

論文93-30B-6-2

일 효율성을 이용한 잉여로봇의 재구성

(Reconfiguration of a Redundant Manipulator for Task Execution Efficiency)

李章明*

(Jang Myoung Lee)

要約

본 논문은 주어진 일의 키네마틱 특성에 맞게 잉여로봇의 기구적 구조를 변경하는 방법에 대해 기술한다. 잉여 로봇은 일반적인 일들을 위해 설계되어 있으므로, 특정 일을 위해서는 재구성에 의해서 그 일 효율성을 높여줄 필요성이 있다. 특정하게 주어진 일들은 동작성분 과 힘성분의 제어를 필요로 하고, 각 성분들은 개별적으로 분할되어 기술 되어질 수 있다. 이러한 각각의 일 성분들은, 제어 요구성과 로봇의 구조를 고려하여 로봇의 상위부분과 하위부분으로 할당되어진다. 재구성에 의하여, 하나의 잉여 로봇은 두개의 국부 로봇으로 분할되어지고, 이 분할된 국부 로봇들은 각각에 할당된 일을 위하여 최적화 되어진다. 이 재구성 가능한 잉여 로봇 시스템은, 직렬로 연결된 상태에서 하나의 공통의 일을 수행하기 위해서는 서로 협동하며, 개별적으로 할당된 일은 독립적으로 수행할 수 있는 것이다. 시뮬레이션에 의해 타당성을 검증하였다.

Abstract

This paper presents a new concept of a reconfigurable manipulator system which adjusts its mechanical structure to suit the kinematic characteristics of a given task. A highly redundant manipulator designed as a general purpose manipulator needs to be reconfigured for a specific task. A general task can be decomposed of motion and force components with different control requirements: either gross motion control or fine motion control. Each of these task components are distributed to each part of the manipulator based on the control requirements and the structure of the manipulator. Through the reconfiguration, a redundant manipulator is decomposed into two local arms, and the kinematic characteristics of each local arm is adjusted to suit the assigned task. The reconfigured redundant manipulator has two local arms well-configured for the local tasks and cooperating in serial for a given task. This globally enhances the performance of a redundant manipulator to execute a specific task. The simulation results are shown.

1. 서론

* 正會員, 釜山大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Pusan Univ.)
接受日字: 1992年 10月 15日

최근 직렬로 연결된 로봇 시스템^[4,5]은 그 시스템이 여러가지 일을 수행할 수 있는 다용성으로 인하

여 높은 관심을 끌고 있다. 그 방법으로는, 고성능 로봇이 범용 로봇의 상단에 부착되기도 하고, 또는 로봇의 상부가 특정 일을 위해 교환되기도 한다. 또한, 사진 1에서 보듯이 이동용 로봇과 작업용 로봇의 결합에 의하여 작업용 로봇의 일 수행 효율을 최적화 시킬 수도 있다.

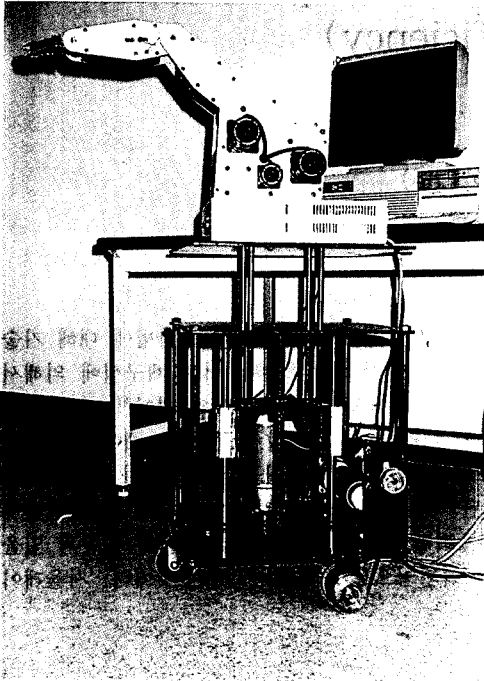


사진 1. 매크로/마이크로 (이동용/작업용) 로봇 시스템

Pic. 1. Macro/Micro Robot System

하나의 잉여 로봇을 Basearm(B-ARM)과 Forearm(F-ARM)으로 분할하여, 그 분할된 두개의 국부 로봇을 협동적으로 제어하는 방법에 대해 논의되어 왔다.^[2,3] 이 방법은 직렬 연결된 로봇 시스템 혹은 재구성 가능한 로봇 시스템^[4,5]을 분석하는 일반적인 방법으로 간주되어 질 수 있다. 이 분할된 잉여 로봇을 협동적으로 제어하는 것은 두개의 상반된 일의 요구조건, 즉, 큰 범위에 대한 빠른 동작과 정확하고 빠른 정밀동작을 충족하기 위해서는 필연적이다. 따라서, 일의 목적에 따라 적절한 중간점(Elbow)을 선택해 주고, 이 중간점에 의해 구분된 F-ARM과 B-ARM에 적절히 일을 분배시킴으로 하여, 전체적인 일 효율성은 최적화될 수 있다. 주어진 일에 대해 중간점을 선택해 주는 일반적인 법칙은

없으나, 중간점의 선택은 잉여 로봇의 구조를 분석하고, 일의 성질을 분석함으로써 행해질 수 있다.

본 논문에서는 일 효율성 및 안정도를 개선하기 위한 방법으로, 각각의 국부 로봇에 적절히 일을 분배해 주고, 국부 로봇들을 주어진 일을 위해 적합하도록 재구성해 줌으로써, 전체 로봇 시스템의 효율이 개선될 수 있음을 보여 준다. 일 분배는 일의 성질과 전체적 구조에 바탕을 두고 행해질 수 있다. 국부 로봇의 재구성은 잉여도(조인트 잉여도 혹은 로봇 잉여도)를 활용하여 국부 로봇을 할당된 일에 적합한 자세를 갖도록 만들어 주는 과정으로 이루어진다. 일례로, B-ARM은 일 수행의 안정도를 개선하기 위해 작용점(End-Effector)을 받쳐주는 Bracing 로봇에 의해 재구성 되어질 수 있다. 최근 컴퓨터 기술의 발전과 더불어 세 산량은 많으나 개념적으로 훌륭한 잉여 로봇의 활용이 증대되고 있다.

