이다. 매니플레이터 끝단이 지면과 접촉하고 있을 때에는 시스템이 기구학적으로 완전하게 정의된다. 따라서 위의 단계를 생략하고 바로 역동역학을 풀어 각 링크들 간의 내력과 플랫폼으로의 반력, 모멘트를 구할 수 있다.

#### 4. 최적화 문제 정의

본 연구에서는 매니플레이터의 성능을 불가사리 채집 효율으로 규정하고, 이를 최대화하고자 하였다. 최적화의 목적 함수, 설계변수, 제한조건 등은 아래와 같다.

##### 4.1 최적화의 목적함수

매니플레이터의 채집 작업효율을 높이기 위하여, 1회 작업 시 불가사리를 채집 가능한 작업범위를 최대화하고자, 4절링크 매니플레이터가 1회 작업 시 강제 링크가 지면을 쓸게 되는 거리 (L)를 최적화 목적함수로 설정하였다. 이를 채집가능거리라 하였으며, Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6에서  $R_x$ ,  $R_y$ 는 매니플레이터에 의한 반력 힘을 나타내며,  $M$ 은 반력 모멘트를 나타낸다.

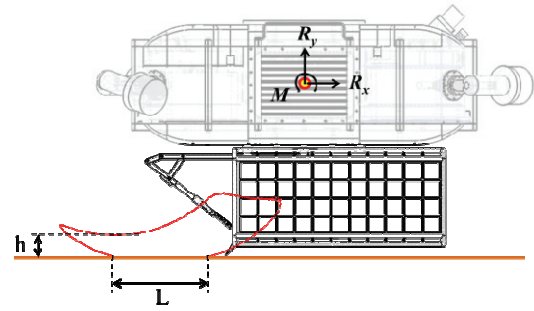


Fig. 6 Cost function and constraints of the optimization. Red line denotes trajectory of the end-effector and red circle denotes the position of center of mass

Table 2 Control variables for the optimization problem

Notation	Description
$l_1, l_2, l_3, l_4$	Length of each link in four-bar linkages
$l_5, l_6$	Length of tool links
$k_1, k_2$	Stiffness of tool joints

#### 4.2 최적화의 설계변수

Fig. 3의 모델링에서 사용된 각 링크의 길이와 두 스프링 상수는 빗자루 끝단의 궤적을 기구학적, 동역학적으로 결정하는 인자들이다. 이 뿐 아니라 4절링크 주동축의 회전속도에 따라 각 링크의 속도가 달라지고, 이는 수중항력 등 시스템 동역학을 통해 전체 궤적에 영향을 준다. 또한 Fig. 6에 도시된 지면의 깊이, 즉 로봇 플랫폼이 지면과 유지하는 거리 또한 전체 궤적과 채집가능거리에 영향을 준다. 4절링크의 주동축 회전속도는  $\pi/3$  rad/sec로 고정하고, 플랫폼과 지면 사이의 거리는 300mm로 고정하였다. 이에 본 최적화 문제의 설계변수를 정리하면 Table 2에 정리하였다.

#### 4.3 최적화의 제한조건

##### 4.3.1 매니플레이터의 기하학 조건

최적화의 과정에서 설계변수가 임의의 값으로 변화했을 때, 그 때의 설계변수 값에서 항상 목적 함수를 계산할 수 있는 것은 아니다. 가장 먼저 4절링크를 이루는 링크의 길이  $l_1, l_2, l_3, l_4$ 가 기하학적으로 4절링크를 이룰 수 있어야 하며, 스프링상수  $k_5, k_6$ 가 적당한 범위에 있어 빗자루 끝단의 위치가 발산하지 않고, 어떠한 형태의 궤적으로 수렴해야 한다. 또한 궤적이 수렴했을 때에도, 빗자루 끝단은 지면과 접촉하면서 강제 링크의 중간

조인트의 궤적은 지면과 닿지 않는다는 조건을 만족하여야 한다.

이러한 조건들을 만족하는 설계변수의 범위에서 최적화 목적함수인 채집가능거리를 계산할 수 있다.

