

◆ 특집 ◆ 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇의 설계 및 생산 기술 개발

멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇을 위한 요소 기술 개발

Development Fundamental Technologies for the Multi-Scale Mass-Deployable Cooperative Robots

주종남<sup>1,✉</sup>, 김한<sup>1</sup>, 김정률<sup>1</sup>, 송성혁<sup>1</sup>, 고제성<sup>1</sup>, 허승주<sup>2</sup>,  
하창수<sup>1</sup>, 김종원<sup>1</sup>, 안성훈<sup>1</sup>, 조규진<sup>1</sup>, 홍성수<sup>2</sup>, 이동준<sup>1</sup>

Chong Nam Chu<sup>1,✉</sup>, Haan Kim<sup>1</sup>, Jeongryul Kim<sup>1</sup>, Sung-Hyuk Song<sup>1</sup>, Je-Sung Koh<sup>1</sup>, Sungju Huh<sup>2</sup>,  
ChangSu Ha<sup>1</sup>, Jong Won Kim<sup>1</sup>, Sung-Hoon Ahn<sup>1</sup>, Kyu-Jin Cho<sup>1</sup>, Seong Soo Hong<sup>2</sup>, and Dong Jun Lee<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (Department of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National Univ.)

✉ Corresponding author: cnchu@snu.ac.kr, Tel: +82-2-880-7136

Manuscript received: 2012.11.9 / Accepted: 2012.11.19

*'Multi-scale mass-deployable cooperative robots' is a next generation robotics paradigm where a large number of robots that vary in size cooperate in a hierarchical fashion to collect information in various environments. While this paradigm can exhibit the effective solution for exploration of the wide area consisting of various types of terrain, its technical maturity is still in its infant state and many technical hurdles should be resolved to realize this paradigm. In this paper, we propose to develop new design and manufacturing methodologies for the multi-scale mass-deployable cooperative robots. In doing so, we present various fundamental technologies in four different research fields. (1) Adaptable design methods consist of compliant mechanisms and hierarchical structures which provide robots with a unified way to overcome various and irregular terrains. (2) Soft composite materials realize the compliancy in these structures. (3) Multi-scale integrative manufacturing techniques are convergence of traditional methods for producing various sized robots assembled by such materials. Finally, (4) the control and communication techniques for the massive swarm robot systems enable multiple functionally simple robots to accomplish the complex job by effective job distribution.*

Key Words: Multi-scale (멀티 스케일), Mass-deployable (다중 전개형), Swarm Robotics (군집로봇), Cooperation (협업), Composite Material (복합소재), Manufacturing (생산기술), Adaptive Mechanism (적응형 메커니즘), Distributed Communication (분산통신), Precision Machining (정밀가공)

## 1. 서론

예측이 어려운 재난 상황이나 다양한 환경을 극복하기 위한 다양한 기능을 가진 단일 로봇들이 개발되고 있다. 하지만 이러한 로봇들은 일본 후쿠시마 원전 사고 사례에서 알 수 있듯이, 임무 수행

시 발생할 수 있는 수 많은 일들 중 예측되었던 로봇의 극복 성능에서 한 가지라도 벗어나는 환경에 직면하게 되는 경우 임무 수행에 실패하게 되는 한계가 있다.<sup>1</sup>

이러한 문제 해결을 위해 본 연구에서는 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇 시스템(Multi-scale

mass-deployable cooperative robot system)이란 개념을 제시한다. 다양한 크기의 많은 로봇들은 다양한 환경에서 계층적 협업을 통해 장애물 극복 능력을 극대화 할 수 있다. 그 예로 대형 로봇은 장거리를 빠르게 주행하는 것에 유리하며, 언덕이나 계단과 같은 장애물을 극복하는데 유리하다. 반대로 소형 로봇의 경우 틈이나 구멍과 같은 협소한 공간을 주행하는 것이 가능하며, 상대적으로 작은 질량으로 벽을 등반하는데 유리하다.