Ⅱ절에서는 잉여로봇 시스템이 주어진 일을 행함에 있어서의 일 효율성을 정의하고, Ⅲ절에서는 이 정의된 일 효율성을 높일 수 있는 재구성 가능한 시스템을 설명하고 Ⅳ절에서는 시뮬레이션에 의해 그 실현의 타당성을 보여준다.

Ⅱ. 일 기술 (Task Description)과 일 효율성 함수

1. 일 성질(Task Features)

로봇에 주어진 일은 Artificial Constraints^[7]에 의해 기술되어질 수 있다. 이 Artificial Constraints는 주어진 일 환경에서 제어 가능한 동작/힘(Motion/Force) 성분을 나타낸다. 좀 더 구체적으로, 우리는 Artificial Constraints를 일의 성질에 따라 두개의 성분으로 구분할 수 있다. 즉, Task Constrained 성분과 Task Free 성분으로 나눈다. Task Constrained 성분은 일의 수행중에 제어되어야 할 동작/힘(Motion/Force)의 성분들을 나타내고, Task Free 성분은 일의 수행에 영향을 주지 않는 성분이다. Task Constrained 성분은 다시 Task Essential 성분과 Task Dispensable 성분으로 나뉘어진다. Task Essential 성분은 힘/동작(Force/Motion) 성분 가운데 일의 수행을 위해 필연적인 요소로 특정값을 갖도록 제어되어야 하는 성분을 나타내고, Task Dispensable 성분은 일의 수행중 항상 영으로 유지되어야 하는 성분을 나타낸다. 따라서, 적절한 구조를 가진 로봇이 적절한 위치에

있으면, 이 Task Dispensable 성분은 항상 영으로 유지될 수 있으며, 이때 일의 기술로부터 제외될 수 있다. 이는 특정한 작업을 위해서는 일반적으로 6축 이상을 갖는 로봇보다도 고유하게 설계된 2~3축의 로봇이 더욱 유용하게 활용될 수 있음을 보여준다. 더우기, 각각의 이 일성분 집합은 서로 직교하기에 이들 성분을 모두 합하면, 6차원의 일 공간(Task Space)을 형성하게 된다

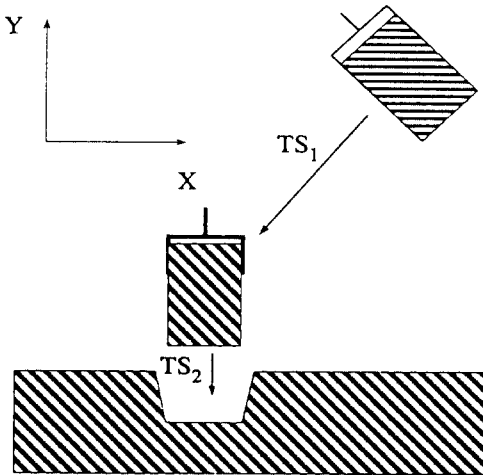


그림 1. Peg - in - Hole 동작
Fig. 1. Peg - in - Hole Operation.

이러한 일 기술에 사용되는 일 성분들을 예를 들어서 분류해 본다.

그림 1.에서 보여진 바와 같이 평면상에서 Peg - in - Hole 동작을 생각해 보자. 이 일은 자유이동 작업, TS₁과 조립작업, TS₂로 구성 되어 있다.

1. 자유이동작업 : 임의의 위치로 부터 Peg을 이동하여 삽입을 위해 적절한 위치로 이동

$$\rightarrow TS_1 = \{v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z\}$$

2. 조립 작업 : 그 Peg을 Hole 에다 삽입

$$\rightarrow TS_2 = \{f_x, v_y, f_z, n_x, \omega_y, n_z\}$$

여기서 v 는 선형동작, ω 는 회전동작, f 는 힘(force), 그리고 n 은 토크를 나타낸다.

조립작업의 수행을 위해서는,

- (1) v_y 성분이 제어 되어져야 한다(Task Essential 성분)
- (2) f_x, f_z, n_x 및 n_z 성분은 영으로 유지되어져야 한다 (Task Dispensable 성분). 그리고,
- (3) ω_y 성분은 일의 수행에 무관하다 (Task Free 성분)

는 사실을 알수 있다.

2. 일 세그먼트 (Task Segment)

일(Task)은 일반적으로 동작과 작용힘의 Base Frame에서의 Trajectory로 기술되어진다. 이 일 기술을 적절히 선택된 좌표축(Frame), 즉 Task Frame에 의해 기술해지면 간략화 되어진다. 이때 Base Frame을 기준으로 기술된 일반적 6차원 일, v ,는 Task Frame에서 Task Essential 성분들만 사용하여 ' v '로 기술 되어진다. 예로, 어떠한 선형의 일 (회전운동을 고려하지 않는 어떠한 평면에서의 일)은 Base Frame을 기준으로 $[g(v_x, v_y, v_z)=0, \text{단}, f(v_x, v_y, v_z)=0]$ 의 형태의 6차원의 일로 기술 되어진다. 이 일은 Task Frame을 기준으로는 $[g(v_x, v_y)=0, \text{단}, v_z=0]$ 의 3차원의 일로 기술 되어진다. 또한, 일의 기술을 Task Frame으로 이동함으로써, 각각의 일의 성분들을 Task Essential, Task Dispensable 및 Task Free 성분들로 분류해 낼 수 있다. 일의 기술은 단지 Task Essential 성분만으로 기술 되어질 수 있게 된다. 이러한 저차원의 일의 기술로부터, 우리는 잉여도를 활용함으로써 하여 주어진 일을 효율적으로 수행하기 위해 Task Essential 성분을 바탕으로 일들을 분류할 수 있을 것이다.

하나의 일은 동일한 Task Essential 성분들을 갖는 일련의 Subtask들로 나뉘어지고, 각각의 Subtask는 Task Segment라 정의 되어진다. 하나의 Task Segment는 (동일한 Task Essential 성분이 제어 되어져야 할 필요성이 있는) 일의 일부분으로 잉여로 보트는 이 일의 한 Segment의 수행을 위해 최적화 되어짐이 바람직하다.