**4.3.2 경로의 높이 차**

채집 기구가 보관함으로 불가사리를 수집한 후 다음 작업을 위해 빗자루 링크가 보관함으로부터 멀어질 때, 강체 링크 끝단의 높이가 일정 거리 이하가 될 경우 불가사리를 로봇에서 더 먼 쪽으로 밀어내어, 다음 채집 작업 시 작업효율 감소의 우려가 있다. 따라서 경로의 높이 차가 일정 수준 이상을 유지하도록 제한조건을 두었다. 실제 어촌에 피해를 주고 있는 종인 별 불가사리와 아무르 불가사리의 평균 높이가 약 10mm임을 고려하여, 충분한 높이인 30mm를 높이 차의 제한조건으로 고려하였다.

$$h_1 = -h(l_i, k_j) + 30mm \leq 0, \quad (9)$$

**4.3.3 운항 플랫폼으로의 반력, 모멘트**

본 연구의 시뮬레이션에서는 매니플레이터가 부착된 플랫폼이 공간 상에 고정되어 있다고 가정하였다. 그러나 실제 상황에서는 4절링크의 운동에 의한 수중항력과 지면과의 접촉 등으로 인해 발생하는 힘과 모멘트가 플랫폼에 전달되고, 이는 수중 운항 플랫폼의 자세제어에 외란으로 작용한다. 이는 플랫폼의 자세제어기로 일정 수준 극복할 수 있으나, 제어의 측면에서 이는 클수록 좋지 않은 값이므로, 이를 일정한 수준 이하로 유지시키는 제한조건을 두었다. 추진기의 추력과 제어기의 성능을 고려하여, x, y 방향의 반력, 플랫폼 무게 중심에서의 모멘트를 각각 30 N, 40 N, 10 Nm로 제한하였다.

$$h_2 = R_x(l_i, k_j) - 30N \leq 0, \quad (10)$$

$$h_3 = R_y(l_i, k_j) - 40N \leq 0, \quad (11)$$

$$h_4 = M(l_i, k_j) - 10N \cdot m \leq 0, \quad (12)$$

**4.4 최적화 도구**

본 최적화 연구에서는 최근 새롭게 개발한 하이브리드 다구찌-랜덤 좌표 추적 알고리즘(Hybrid Taguchi-Random order Coordinate search Algorithm,

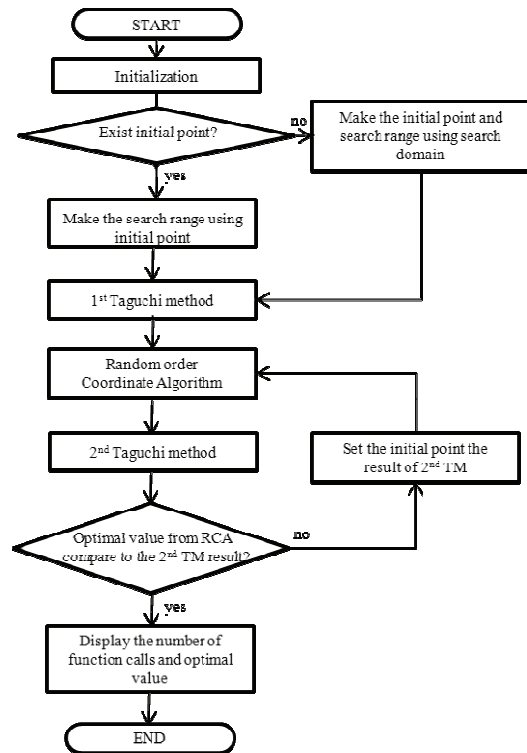


Fig. 7 Flow chart of the hybrid Taguchi-random order coordinate algorithm

HTRCA) 방법을 사용하였다. 이는 넓은 범위에서 빠르게 최적값을 찾는 다구찌 방법론(Taguchi method)과, 초기값의 근처에서 최저점(minimum)을 찾는 랜덤 좌표 추적(random order coordinate search) 알고리즘을 혼합한 것이다. 본 최적화 알고리즘의 순서도를 Fig. 7에 도시하였다. 먼저 다구찌 방법론을 한 번 사용하여 넓은 범위에서 최소값을 찾고, 그 값을 다시 초기값으로 랜덤 좌표 추적을 사용하여 보다 주변의 국소 최적점(local minimum)을 찾아간다. 국소 최저점에 수렴하면 다시 다구찌 방법론 등을 사용하여 국소 최저점에서 벗어나려고 시도하면서 전역 최소점(global minimum)을 찾아가는 기법이다. 본 알고리즘을 이용하면 전역 최소점을 높은 성공률로 찾을 수 있고, 고차원 함수의 문제도 높은 신뢰도로 최적화를 수행할 수 있다는 장점이 있다.