본 논문에서는 이러한 다중 전개형 협업 로봇 시스템 구현을 위한 요소 기술에 대한 연구들을 소개하고자 한다. 2 절에서는 고정된 메커니즘을 적용 가능한 지형에 제한적 사용하는 기존의 연구와는 다른, 메커니즘 자체가 다양한 지형에도 적용 가능하도록 설계된 적응형 메커니즘을 소개한다. 3 절에서는 링크와 기어를 이용한 기존 메커니즘이 가지는 공간적 및 물리적인 한계를 극복 가능한 연성 복합 소재 및 지능형 재료의 연구를 소개한다. 4 절에서는 가공 크기에 있어 제한적인 기존 가공 기술을 극복한 멀티 스케일 생산 기술을 소개한다. 5 절에서는 다수의 로봇이 계층적으로 협업을 가능하도록 하는 개선된 군집 제어 및 통신 기술을 소개한다.

**2. 적응형 메커니즘 설계**

멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇이 적용되는 환경은 재난 현장과 같이 지형에 불확실성이 존재하는 곳이다. 이러한 환경에서 기존 로봇의 경우에는 메커니즘이 고정되어 있어 자신의 메커니즘이 적용 가능한 지형만 제한적으로 주행하는 방법을 선택한다. 하지만 이러한 기존 로봇은 기본적으로 로봇이 주행할 수 있는 지역이 한정적이고, 탐색에 필요한 필요 장치로 인한 부가 비용이 발생하는 한계가 있다.

본 연구에서는 기존 연구의 한계를 기계적 메커니즘 단계에서부터 해결 가능한 적응형 메커니즘을 설계하고자 한다. 적응형 메커니즘이란 메커니즘이 고정된 것이 아니라 다양한 환경에 적용 가능하도록 메커니즘 자체가 유연하게 변경 가능한 메커니즘을 말한다. 이 메커니즘은 환경에 대한 유연성이 강점으로 강성이 강한 부품만을 사용한 기존의 방식을 그대로 사용하는 것이 불가능하기 때문에 새로운 설계 방법을 필요로 한다.

본 연구에서는 적응형 메커니즘의 해답을 생물

에서 찾아 생체를 모사하여 연구하는 생체 모사 연구를 수행하고, 그 연구의 예로 그리퍼(gripper)에 대하여 소개하고자 한다.

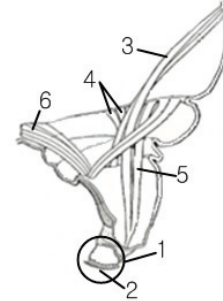


Fig. 1 Right leg and muscles, posterior view<sup>2</sup>

기존의 그리퍼는 다양한 환경에서 그 역할을 수행하기 위해서 많은 수의 액추에이터와 링크, 그리고 기계 부품을 필요로 한다. 이렇게 개발된 그리퍼는 그 부품의 크기로 인해 크기가 작아지는데 제한이 있고, 부품의 강성으로 인해 다양한 물체를 잡는데 한계가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위한 방법을 생물에서 찾아보면 애벌레의 그립 메커니즘을 찾을 수 있다. 애벌레는 단순한 구조와 단순한 원리로 자연계에 존재하는 다양한 표면들을 잘 잡는데 그 핵심 원리는 Figure 1 에 나타난 플란타(planta)라는 부분이다. 플란타는 다소 부드러운 큐티클 조직으로 표면에 닿을 때, 표면의 모양에 따라 수동적으로 대변형을 일으켜 거칠고 굴곡이 심한 표면을 성공적으로 잡게 된다.

이러한 애벌레의 그립 메커니즘을 부족 구동 방식(under-actuation)과 수동 연성 메커니즘(passive compliance)을 통해 Figure 2 에 나타난 것과 같은 그리퍼를 디자인하였다.