개념적으로, 3차원에서의 일은 2차원의 Subtask들로 분할 되어질 수 있다. 예로, 박스에 페인트 칠을 하는 작업을 보면, 이는 각각의 면의 페인트칠에 해당하는 6개의 2차원의 일들로 분할 되어진다. 일 이와 같이 기술함으로써 하여, 일의 수행계획은 Subtask들의 성질에 따라 행해 질 수 있다. 하나의 일을 Task Segment로 분할하는 예로, 그림 1.에서 보여진 Peg-in-Hole 동작을 다시 생각해 보자. 이 일은 두개의 Task Segment(TS)로 되어 있으며, 일 성분들으로써 기술 되어진다.

$$TS_1 : G_1(p_x, p_y, -, -, -, q_z) \text{로 이동하라.}$$

$$\text{단, } (v_x=k_1, v_y=k_2, \omega_z=k_3: \text{Task Essential 성분들}), \\ (v_z=0, \omega_x=0 : \text{Task Dispensable 성분들}) \\ (\omega_y=any : \text{Task Free 성분})$$

$$TS_2 : G_2(-, p_y, -, -, -, -) \text{로 이동하라.}$$

단, $\{v_y=k_3 \mid f_y \leq f_{max} : \text{Task Essential 성분}\}$,
 $\{f_x=0, f_z=0, n_x=0, n_z=0 : \text{Task Dispensable 성분들}\}$
 $\{\omega_y=any : \text{Task Free 성분}\}$

2개 혹은 3개의 Task Essential 성분들을 갖는 대부분의 조립작업을 위한 일들은 그 일을 수행하기에 적합한 구조로 되어있는 2개 혹은 3개의 관절을 가진 로봇트에 의해 수행되어질 수 있다. 이 경우에, Task Dispensable 성분들은 제어에 의해 그 값을 유지할 수도 있으나, 로봇트의 구조에 의해 자연적으로 그 값을 유지할 수 있으면, 로봇트 시스템의 정확도 및 견고성을 높일 수 있다. 한 Task Segment를 위해 잘 구성된 로봇트에 의해 그 일을 효율적으로 수행하기 위해서는, 그 로봇트가 Task Dispensable 성분을 발생시키지 않고, 오직 Task Essential 성분만 발생시키도록 적절한 위치에 놓여져야 한다.

3. GME와 GRE

로봇트시스템은 그 기구학적 구조에 의해 Cartesian 공간에서 동작이나 힘을 발생시킬 수 있는 능력 및 효율이 결정된다. 이를 정량적으로 표시하기 위해 GME와 GRE를 정의한다.

$m \times n$ 자코비안(Jacobian), 행렬 J는 로봇트의 n 차 조인트(Joint) 속도벡터, $\dot{\theta}$ 를 m차의 Cartesian 속도벡터, \dot{X} , 으로 맵핑시켜준다. 즉

$$\dot{X} = J\dot{\theta} \tag{1}$$

로 표현된다.

그리고, 정적 힘(Static Force), F, 와 조인트 토크, τ , 와의 상관관계는 Virtual Work원리에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = J^T \cdot F \tag{2}$$

로봇트의 일 효율성을 키네마틱 성질에 따라 정량적으로 기술하기 위해 다음의 정의를 한다.

정의 : Generalized Manipulability Ellipsoid (GME)

GME, $f(\dot{x}_1, \dots, \dot{x}_m)$, 는 조인트 동작 $\dot{\theta} \parallel \dot{\theta} \parallel \leq 1$ 에 의해 실현되어질 수 있는 Cartesian 동작을 나타내는 하나의 m차 타원으로 정의되어진다. 즉,

$$f(\dot{x}_1, \dots, \dot{x}_m) = \dot{X}^T(JJ^T)^{-1}\dot{X} - 1 = 0 \tag{3}$$

정의 : Generalized Resistivity Ellipsoid (GRE)

GRE, $f(F_1, \dots, F_m)$, 는 조인트 토크 $\tau \parallel \tau \parallel \leq 1$ 에 의해 저지되어질 수 있는 Cartesian 공간에서의 정적 힘을 나타내는 하나의 m차 타원으로 정의되어진다.

$$f(F_1, \dots, F_m) = F^T(JJ^T)F - 1 = 0 \tag{4}$$

GME와 GRE는 같은 Basis 벡터들로 구성되며, GME의 Principal Axes의 길이는 대응하는 GRE의 Principal Axes의 역수 값이다. 이는 Virtual Work 원리, $\tau^T \theta = F^T X$, 로 부터 자명하다. 따라서, 두개중 어느 m차 타원도 로봇트의 동작과 정적 힘 발생능력 및 효율을 정량적으로 나타내기 위해 적절히 사용 되어질 수 있다.

GME 와 GRE 사이의 상보성(Duality)에 대해 구체적으로 살펴보면, GME를 구성하는 Subspace 상에 존재하는 정적 힘성분만이 로봇트에 의해 저지 되어지고 제어 되어질 수 있다. 또한, 로봇트가 일정 방향으로 동작을 효율적으로 발생시킬 수 있으면, 이 로봇트는 그 방향의 정적힘 을 효율적으로 저지하지는 못한다. 이러한 상보성에 기반을 두고, 일 성질은 일반적으로 하나 의 원하는 Manipulability Ellipsoid^[8]에 의해 기술 되어지며, 이 Manipulability Ellipsoid 는 일 요구를 Principal Axis 의 길이로 나타내며, 상보성에 의해 동작 성분들로만 기술 되어 질 수 있다.

따라서, 각각의 Task Segment별로 요구되는 일 성분들로 m차의 타원을 구성하여, 로봇트의 키네마틱 구조에 의한 GME가 이 타원과 가능한 한 유사하게 되도록 해 줌으로 하여 일 수행의 효율을 올릴 수 있다.

