

모듈러 RMT의 구조형태 생성을 위한 새로운 방법

최영휴*, 박현만+, 장성현+, 최응영+, 김인수+, 박종권++

A New Method for Generating Structural Configurations of Modular-Reconfigurable Machine Tool

Y. H. Choi*, H. M. Park+, S. H. Jang+, E. Y. Choi+, I. S. Kim+, J. K. Park++

Abstract

This study describes a new method of constructing Reconfigurable machine tools configurations from a set of modules or components. This proposed method defines combinability vector for each module and mutual combinability coefficient matrix for adjacent two modules. All of machine configurations possible to be generated from any two adjacent modules can be determined by quadratic form of two associated combinability vectors. Furthermore, all of possible RMT configurations generating from a series of multiple modules also can be obtained by multiplying quadratic form of two adjacent combinability vectors recursively. Our proposed RMT configuration generating method can be successfully applied to determining all of possible machine configurations from several modules or components at conceptual- or preliminary- design stage.

Key Words : Reconfigurable machine tool, Machine configuration generating method, Combinability vector, Mutual combinability coefficient matrix, Module components

1. 서론

최근 생산시스템을 구성하는 핵심요소인 공작기계에 대한 복합화의 요구가 많아졌기 때문에 복합가공을 실현하는 공작기계들이 많이 출현하고 있다. 이러한 공작기계의 복합가공은 여러 종류의 부품들을 단시간 또는 저가적으로 생산하고, 각 부품이 요구하는 여러 종류의 가공공정들을 가능한 한 하나의 공작기계에서 실현, 자동화하기 위해서 반드시 해결해야 할 과제이다.

일반적으로 복합가공은 '하나의 가공공간 내에서 여러 개의 다른 종류의 가공공정들을 실현하는 것'이라고 정의할 수 있다. 이러한 정의에서도 알 수 있는 바와 같이 모든 가공공정들이 복합화의 대상이지만, 현실적으로는 여러대의 공작기계들을 사용해야 하는 가공을 하나의 공작기계로 실현할 경우에 그 공작기계를 복합공작기계로서 취급하는 경우가 많다. 그러나 가공기술은 항상 발전하고 있기 때문에 새로운 가공공정이 복합화 됨으로써 현재의 복합가공의 개념이 크게 변화, 발전해 갈 가능성

* 주저자, 창원대학교 기계설계공학과 (yhchoi@sarim.changwon.ac.kr)

주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9 창원대학교

+ 창원대학교 대학원

++ 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 공작기계그룹

도 충분히 있다. 그에 따라서 복합가공을 실현하는 공작기계의 구조도 또한 당연히 변화되어야 한다. 그 경우에도 단순하게 가공공정들을 하나의 공작기계에 복합화 하는 것은 여러 가지 문제점들을 만들기 때문에 하나의 공작기계에서 복합화가 가능한 가공공정과 분리해야할 가공공정을 분석할 필요가 있다. 즉, 새로운 공작기계의 설계에 관한 검토가 필요하게 되었다. 일본에서는 이미 1970년대 후반부터 공작기계의 구조를 각종 유니트들의 자유로운 조합에 의해서 구성할 수 있는 모듈러(modular) 구성방식에 관한 연구를 시작하였다. 동경공업대학에서는 몇 개의 특정한 모듈들을 가지고, 구조모듈의 가능한 조합을 표시하는 유향그래프(directed graph)를 이용하여 그 구조형태의 변화를 계통적으로 생성하는 방법을 연구하였다.

그리고 미국에서는 1990년대 중반부터 재구성형 생산 시스템(Reconfigurable manufacturing system)에 관한 연구를 본격적으로 시작해 왔는데, 이것은 하나의 공작기계를 기본적인 요소로 보지 않고, 소프트웨어(software)나 제어(control) 등과 같은 생산공정의 전 과정을 포함한 포괄적 의미의 재구성을 뜻한다.

미국 미시간 대학의 ERC-RMS (Engineering Research Center-Reconfigurable manufacturing system)는 사용자가 원하는 가공기능을 가진 재구성형 가공시스템 (RMS)을 개발하였다. 본 논문에서는 몇 가지의 기본 모듈을 조합하여 다양한 형태의 RMT 구조를 생성하는 구조형태 생성 방법에 대하여 연구하였다. 기존의 구조형태 생성방법은 대체로 모듈간의 결합 순서만을 중요시하였으나, 본 연구에서는 모듈간의 결합 가능한 면과 결합방향도 고려하여 보다 다양한 구조형태를 생성시키는 새로운 방법을 제안하였다.

2. 모듈 결합 형태의 수학적 표현

2.1 결합능 벡터(Combinability vector)

본 본문에서는 모든 모듈은 Fig. 1과 같이 육면체 형상을 가진다고 가정하였다. 그러므로 임의의 i -번째 모듈은 다른 임의의 모듈과 결합할 수 있는 결합가능한 면을 6개까지 가질 수 있다. 또한 서로 다른 두 모듈이 결합될 때, 결합 면이 바뀌지 않는 상태에서 90도씩 회전시켜서 결합 가능하다면, 임의의 결합 면은 4가지의 서로 다른 결합방향으로 결합될 수 있다.