**5. 최적화 결과**

먼저 최적화를 통해 변화한 설계변수의 값들을

Table 3 Optimization results

	Initial value	Optimal value
$l_1$ [m]	0.080	0.080
$l_2$ [m]	0.100	0.108
$l_3$ [m]	0.100	0.104
$l_4$ [m]	0.100	0.100
$l_5$ [m]	0.120	0.132
$l_6$ [m]	0.100	0.112
$k_1$ [Nm/rad]	0.500	1.104
$k_2$ [Nm/rad]	0.500	0.900
Capturing stroke [m]	0.189	0.296

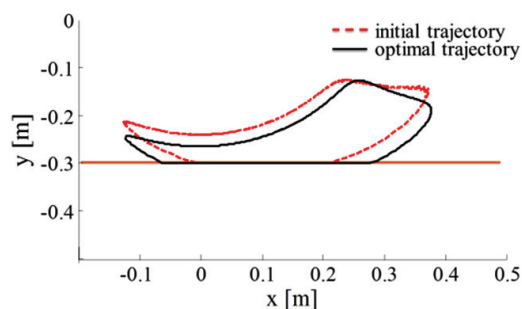


Fig. 9 Initial and optimized trajectory

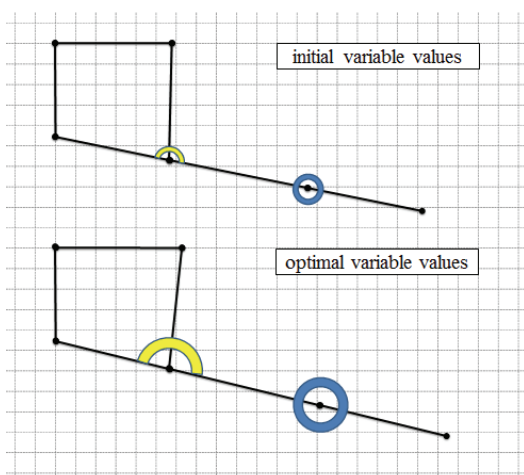


Fig. 8 Initial and optimized values of control variables

Table 3에 정리하였고, 이를 Fig. 8에서 도시화하였다. 빗자루 링크의 조인트에 위치한 원과 반원의 크기는 스프링 상수값에 비례하게 그려, 링크 길이의 변화와 함께 스프링 상수값의 변화도 시각적으로 표현하였다.

본 최적화 연구에서 사용한 HTRCA 방법에서는 설계변수 중 링크의 길이 변수에서는 4 mm를 최소단위 스텝 크기(step size)로 설정하였기 때문에, 위와 같이 설계변수의 초기값에서 4 mm의 배수만큼 차이 나는 최적값을 얻었다.

설계변수의 초기값과 최적값에서의 매니플레이터 끝단의 궤적은 Fig. 9와 같다. 목적함수인 채집가능거리는 초기값에서 189.3mm이고 최적값에서는 295.5mm로, 최적화를 통해 채집가능거리가 약 56% 증가하였다.

그리고 최적화된 궤적에서,  $h_1 = -6$ ,  $h_2 = -25.88$ ,  $h_3 = -25.98$ ,  $h_4 = -6.88$  로 제한조건 (9)-(12)를 만족하여, 본 연구에서 얻은 설계변수의 최적값은 제

한조건 내에서 능동적인 제한조건에 걸리지 않고, 최적값에 수렴했음을 알 수 있다.

설계변수의 값이 초기값에서 크게 멀어지지 않은 이유는 목적함수인 채집가능거리를 구할 수 있어야 한다는 첫 번째 제한조건을 만족하는 설계변수의 범위가 제한적이기 때문이다. 설계변수가 조금만 변화해도 궤적의 형상과 위치가 민감하게 변하여, 매니플레이터 끝단이 지면을 쓸지 않거나 끝단 뿐 아니라 다른 링크까지 지면을 쓸게 되는 등 다양한 방향에서 제약이 걸리기 때문이다.