4. ^dGME와 Task-Oriented Manipulability Measure

1)원하는 Manipulability Ellipsoid, ^dGME :

일의 요구성질에 따라 동작과 정적 힘의 유연성을 나타내기 위해, 주어진 일을 직교 좌표계의 위치를 따라 가면서 각 Task Segment별로 일련의 원하는 Manipulability Ellipsoid(^dGME) 들로 나타낼 수 있다. 이 ^dGME는 Orthonormal 벡터 세트, ^du_i 와 그들의 크기 ^dσ_i 로 정의 되어진다. ^du_i는 일의 수행을 위해 동작 혹은 정적 힘의 제어가 필연적인 방향, 즉 Task Essential 성분들로 구성되고, ^dσ_i의 값은 주어진 로봇트의 능력과 일의 요구에 따라 결정 되어지는 값이다. 구체적으로,

^dσ_i = η_{i, max} : 동작 유연성만 요구되는 경우

${}^d\sigma_i = \eta_{i,\min}$: 정적 힘 유연성만 요구되는 경우

${}^d\sigma_i = \eta$: 제한된 동작제어의 경우

와 같은 형태로 설정된다. 여기서, $\eta_{i,\max}(\eta_{i,\min})$ 는 주어진 로봇트가 ${}^d u_i$ 방향을 따라 얻을 수 있는 실제 GME의 최대(최소)길이를 나타낸다. η 의 값은 ${}^d u_i$ 의 방향을 따라 동작과 정적힘의 제어중요성에 따라 $\eta = (1-\alpha)\eta_{i,\max} + \alpha\eta_{i,\min}$, 단 $0 \leq \alpha \leq 1$, 으로 주어지게 된다 dGME의 설정 방법을 좀더 자세히 살펴보기 위해, 그림 2.와 같은 일을 생각해보자. 이 일은 그림 2.의 (A)의 1의 위치에 있는 Peg을 이동하여 오른쪽 벽에 있는 경사진 Hole에 삽입하는 것이다. 이 Hole을 찾아가는 동안 바닥 면에 적당한 정적 힘을 가하면서 이동할 필요가 있다. 이 일의 수행을 위해 요구되어지는 직교좌표계의 속도와 힘의 값들이 그림 2.의 (B)-(E)에 보여져 있다. 이러한 속도와 힘의 요구값들로부터 그림 2.의 (F)에서 보여진 바와 같은 일련의 원하는 GME들이 결정되어 진다.

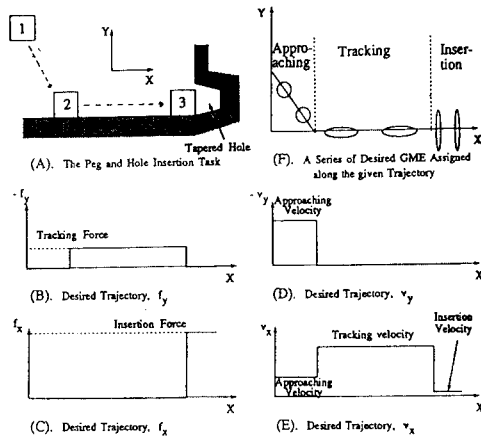


그림 2. Peg - in - Hole 삽입 Task
Fig. 2. Peg - in - Hole Insertion Task.

2) Task-Oriented Manipulability Measure (TOMM):

원하는 동작 유연성은 주어진 일의 Cartesian 동작 궤적에 따라 결정되며, 그 궤적을 따라 가며 다른 기하학적 파라미터로 기술되어짐을 알 수 있다. 또한, 정적 힘의 Manipulability는 동작의 Manipulability와 역수 관계가 있다. 이는 속도 의미에서의 Manipulability Ellipsoid 를 기하학적인 역수관계로 해석해 주면, 힘 의미에서의 Manipulability Ellipsoid도 나타낼 수 있다는 사실을 의미한다. 따라서 그 Ellipsoid의 부피를 단순히 증가시키는 것은

정적 힘 제어에 있어서의 유연성을 나쁘게 한다. 주목할 것은 이 Manipulability Ellipsoid가 또한 정확한 속도 및 정적힘 제어를 위한 하나의 척도로도 사용될 수 있다는 것이다. 따라서, 일 효율성 함수는 다음의 정의와 같이 TOMM으로 기술되어 진다.

정의: Task-Oriented Manipulability Measure (TOMM)

TOMM^[1,8]은 한 로봇트의 실제적 Manipulability Ellipsoid, d GME와 원하는 Manipulability Ellipsoid, d GME 사이의 모양 차이로 정의 되어진다.

$$TOMM = \sum_{i=1}^m ({}^d\sigma_i - \eta_i)^2 \tag{5}$$

여기서 ${}^d\sigma_i$ 는 Principal Axis의 길이를 나타내고 $\eta_i = [{}^d u_i^T C {}^d u_i]^{-1/2}$ 로 주어진다. 그림 3 에서는 TOMM의 정의를 도식적으로 나타낸다.

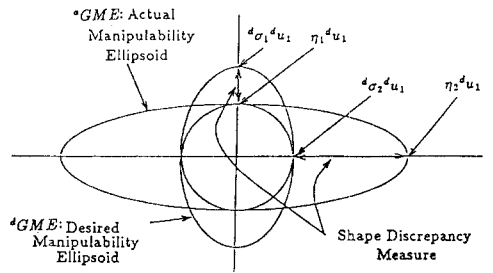


그림 3. 일 효율성 함수
Fig. 3. Task-Oriented Manipulability Measure :

$$TOMM = \sum_{i=1}^2 ({}^d\sigma_i - \eta_i)^2$$

TOMM의 값을 최소화하는 것은 로봇트의 자세를 특정일을 수행하기에 가장 적합하도록 맞추어 주는 것이다.

III. 재구성 가능한 잉여로봇 시스템

일반적으로 길고 무거운 아랫 부분과 짧고 가벼운 윗 부분을 가지고 있는 하나의 잉여 로봇트에 적절히 일을 분배해 주고 각 부분을 재구성함으로써, 잉여로봇트는 다양한 일들을 수행할 수 있을뿐만 아니라

라. 특정한 일들도 역시 효율적으로 수행할 수 있다. 조립 혹은 가공작업의 Task Essential 성분들 가운데, 일부 성분은 Gross동작 제어(낮은 정적 힘 제어 혹은 단순동작 제어)를 요구하고 다른 성분들은 Fine 동작 제어(높은 정적 힘 제어)를 요구하게 된다. 이러한 경우 잉여로봇은, 그 구조적으로 두개의 상반된 조건을 동시에 만족시키기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 그 일 요구들은 원하는 Manipulability Ellipsoid, ^aGME로 추상화시키고, TOMM의 정의와 함께 로봇의 자세를 일의 조건을 위해 최적화하도록 한다. 우선, ^aGME의 모양에 따라 Task Essential 성분들을 수행하기에 적합한 잉여로봇의 각 부분으로 할당한다. 즉, Fine [Gross] 동작 제어를 필요로 하는 Task Essential 성분들은 로봇의 상위 [하위] 부분에 할당한다. 이 결과, 그 로봇의 상위 및 하위부분을 위한 원하는 Manipulability Ellipsoid, 즉, ^aGME가 결정되어진다. 좀더 해석적으로, 우리는 원하는 ^aGME를 두개의 원하는 GME들로 분할한다. 하나는 F-ARM을 위한 ^d^fGME이고 또 하나는 B-ARM을 위한 ^d^bGME로 이들은 일 요구들과 로봇의 Task Essential 성분 수행을 위한 능력 및 효율에 바탕을 두고 결정된다.