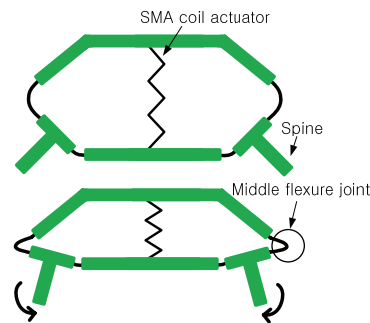


Fig. 2 Concept design of the bio-inspired gripper

전체적인 구조의 모습은 에벌레의 다리를 연상케 한다. 위로부터 그리퍼는 아래쪽으로 휘어 있는 위 판과 아래 판으로 구성 되어있다. 위 판과 아래 판은 여러 쌍의 연성 링크들로 이어져 있다. 연성 링크는 길이가 다소 긴 중간 연성 조인트와 발톱이 붙어있는 중간 강체 링크, 그리고 아래쪽 짧은 연성 조인트의 직렬 연결된 것을 말한다.

이 그리퍼는 에벌레 다리 끝이 대변형이 일어나는 것과 같은 원리인 좌굴현상을 이용하여 적합한 길이의 연성 필름에 좌굴을 만들어 다리의 변형 정도가 다르더라도 일정 구간 동안 같은 힘을 내도록 한다.



(a) Gripper attached to a tree and stone



(b) Magnification

Fig. 3 Fabricated bio-inspired gripper

제작된 그리퍼를 통해 다양한 표면에 대해 그리핑 테스트를 진행하였다. Figure 3(a)는 140 mg의 그리퍼가 약 3 g의 무게를 거친 표면의 나무와 돌에서 지탱하며 잡고 있는 것을 보여준다. Figure 3(b)는 다리 부분을 확대한 사진으로 좌굴 현상을 이용하여 표면을 적응적으로 잡는 것을 볼 수 있다.

실험을 통하여 본 그리퍼는 소형 그리핑 모듈로써 다양한 표면에 대하여 그 성능을 입증하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇 중 소형 로봇에 장착되어 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 연성 복합 소재 및 지능형 재료 연구

기어나 링크를 사용하는 기존의 로봇들이 다양한 움직임을 구현하기 위해서는 움직임의 자유도에 따라 액추에이터나 링크 구조의 수가 많아야 한다. 자연스럽게 로봇의 크기는 증가하고 기구는 복잡하게 되며, 이는 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇에서의 소형 및 중형 로봇이 구현되는 것에 제한 조건으로 작용하게 된다. 대형 로봇의 경우에도 크기와 무게가 증가하므로 동작의 효율성 측면에서 매우 좋지 않다.

따라서 본 연구에서는 연성 복합 소재와 지능형 재료의 조합을 통해 가볍고 간결한 구조만으로 연성 메커니즘을 구현하여 구동의 효율성을 높이고 환경 적응력을 극대화 할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

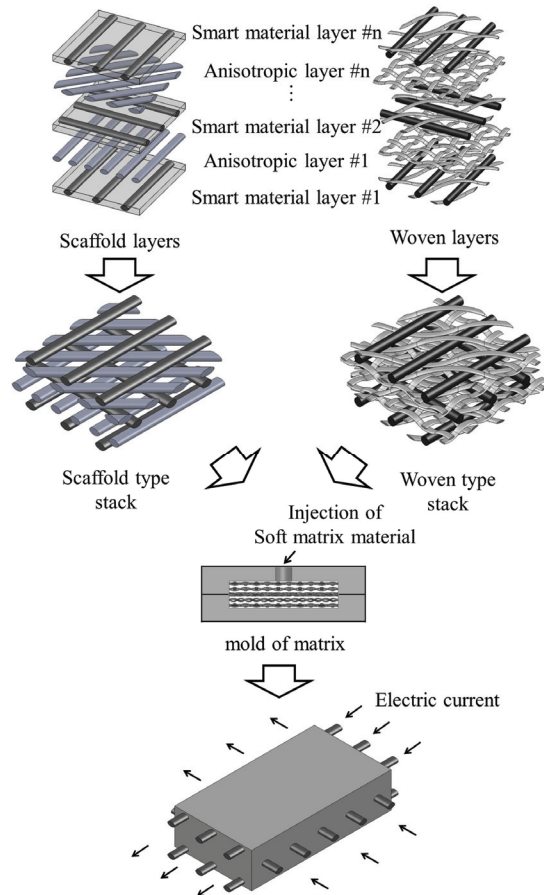


Fig. 4 Fabrication processes of two type of anisotropic materials for SSC<sup>3</sup>