설계변수의 최적값이 초기값에서 크게 변화하지 않았지만 목적함수가 56% 증가한 점으로 보아 매니플레이터의 끝단이 각 링크의 길이, 그리고 비틀림 스프링의 스프링 상수에 민감도가 크다는 결론을 내릴 수 있다. 따라서 4절링크를 이용한 기구부를 설계할 때는 반드시 적절한 제한조건에서 최적화를 수행하여야 함을 확인하였다.

## 6. 결론

본 연구에서는 수중 정지운항 플랫폼에 부착되어 유해생물인 불가사리를 채집하는 기능을 수행하는 4절링크 매니플레이터를 제시하였다. 매니플레이터의 개념설계를 수행한 후 수중에서 매니플레이터의 기구학적/동역학적인 해석을 통하여 매니플레이터 끝단의 궤적을 계산하였다. 그리고 매니플레이터가 불가사리를 쓸어담을 수 있도록 끝단이 지면과 접촉을 유지하는 거리를 채집가능거리로 정의하고 이를 최대화하는 최적화를 수행하였다. 수행 결과 설계변수의 값이 크게 변화하지 않았음에도 목적함수인 채집가능거리는 56% 향상되었음을 확인하였다. 추후 실제 매니플레이터의 성능 검증을 위해 본 매니플레이터의 시작품을 제작하여 실험을 수행할 예정이다.

## 후 기

이 논문은 2013 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0009596).

## 참고문헌

1. Kim, T., Kim, H., Kim, C., Baek, C., Park, C., and Hwang, G., "Drag type apparatus for capturing starfish," KOR Patent, No. 1003790240000, 2003.
2. Kim, T., Kim, H., Kim, C., Baek, C., Park, C., and Hwang, G., "Roller type gear for continuous harvesting of starfish," KOR Patent, No. 1003790270000, 2003.
3. Han, J. and Gye, H., "An apparatus and method for capturing starfish in the sea," KOR Patent, No. 1020070111077, 2007.
4. Lee, M., "Jeollabuk-do purchases starfish from fishermen," [http://www.newsis.com/ar\\_detail/view.html?cID=&ar\\_id=NISX20120826\\_0011392418](http://www.newsis.com/ar_detail/view.html?cID=&ar_id=NISX20120826_0011392418)(Accessed 31 January 2012)
5. Lee, J., "100 Scuba Divers Exterminating Starfish," <http://www.ilyoseoul.co.kr/news/articleView.html?idxno=69000> (Accessed 31 January 2012)
6. Zheng, T., Branson, D. T., Rongjie, K., Cianchetti M., Guglielmino, E., Follador, M., Medrano-Cerda, G. A., Godage, I. S., and Caldwell, D. G., "Dynamic Continuum Arm Model for Use with Underwater Robotic Manipulators Inspired by Octopus Vulgaris," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 5289-5294, 2012.
7. Kim, J., Kim, J., and Choi, D., "Optimization of Hind Foot Trajectory Using Four Bar Linkage for Lizard Inspired Robot," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 209-210, 2012.
8. Kim, H., "Optimal Design of Four-bar Mechanism in Consideration of Tolerances and Clearances," Proc. of KSPE Autumn Conference, Vol. 2, No. 3, pp.70-76, 1985.
9. Arnaud, H. and Yannick A., "Walking Trajectory Optimization with Rotation of the Feet for a Planar Bipedal Robot with Four-bar Knees," The ASME 2012 11<sup>th</sup> Biennial Conference On Engineering Systems Design and Analysis, 2012.
10. Nariman-Zadeh, N., Felezi, M., Jamali, A., and Ganji, M., "Pareto Optimal Synthesis of Four-bar Mechanisms for Path Generation," Mechanism and Machine Theory, Vol. 44, No. 1, pp. 180-191, 2009.
11. Khorshidi, M., Soheilypour, M., Peyro, M., Atai, A., and Shariat Panahi, M., "Optimal Design of Four-bar Mechanisms Using a Hybrid Multi-objective GA with Adaptive Local Search," Mechanism and Machine Theory, Vol. 46, No. 10, pp. 1453-1465, 2011.
12. Jin, S., Lee, S., Kim, J., and Seo, T., "Starfish Capture Robotic Platform: Conceptual Design and Analysis," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 29, No. 9, pp. 978-985, 2012.