이제 잉여로봇은 그 로봇의 재구성으로 인하여, 두개의 국부적 로봇들로 분할 되어진다. 그 로봇의 각각의 부분은 잉여도를 활용함으로 하여 할당된 일의 수행을 위해 최적의 자세를 갖추게 된다. 즉, B-ARM의 자세와 F-ARM의 자세는 각각 ^a^bGME를 ^d^bGME에 ^a^fGME를 ^d^fGME에 일치시키는 방향으로 결정 되어진다. 이 절에서 논의되는 재구성 가능한 로봇은 특정의 조립 및 가공작업들을 효율적으로 수행하는 것을 목표로 하고, 이 재구성 가능한 로봇에 내재된 주된 아이디어는 다음과 같다.

1) 로봇의 작용점(End-Effector)으로 부터, 로봇의 상위부분에 할당된 Task Essential 성분들을 모두 포함하는 Cartesian 속도 공간을 형성할 수 있는 점까지 내려가서, 그 점을 중간 점(Elbow)으로 결정한다. 이 중간점 선택 과정에 의하여, 하나의 잉여로봇은 두개의 국부 로봇 즉, F-ARM과 B-ARM으로 분할 되어진다.

2) B-ARM의 실현 가능한 Cartesian 속도 공간을 B-ARM에 할당된 Task Essential 성분만을 포함 하도록 제한한다. 두개의 직렬로 연결된 국부 로봇들 사이의 동적 간섭은 일 성분들이 F-ARM과 B-ARM에 직교(Orthogonal)하도록 분배되어질 때 최소화 된다. B-ARM의 실현 가능한 Cartesian 속도공간에 Task Free성분들을 포함시킬 수도 있다.

이는, B-ARM에 의해 Task Free 성분들을 발생시키는 것은 F-ARM의 일 수행 효율을 높이는데 기여할 수 있기 때문이다. 3) B-ARM의 실현 가능한 Cartesian 속도 공간을 제한하고, 전체 시스템의 안정도를 높이기 위해 ^[10] Bracing 로봇트를 사용하여 B-ARM의 작용점(Elbow)을 쥐게한다.

재구성 가능한 로봇 시스템의 예가 그림 4.에 보여져 있다.

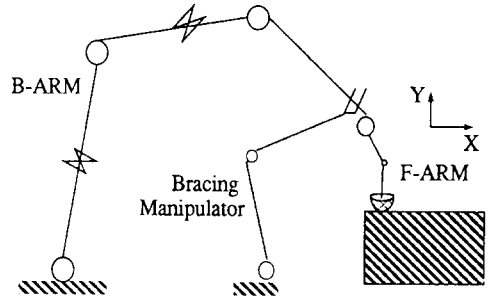


그림 4. 재구성 가능한 로봇 시스템

Fig. 4. Reconfigurable Robot System.

주의할 점은 중간점의 선택에 있어서, 주어진 일뿐만 아니라 로봇의 구조가 고려되어야 한다는 것이다. 임의의 주어진 일에 대해서 잉여로봇의 중간점을 결정하는 일반적인 법칙은 없다. 그러나, 잉여로봇의 상위부분을 적절히 설계해 줌으로 하여, 재구성 가능한 로봇 시스템의 효율성을 올릴 수 있다. 따라서, 우리는 우선 한정된 주어진 일을 위해 F-ARM을 설계하는 기법은 뒤로 미루고 ^[9], 주어진 잉여로봇에서 중간점을 선택하는 해석적 방법을 제시한다

1. F-ARM의 재구성

F-ARM의 재구성은 로봇의 작용점으로 부터 Base로 가면서 선택된 중간점에서부터 상위부분의 자세를 재구성하는 것이다. 그 할당된 일을 수행함에 있어서 F-ARM의 능력과 효율을 정량화 하기 위하여, 우리는 TOMM에 기반을 두고 중간점 선택함수(ESF)를 다음과 같이 정의한다.

$$ESF \triangleq \prod_{i=1}^m \left[\left\{ 1 - \text{sign}(\eta_i - {}^d\sigma_i) \right\} * K + \left\{ 1 - \text{sign}(\eta_i - {}^d\sigma_i) \right\} * H \right] / 2 \quad (6)$$

여기서 $K = [\text{Exp}(-\eta_i / {}^d\sigma_i) - 1] \quad [\text{Exp}(-1) - 1]$

$H=2^i \sigma_i$ ($i=1, \dots, n$), 그리고 $0 \leq ESF_i \leq 1$. Δm 실제 ESF의 값은 F-ARM이 일을 수행함에 있어서의 효율성을 나타낸다. 일례로, $ESF = \prod_{i=1}^n ESF_i$ 에서 $ESF_i=0$ 의 경우에 F-ARM은 그 일을 수행할 수 없음을 의미한다. η_i 의 낮은 값에 대한 지수함수는 η_i 가 영에 가까운 경우 ESF의 값이 급격히 작아지도록 해준다. 이 경우는 로봇의 일 수행의 효율보다는 수행 능력 자체를 강조해야 하기 때문이다. η_i 의 높은 값에 대한 역비례 함수는 F-ARM의 효율성을 높이기 위해 η_i 의 값을 σ_i 의 값으로 유도하기 위한 것이다. ESF의 모양이 그림 5.에 주어져 있다.