연성 복합 소재를 로봇에 적용하기 위한 로봇 설계의 기초가 되는 구동부에 대한 응용 방안으로 지능형 연성 복합재(SSC, Smart Soft Composite)가 있다.<sup>2</sup> 지능형 연성 복합재는 지능형 재료를 이용해 구동력을 발생시키며 방향성 재료를 이용하여 굽힘, 면내 변형, 비틀림 변형 등의 다양한 구동 현상을 구현하는 것을 특징으로 한다.

방향성 재료의 경우 Figure 4 에서 보이는 바와 같이 지지체(scaffold) 혹은 직조(woven) 형태로 구성이 가능하며 또한 이 두 가지를 동시에 구현하는 것도 가능하다. 복합재 특성을 이용하여 목적 구동 현상에 대한 방향성 재료의 설계가 이루어지게 된다. 지능형 재료로는 형상기억합금(SMA, Shape Memory Alloy)을 사용하거나 IPMC (Ionic Polymer-metal Composite)등이 사용될 수 있다.<sup>5</sup> 이러한 방향성 재료들과 지능형 재료로 구성되는 각 구성 요소들은 연성 폴리머 재질로 구성되는 기저 재료를 통해 결합되게 된다.

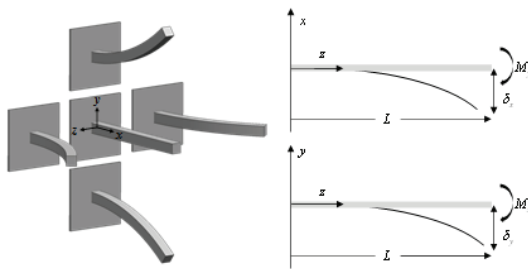


Fig. 5 Geometrical configuration of biaxial IPMC actuator<sup>4</sup>

이러한 연성 복합 소재 및 지능형 재료를 통해 Figure 5 에 보이는 것과 같은 IPMC 구동기를 제작하였다. 이 IPMC 구동기는 기존의 모터 기반 로봇과는 다르게 구조물 자체가 변형되는 것으로, 간단한 구조지만 2 축으로 휘어지는 운동이 가능하다.

본 구동기는 본 연구에서 제안한 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇 중 중형 및 소형 로봇에 적용되어 다양한 지형을 극복하는데 이용될 것으로 기대된다.

#### 4. 멀티 스케일 생산 기술

각종 신소재와 스마트 재료를 사용한 신개념의 요소 부품 및 통합적으로 설계되는 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇을 제작하기 위해서는 신

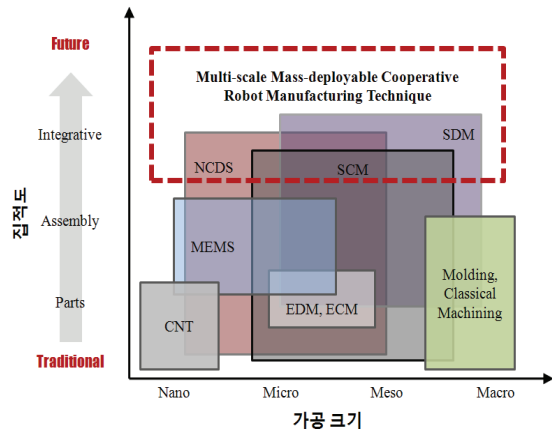


Fig. 6 Categorization of manufacturing method by scale

개념의 생산 기술들에 대한 기반 연구를 수행할 필요가 있다. 기존 생산 공정은 부품 제작을 위주로 하고 있으며, Figure 6 에서와 같이 가공 크기에 있어서도 제한적으로 공정을 수행할 수밖에 없다. 또한 추가로 개별적으로 생산된 부품을 조립하기 위한 공정, 전자 부품과의 통합을 위한 공정 등이 필요하다. 이러한 기존 생산 기술의 한계를 극복하기 위한 멀티 스케일 생산 기술에 대한 연구가 수행되었다.