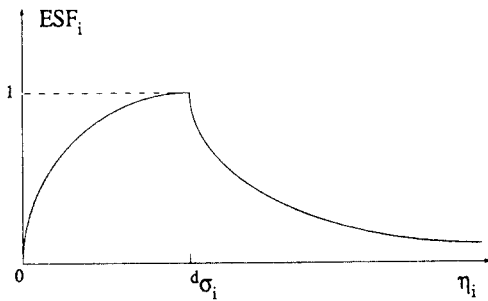


그림 5. 엘보우 선택 함수
Fig. 5. Elbow Selection Function (ESF).

고정된 Base와 작용점 위치로부터, 중간점 선택 절차는 다음과 같이 기술되어진다 :

Step 1. 로봇트 위에 적당한 점을 선정하여 F-ARM에 있는 관절의 수와 ^aGME의 차수가 동일하게 한다.

Step 2. ^aGME를 ^dGME에 맞추어 주기위해 F-ARM의 자세를 Null Space^[2] 상에서 교정한다. Step 3. ESF의 값을 확인 한다.

a. 만약 $ESF_{max} \leq \rho$ 이면, 중간점을 한개의 관절이 F-ARM에 더 포함되게 아래로 옮긴 후 Step 2.로 간다.

b. 만약 $ESF > \rho$ 이면, 중간점을 결정하고 F-ARM의 자세를 최적화시켜 준다.

위의 중간점 선택 절차는 $\rho = 0$ 일때는 오직 한점의 중간점을 결정하게 해 준다. 실제로 F-ARM의 자세교정^[8,9] 과정에서 F-ARM의 Base의 위치뿐만 아니라, 자세도 F-ARM에 할당된 일에 적합하도록 되어진다. 일 수행 효율면을 고려하여 $\rho = 0$ 로 하는 대신에 ρ 에 적당한 양의 값을 줄 수 있다. 이는, F-ARM에 여분의 관절을 할당해 줌으로 하여, 그 결과 일 수행에 있어서 유연성 및 다양성을 증대시킬 수

있다.

2. B-ARM의 재구성

원하는 GME, 즉, ^{a,b}GME는 일반적으로 Task Essential 성분에 의해 구성되며(Task Free 성분 포함가능), B-ARM에 할당 되어진다. B-ARM의 재구성의 의미는, B-ARM(및 Bracing 로봇트)의 자세를 최적화 하여 ^{a,b}GME와 ^{d,b}GME 사이의 모양 차이, 즉 TOMM을 최소화하는 것이다. Bracing 로봇트의 도입은 폐키네마틱 사슬(Closed Kinematic Chain)을 구성함으로써 하여 부하수송 능력을 높이기 위해 사용 되어질 수 있다. 이 Bracing 로봇트는 또한 B-ARM과 함께 ^{a,b}GME를 ^{d,b}GME에 일치시키는 역할을 한다. 왜냐하면, 두개의 병렬로 협동하는 로봇트 시스템의 실제 Manipulability는 두개의 로봇트들의 Manipulability Ellipsoid들의 공통부분으로 정의 되어지기 때문이다.^[1] 폐사슬 시스템(혹은, 두개의 병렬 협동하는 로봇트 시스템)의 최적도^[10]를 개선하기 위해 우리는 다음의 사항들을 고려할 필요가 있다.

(1) 주어진 Task Segment에서 ^{a,b}GME가 가능한 ^{d,b}GME와 가깝게 되도록 Bracing 로봇트를 설계한다. 일례로, Bracing 로봇트의 GME가 ^{d,b}GME와 일치하면서, B-ARM자체의 GME에 포함된다면, 그 폐키네마틱 사슬 시스템은 최적화된 것이다.

(2) ^{a,b}GME를 ^{d,b}GME에 일치시키는데 필요하지 않는 운동 성분만을 발생시키는 관절은 폐쇄시켜 버린다. 제어로서 그 움직임을 영으로 만드는 대신, 기계적으로 필요없는 관절을 폐쇄시키는 것이 전체 시스템의 안정도 및 정확도 측면에서 유리하기 때문이다.

일의 수행절차는 다음과 같이 요약되어질 수 있다.

① 로봇트의 작용점을 원하는 일의 위치로 이동한다.

② 하나의 중간점을 결정한다. 이 결과 B-ARM 및 F-ARM이 결정 되어진다.

③ F-ARM의 자세를 최적화 한다.^[2]

④ Bracing 로봇트가 중간점을 천다.

⑤ Bracing 로봇트와 B-ARM의 자세를 수정하여, 이 폐키네마틱 사슬이 B-ARM에 할당된 Task 성분만을 발생시킬 수 있도록 한다.

⑥ Task Segment를 F-ARM과 B-ARM의 협력에 의해 수행한다.

특정의 작업을 위해 설계된 Bracing 로봇트가 없는 경우에는 수행절차④를 무시하고 ⑤에서 B-ARM의 자세를 최적화 시킨다.

3. Task Free 성분의 사용에 의한 F-ARM와 B-ARM의 협동

두개의 로봇 사이의 협동은 Task Free성분들을 활용함으로 하여 또한 가능하다. 이는, B-ARM이 F-ARM이 작업하기에 적절한 위치로 미리 이동시켜 주는 매크로/마이크로 로봇 제어의 개념과 동일시 된다. 이를 그림 6. 에서 도식적으로 보여준다.

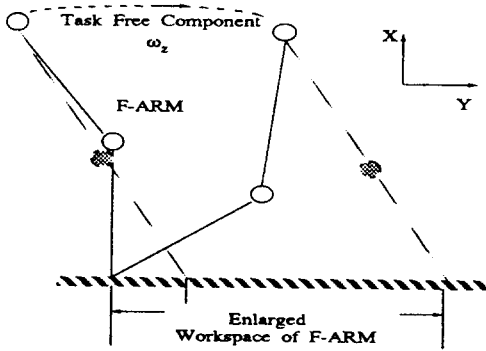


그림 6. F-ARM과 B-ARM의 협동
Fig. 6. Cooperation of F-ARM and B-ARM.

IV. 시뮬레이션

본 연구에서 제의된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 5개의 Revolute 관절을 가진 잉여 Planar로봇을 활용하여, 그림 4.에서 보여진 바와같이 모서리를 따라가면서 Grinding을 하는 동작을 수행함에 있어서 일 효율성을 어떻게 높일 수 있는가를 시뮬레이션에 의해 보여준다. 우선 Grinding을 하는 동작을 위한 Task 성분들은 분석되어져 다음과 같이 분류될 수 있다.