멀티 스케일 생산 기술은 크게 지능 복합재 제조(SCM, Smart Composite Manufacturing), 쾌속조형(RP, Rapid Prototyping)과 같은 적층공정(layered manufacturing), 미세방전가공( $\mu$ EDM), 미세전해가공( $\mu$ ECM), 레이저 빔 가공과 같은 정밀가공(precision machining), 나노 복합재 적층 가공(NCDS, Nano Composite Deposition System), 형상 적층 제조(SDM, Shape Deposition Manufacturing)와 같은 멀티 스케일 통합생산 (MIM, Multi-scale Integrative Manufacturing)으로 구성되며, 전통적인 제조방법을 벗어난 다양한 공정의 조합 및 새로운 공정의 개발 등이 연구되고 있다.

Figure 7 는 본 연구를 통하여 개발된 생산 기술의 한 예인 circuit embedding 복합재 로봇 구조이다. 2 차원 패턴 설계와 유리섬유 복합재료, 폴리이미드 필름의 레이저 가공을 통해 로봇 구조를 만들었다. 기존의 핀, 링크 관절 및 기어 기반의 동력 전달 부분을 모두 필름 형태의 2 차원 패턴으로 설계를 하여 가볍고 간단한 구조의 로봇을 생산 가능하게 하였다. 또한 전자 회로와 로봇의 몸체를 동시에 하나로 만들어 소형 로봇의 부피를 더욱 줄일

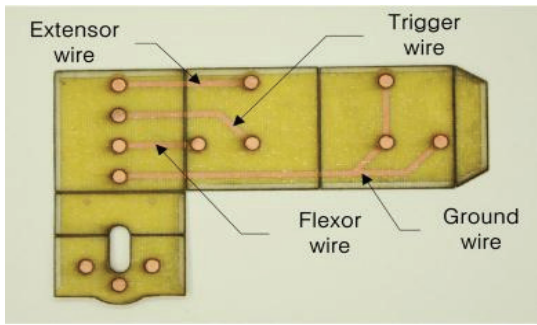


Fig. 7 Circuit embedding composite robot structure

수 있었다. 이를 통해 별도의 조립 공정이 필요하지 않게 됨으로써 소형 로봇의 생산 시간을 줄이고 대량 생산할 수 있는 가능성을 보였다.

### 5. 군집 제어 및 통신 기술

넓은 범위를 감시하거나 탐색하기 위해서는 다기능을 가진 하나의 로봇으로는 비용이나 시간의 측면에서 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 상대적으로 제약된 기능을 지닌 다수의 로봇을 서로 협업시켜 다기능/고비용의 로봇을 대체하는 연구를 군집 로봇 기술이라 한다.<sup>6</sup>

다수의 군집 로봇들이 서로 협업을 하기 위해서는 로봇들의 협업이 최적화 될 수 있는 군집 운영체제 기술과 제어 기술 및 이들을 위한 통신 기술이 필수적으로 개발되어야 한다.

#### 5.1 군집 운영체제 기술

군집 로봇은 생태적으로 제약된 하드웨어를 탑재하고 있기 때문에 이를 효과적으로 제어하는 것은 매우 어려운 일이다. 특히, 로봇을 제어하는데 필요한 MCU 나 메모리는 대표적인 하드웨어적인 제약들이다. 본 연구에서는 이러한 제약된 하드웨어 상에서 로봇을 제어하기 위한 경량화된 운영체제를 개발하였다.<sup>7</sup> 개발한 운영체제는 유럽의 차량용 RTOS 표준인 OSEK 표준<sup>8</sup>에 기반을 두고 있기 때문에 기존 자동차 산업에서 겪었던 다양한 설계, 디자인 문제들을 쉽게 극복할 수 있다. 반면, 자동차와는 다르게 군집 로봇은 하드웨어에 제약이 극심한 로봇들로 구성되기 때문에 소프트웨어, 구체적으로는 운영체제 및 응용, 의 자원 사용량을 줄일 수 있는 연구를 진행하였다. 구체적으로, 본 연구에서는 메모리 사용량을 감소시킬 수 있는 두

가지 메커니즘을 제안하였다. “태스크 스택 공유 기법”은 스택 섹션의 크기를 줄이기 위해 스택 사용기간이 겹치지 않는 임의의 두 태스크에 하나의 공유 스택만을 할당 하는 기법이다. 반면, “경량 레디 큐”는 응용의 특성에 맞는 서비스만을 제공하여 불필요한 자원의 낭비를 막는 최적화된 자료구조이다. 실험 결과, 제안하는 두 방법들을 로봇에 적용하면 기존 OSEK 기반 운영체제와 비교해서 오직 36%의 메모리만이 요구됨을 확인하였다.

#### 5.2 무인 비행 로봇을 이용한 군집 제어

소형 로봇의 군집 유지를 위해서는 로봇간의 상대적 위치정보가 필요한데 이를 얻기 위하여 본 연구에서는 범용 센서라고 할 수 있는 카메라를 선택하였고, 이를 통해 얻어지는 이미지 좌표 값을 이용하여 군집로봇의 대형을 제어한다.

또한, 소형 로봇과 협업을 이루는 무인 비행 로봇으로는 자유로운 모션과 상대적으로 쉬운 제어특성을 가진 쿼드로터 타입의 무인비행로봇(Quadrotor type UAV)을 사용한다. 쿼드로터는 Under-actuated 시스템 (6 자유도의 움직임 vs. 4 자유도 제어입력  $(\omega, \lambda)$ )이지만 현재까지 안정적인 자세 및 위치제어를 보장하는 연구가 이미 이루어져 있기 때문에<sup>9</sup> 본 과제에서는 군집로봇의 대형유지 제어기법만을 중점적으로 연구하게 된다.

카메라를 통하여 얻어지는 하나의 소형로봇 좌표 값을  $p_i \in \mathbb{R}^3 (i = 1, \dots, n)$ 라고 하였을 때, 군집의 대형유지를 위해서는  $p_i$ 를 특정한  $p_i^d$ 값으로 수렴시켜야 하며, 동시에 각 소형로봇 간의 충돌이 일어나지 않아야 한다. 이를 위한 제어기 디자인은 다음과 같다.

$$\dot{p}_i = \dot{p}_i^d - \gamma(p_i - p_i^d) - \sum_{j \neq i} \left( \frac{\partial \phi_{ij}(\|p_i - p_j\|)}{\partial p_i} \right)^T \quad (1)$$

여기서  $\gamma > 0$ 는 상수이며,  $\phi_{ij}$ 는 각 UGV 간의 충돌을 방지하기 위해 사용한 잠재함수(potential function)로써 다음과 같이 정의한다. ( $Q > 0$ )

$$\phi_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\|p_i - p_j\|} - \frac{1}{Q} \right)^2 & \|p_i - p_j\| \leq Q \\ 0 & \|p_i - p_j\| > Q \end{cases} \quad (2)$$

상기와 같은 제어기를 사용하게 되면 소형 로봇간의 충돌이 방지될 뿐 아니라 사용자가 원하는 위치로 수렴함이 보장되는데, 이 식 (1)을 만족시키는 소형 로봇의 목표속도를 구하고 소형로봇이 그 속도를 따라가도록 만들어주면 로봇 군집의 대형이 유지된다.