Task Essential 성분들 : v_x, f_y

Task Dispensable 성분들 : v_z

Task Free 성분들 : $\omega_x, \omega_y, \omega_z$

이러한 Grinding동작을 위해서는 Y축을 따라서는 힘의 제어가 요구되고 X축을 따라서는 Gross 동작제어가 요구되어 지므로, 그림 7.의 원편과 같은 dGME 가 잉여로봇에 요구되어진다. 잉여로봇의 상위부분은 Fine동작 제어능력을 갖추고 있으므로 f_y 의 제어에 적합하고, 하위 부분은 Gross동작 제어능력을 갖추고 있으므로 v_x 의 제어에 적합하다.

따라서, dGME 가 두개의 GME로 즉, aGME 와 bGME 로 분할되어져 잉여로봇의 각 부분에 할당되어진다. 그림 7.에 그 과정이 보여져 있다. 또한, 두 ARM들의 협동에 의한 일 수행 효율을 개선하기

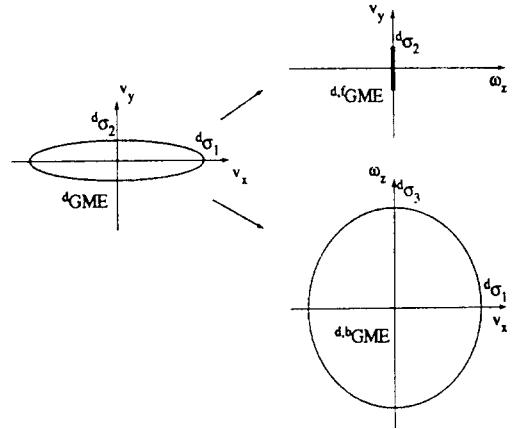


그림 7. 원하는 GME와 일 할당
Fig. 7. A Desired GME and Task Distribution.

위해 Task Free 성분, ω_z 가 bGME 에 추가 되어졌다. 중간점 선택 절차 및 F-ARM 자세 최적화 절차에 의하여 결정된 두개의 Revolute 관절을 가진 F-ARM은, 일이 정의되어 있는 x-y 평면상에 놓여질 수 있다 (만약 한개의 Prismatic 관절이 윗 부분에 있었다면, 그 관절이 선택되어졌을 것이다.). Task Free 성분들인 ω_x 와 ω_y 는 F-ARM자세의 최적화 과정에서 활용 되어질 수 있다. B-ARM의 자세 최적화 과정은 B-ARM자체의 Null Space를 활용하여야 하며, 이 때 B-ARM에 허용된 Task Free성분인 ω_z 도 활용 가능하다. 시스템의 안정도및 정확도를 향상시키기 위하여 B-ARM의 Manipulability Ellipsoid를 제한해 줄 필요가 있어, Bracing 로봇트를 활용해 본다. 그 결과, 폐사슬 시스템(B-ARM과 Bracing 로봇트에 의한)의 자세는 aGME 를 dGME 에 일치시키도록 최적화 되어진다.

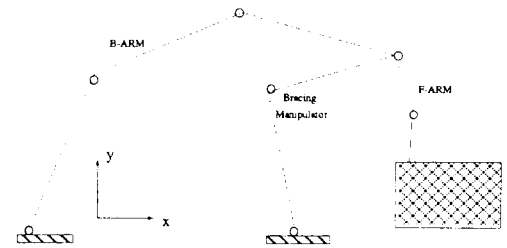


그림 8. 최적화된 로봇 시스템
Fig. 8. An Optimized Robot System.

그림 4.에서 보여진 로봇 시스템이 Grinding 동

작을 위해 그림 8.에서 보여진 바와같이 재구성 되어 졌다. 일, V_h , 는 V_{hb} (B-ARM에 해당된 x방향 동작 제어), V_{hf} (F-ARM에 할당된 y방향 정적 힘 제어) 및 V_{hr} (z방향 회전동작)의 조합으로 수행 되어질 수 있다. 재구성 가능한 로봇트 시스템의 각부분의 속도는 다음의 조건들을 만족시키도록 결정 되어져야 한다.

$$V_h = V_{hb} + V_{hf} + V_{hr} \quad (7)$$

$$V_{hb} + V_{hr} = J_{BM} \dot{\theta}_{BM} = J_b \dot{\theta}_b \quad (8)$$

$$V_{hf} + V_{hr} = J_f \dot{\theta}_f \quad (9)$$

여기서 θ_{BM} 은 Bracing 로봇트의 조인트 속도 벡터를, J_{BM} 은 자코비안 행렬을 나타낸다. 식 (8)은 B-ARM의 실현 가능한 Cartesian 속도 공간이 2-관절 Planar Bracing 로봇트에 의해 제한 되어짐을 의미한다. 식 (7)은 주어진 일 V_h 에 적당한 양의 Task Free성분, V_{hr} ,이 첨가되어져도 일의 수행에 전혀 차이가 없음을 의미한다.

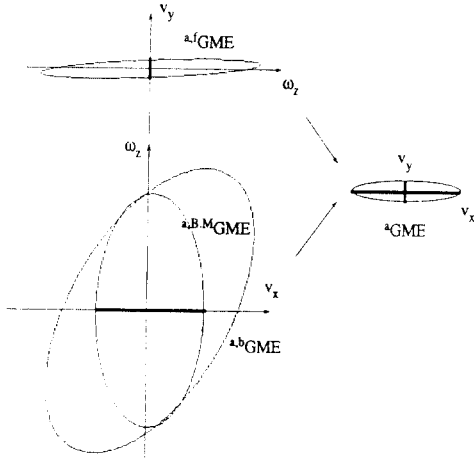


그림 9. GME들의 Intersection 및 Addition
Fig. 9. Intersection and Addition of GMEs.

그림 8.에서와 같이 최적화된 로봇트 시스템의 실제 Manipulability는 그림 9.에서 보듯이, 두 개의 병렬 협동 로봇트의 Manipulability인 B-ARM의 GME인 a^fGME 와 Bracing 로봇트의 GME인 a^bM^fGME 의 공통부분(왼쪽 아래그림의 가로축 위의 굵은 실선)과 F-ARM의 Manipulability(왼쪽 위그림의 세로축 위의 굵은 실선)의 합으로 형성 되어진다. 이렇게 재구성된 로봇트 시스템의 Manipulability

(그림 9.의 오른쪽)가 Grinding작업을 수행하기에 적합하도록 요구되는 Manipulability와 일치하게 되었음을 알 수 있다. 즉 적절한 일의 할당과 로봇트 시스템의 재구성에 의하여, 그림 8.에서 보여진 바와 같은 잉여로봇트 시스템이 모서리 Grinding작업을 위해 최적의 자세를 갖추게 된것이다.

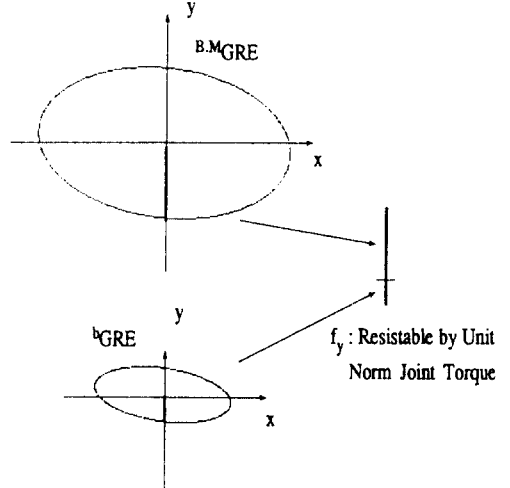


그림 10. Resistivity의 개선
Fig. 10. Improvement of Resistivity : Addition of GREs.

시스템의 안정도의 한 지표가 되는 폐사슬 시스템의 Resistivity는 그림 10.에서 보듯이 B-ARM과 Bracing 로봇트의 Resistivity Ellipsoid를 y축을 따라 더한 것으로 표시 되어진다. B-ARM의 나쁜 안정도가 Bracing 로봇트에 의해 개선됨을 볼 수 있다.

V. 결론

본 논문에서 하나의 잉여로봇트가 어떻게 두개의 전혀 다른 성질을 가진 일들(Gross 동작 제어 및 높은 정적 힘 제어)을 효율적으로 수행할 수 있는가를 보여 주었다. 로봇트의 키네마틱 특성이 주어진 일의 성질에 의존하므로, 잉여로봇트의 키네마틱 특성은 주어진 일의 효율적 수행을 위해 수정 되어져야 하는 것이다. 하나의 잉여로봇트로 특정일을 수행함에 있어서 그 효율을 높이기 위해 Bracing 로봇트를 어떻게 활용할 수 있는가를 보여주었으며, 이로 인하여 잉여로봇트가 다양한 특정일들을 위해 효율적으로 사용되는 방법을 제시하였다. 구체적으로, Fine동작 제어가 요구되는 Task Essential 성분들은 로봇트의 상위부분에 할당해 줌으로 하여, 그 일을 정확히 수

행할 수 있도록 하였으며, F-ARM의 자세 또한 그 일의 수행에 적합하도록 수정 되어졌다. B-ARM과 Bracing 로봇트에 의해 구성된 폐사슬은, B-ARM에 할당된 Task Essential 성분들과 Task Free 성분들만을 발생시키도록 최적화 되어졌다. 일의 성분들을 직교 (Orthogonal)하게 각각의 국부 로봇트에 배분해 줌으로 하여, 두 국부 로봇트 사이의 동적 간섭을 최소화할 수 있다. [3] 재구성 가능한 로봇트 시스템(하나의 잉여로봇트와 Bracing 로봇트)에서 재구성을 통하여 Task Dispensable 성분들을 영으로 유지시키는 시스템의 안정도와 정확도의 향상에 도움이 된다.

參 考 文 獻

- [1] Sukhan Lee, "Dual Redundant Arm Configuration Optimization with Task-Oriented Manipulability," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.5,no. 1, pp.78-97, 1989.
- [2] Sukhan Lee and Jang M. Lee, "Multiple Task Point Control of a Redundant Manipulator," *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, May, 1990.
- [3] Sukhan Lee and Jang M. Lee, "Dynamic Model and Cooperative Control of a Serially Linked Manipulator System," *Proc. 29th IEEE Conf. on Decision and Control*, Honolulu, Hawaii, Dec. 1990.
- [4] T.Schilling, "Increasing the Efficiency of Telemanipulators through the Robotic Exchange of End Tooling," *Int. Jour. of Robotics and Automation*, vol. 5, no.1, pp.16-19, 1990.
- [5] Toshio Fukuda and Seiya Nakagawa, "Dynamically Reconfigurable Robotic System," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1581-1586, April 1988.
- [6] A. Sharon, N. Hogan and D.E. Hardt, "High Bandwidth Force Regulation and Inertia Reduction Using a Macro/Micro Manipulator System," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 126-132, April 1988.
- [7] Matthew T.Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators," *IEEE Trans. On System, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-11, no.6, pp.418-432, June 1977.
- [8] Sukhan Lee and Jang M. Lee, "Task-Oriented Dual-Arm Manipulability and Its Application Optimization," *Proc. 27th IEEE Conf. on Decision and Control*, Austin, TX, Dec.1988.
- [9] Jang M. Lee, "Multiple Task Point control of a Redundant Manipulator," Ph.D thesis, USC, Dec.1990.
- [10] J.Y.S LUH and Y.F.Zheng, "Computation of Input Generalized Forces for Robots with Closed Kinematic Chain Mechanics," *IEEE Jour. of Robotics and Automation*, vol. RA-1, no.2, pp. 95-103, 1985.

著 者 紹 介



李 章 明(正會員)

1957年 11月 22日生. 1980年 2月 서울대학교 전자공학과(공학사). 1982年 2月 서울대학교 전자공학과 대학원(공학석사). 1990年 12月 USC(남가주대학교) 박사학위 취득(Computer Engineering전공). 1993年 6月 현재 부산대학교 공과대학 전자공학과 조교수. 주관심분야는 다관절 로봇 시스템의 설계 및 제어, μ -processor 응용 시스템 설계, Motor 구동방식 및 제어 등임.