### 5.3 군집 통신 기술

군집 로봇 시스템에서 통신을 하는데 있어 가장 어려운 일 중 하나는 네트워크의 성능을 최적화하거나 성능상의 특이 현상을 극복하는 일이다. 본 연구에서 개발하는 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇 시스템은 확장성과 효율성을 만족하기 위해 필연적으로 master-slave 형태의 계층적 통신 구조를 유지한다. 하지만 불행히도 이러한 계층적 통신 구조에서는 다수의 slave 로봇이 한대의 master 로봇에 동시다발적으로 데이터를 송신하기 때문에 master 로봇에서 병목현상이 발생하여 전체적인 통신 속도가 떨어지고 데이터를 담고 있는 일부 패킷이 유실되는 등의 문제점이 발생한다. 이를 해결하기 위해, 본 연구에서는 master 로봇에 탑재하기 위한 새로운 패킷 스케줄링 기법을 개발하였다.<sup>10</sup> 제안하는 기법은 ACK 의 지연을 감소시키기 위해 ACK 에 대한 패킷을 우선적으로 처리하며 이를 위한 큐의 크기를 통신 혼잡도에 따라 동적으로 제어한다. 만약 통신상황이 혼잡하다면, 제안하는 기법은 ACK 패킷을 임의로 송·수신하지 않는다. 이를 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇 시스템의 대형 로봇에 탑재되는 Linux 기반 단말에 적용시킨 결과 최대 송·수신 대역폭의 95.2%와 93.8%를 달성함을 보여 성능 간섭이 극히 작음을 보였다.

군집 로봇 시스템에서의 통신에 있어 발생하는 또 다른 문제점은 광활한 환경에서 수집한 방대한 양의 데이터를 송·수신함으로써 발생하는 망의 혼잡이다. 특히 본 연구에서 개발하는 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇의 경우, 데이터를 수집하는 소형 로봇들은 투척에 의해 임의의 좌표에 위치하게 되기 때문에 필연적으로 중복된 데이터를 수집할 수 밖에 없다. 이렇게 불필요하게 중복된 데이터는 심각한 망 혼잡을 야기시킨다. 이를 해결하기 위해, 본 연구에서는 대용량 데이터 분산처리에 효과적 해결책을 제공하는 Google 의 Map-Reduce 프레임워크<sup>11</sup> 를 군집 로봇 분야에 적용할 수 있도록 수정하였다. Figure 8 은 제안하는 방법에 대해 개괄적으로 도식화한다. 그림에서 볼 수 있듯

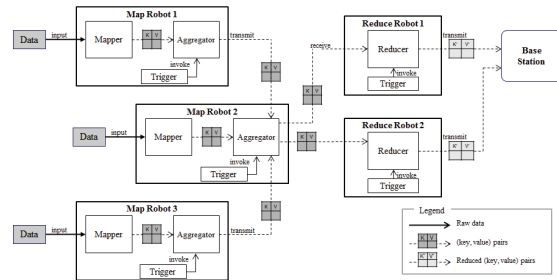


Fig. 8 Map-Reduce framework which avoids the unnecessarily duplicated data transmission in a swarm robot system

이, 로봇은 Map 로봇과 Reduce 로봇의 2 종류로 나뉜다. Map 로봇은 데이터를 센서를 통해 감지 후 처리하여 로컬 행위를 결정하게 되며 Reduce 로봇은 Map 로봇으로부터 로컬 행위에 대한 정보를 수신 및 처리하여 글로벌 행위를 결정한다. 다수의 Map 로봇이 동시다발적으로 데이터를 송신할 시 발생하는 망 혼잡을 고려하여 제안하는 프레임워크에서는 Map 로봇에 Aggregator 모듈을 두어 주변의 다른 로봇과 중복되는 데이터를 처리했을 시, 이를 취합하여 Reduce 로봇에서 전송 시 보다 적은 전송량을 송신할 수 있다. 결과적으로, 제안하는 프레임워크는 이를 적용하지 않았을 경우와 비교하였을 때 무려 31.46%의 데이터 전송만으로 동일한 작업을 수행할 수 있음을 검증하였다.

### 6. 결론

본 연구에서는 재난 상황이나 다양한 환경에서 수행하는 기존 로봇들의 한계를 극복할 수 있는 방안으로 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇 시스템을 제안하였다. 제안된 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇 시스템을 위한 요소 기술로 적응형 메커니즘 설계, 연성 복합 재료 및 지능 재료 연구, 멀티 스케일 생산 기술, 개선된 제어&군집 기술을 소개하였다.

생체 모사 기술을 이용한 그리퍼의 적응형 메커니즘 설계를 수행하여 작은 구조로 다양한 표면에서 구조 대비 높은 하중을 지지하는 것을 확인하였다. 연성 복합 재료 및 지능형 재료를 통한 2 축 IPMC 구동기를 제작하여 간단한 구조로 2 축을 움직이는 것을 확인하였다. 2 차원 패턴 설계와 복합재료 레이저 가공 기술, circuit embedding 생산

기술을 통해 대량 생산 가능한 멀티 스케일 통합 생산 기술을 개발하였다. 마지막으로 군집 운영체제 기술 및 군집 통신 기술의 개선을 통해 같은 기능을 수행하더라도 메모리나 데이터의 효율을 높인 것을 확인하였다.

이후 연구에서 본 연구에서 제안한 요소 기술을 응용하고 적용하여 실제 멀티 스케일 다중 전개형 협업 로봇의 설계 및 시스템을 구축하는 것이 가능할 것이다.

## 후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012-0000348).

## 참고문헌

1. Parker, L. E., "Current research in multirobot systems," *Artif Life Robotics*, Vol. 7, pp. 1-5, 2003.
2. Snodgrass, R. E., "Principles of insect morphology," McGraw-Hill Book Company, 1935.
3. Ahn, S. H., Lee, K. T., Kim, H. J., Wu, R., Kim, J. S., and Song, S. H., "Smart Soft Composite: An Integrated 3D Soft Morphing Structure Using Bend-Twist Coupling of Anisotropic Materials," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 4, pp. 631-634, 2012.
4. Lee, G. Y., Choi, J. O., Kim, M., and Ahn, S. H., "Fabrication and reliable implementation of an ionic polymer-metal composite (IPMC) biaxial bending actuator," *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 10, Paper No. 105026, 2011.
5. Bhandari, B., Lee, G. Y., and Ahn, S. H., "A Review on IPMC Material as Actuators and Sensors: Fabrications, Characteristics and Applications," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 1, pp. 141-163, 2012.
6. Dorigo, M., Birattari, M., Di Caro, G. A., Doursat, R., Engelbrecht, A. P., Floreano, D., Gambardella, L. M., Groß, R., Sahin, E., Stützle, T., and Sayama, H., "Swarm Intelligence: 7th International Conference, ANTS 2010," Springer, 2010.
7. Park, D., Yoo, J., Park, J., and Hong, S., "Reducing Memory Footprint of OSEK-based Systems via Stack Sharing and Light-Weight Ready Queues," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 12, pp. 451-460, 2011.
8. John, D., "OSEK/VDX History and Structure," *OSEK/VDX Open Systems in Automotive Networks*, IEEE Seminar, 1998.
9. Mahony, R. and Hamel, T., "Robust trajectory tracking for a scale model autonomous helicopter," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 14, No. 12, pp. 1035-1059, 2004.
10. Park, J., Park, D., Hong, S., and Park, J., "Preventing TCP Performance Interference on Asymmetric Links using ACKs-First Variable-Size Queuing," *Computer Communications*, Vol. 34, pp. 730-743, 2011.
11. Dean, J. and Ghemawat, S., "MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters," *Communications of the ACM - 50th Anniversary Issue: 1958-2008*, Vol. 51, pp. 107-113, 2008.