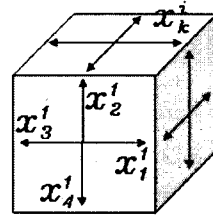


Fig.1 Combinable plane and direction of i -th module

그러므로 임의의 i -모듈에 대한 결합능 벡터(combinability vector), X_i 를 다음과 같이 정의한다.

$$X_i = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{24} \end{Bmatrix}_i = \begin{Bmatrix} x_1^1 \\ x_2^1 \\ x_3^1 \\ x_4^1 \\ x_1^2 \\ \vdots \\ x_k^j \\ \vdots \\ x_4^6 \end{Bmatrix}_i \quad (1)$$

여기서, x_k^j 는 j 번째 결합면의 k 번째 결합방향을 나타낸다. x_k^j 는 0 또는 1의 값을 가지며, 0이면 결합 불가능, 1이면 결합 가능을 의미한다.

결합능 벡터를 이용하여, 임의의 두 모듈 X_i 와 X_j 의 결합 가능한 형태의 종류를 다음 식과 같이 벡터의 2차 형식(quadratic form)으로 표현할 수 있다.

$$X_i^T A_{ij} X_j = \sum_{m=1}^{24} \sum_{n=1}^{24} a_{mn} (x_m)_i (x_n)_j \quad (2)$$

여기서, A_{ij} 는 모듈 X_i 와 X_j 의 상호결합능 계수행렬(mutual combinability coefficient matrix)로서 두 모듈의 임의의 상호결합 면끼리의 결합가능성을 의미하며, 다음과 같이 정의한다.

$$A_{ij} = \{a_{mn}\}_{24 \times 24} = \begin{Bmatrix} \alpha_{11}^{11} & \alpha_{12}^{11} & \alpha_{13}^{11} & \alpha_{14}^{11} & \alpha_{11}^{12} & \alpha_{12}^{12} & \alpha_{13}^{12} & \alpha_{14}^{12} & \dots & \alpha_{14}^{16} \\ \alpha_{11}^{11} & \alpha_{22}^{11} & \alpha_{23}^{11} & \alpha_{24}^{11} & \alpha_{21}^{12} & \alpha_{22}^{12} & \alpha_{23}^{12} & \alpha_{24}^{12} & \dots & \alpha_{24}^{16} \\ \alpha_{31}^{11} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{41}^{11} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{11}^{21} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{41}^{61} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \alpha_{44}^{66} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서 α_{kl}^{mn} 은 X_i 모듈의 m 번째 결합면의 k 번째 방향과 X_j 모듈의 n 번째 결합면의 l 번째 방향의 결합가능성을 나타내는 상수로서, 0이면 결합불가, 1이면 결합 가능한 경우를 의미한다.

여러 개의 모듈들이 축차적으로 결합할 경우를 생각해보면, 우선 모듈들의 배열 순서를 고려해야 한다. N 개의 모듈이 순서대로 배열되는 방법의 총 수는 $N!$ 이다. 그 다음 임의의 순서로 배열된 모듈들이 상호 결합하는 방법(경우)의 수는 결합능 벡터의 이차형식을 축차적으로 곱하여 구할 수 있다. $N!$ 가지의 배열 방법 중에서 임의의 한 가지 배열을 Fig. 2에 나타내었다.

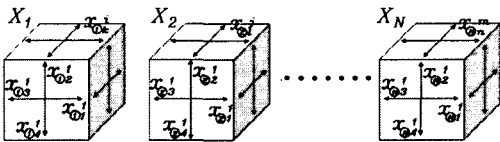


Fig. 2 A typical representation of recursively combined modules

Fig. 2처럼 배열된 N 개의 모듈이 결합 가능한 형태의 총 수는 다음식과 같이 결합능 벡터의 2차형식을 축차적으로 곱하여 구할 수 있다.

$$(X_1 A_{12} X_2)(X_2 A_{23} X_3) \dots (X_{N-1} A_{N-1,N} X_N) \\ = \left[\sum_{m=1}^{24} \sum_{n=1}^{24} (a_{mn})_{12} (x_m)_1 (x_n)_2 \right] \\ \left[\sum_{m=1}^{24} \sum_{n=1}^{24} (a_{mn})_{23} (x_m)_2 (x_n)_3 \right] \dots \\ \left[\sum_{m=1}^{24} \sum_{n=1}^{24} (a_{mn})_{N-1,N} (x_m)_{N-1} (x_n)_N \right]$$

(4)

3. 모듈러 RMT의 구조형태 생성 예제

Fig. 3에 보인 것처럼 8개의 모듈들의 결합에 의해서 생성될 수 있는 3축 가공 밀링머신(Milling machine) 구조형태를 구하는 예제에 앞 절에서 소개한 구조형태 생성방법을 적용하여 보았다. 8개의 모듈은 스피indel 모듈, 테이블 모듈 그리고 베드 모듈이 각각 1개씩이고, 칼럼 모듈은 2개이며, 슬라이드 모듈은 3축 가공이므로 3개로 하였다.

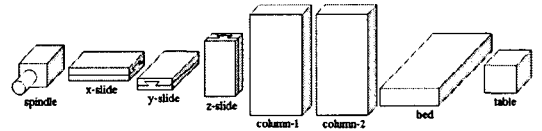
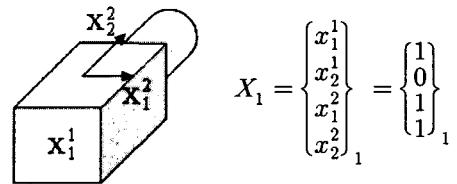


Fig. 3 Modules for RMT configuration generating example using 8-modules

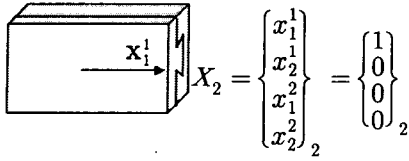
먼저, Fig. 4에 보인 것처럼 각각의 모듈별로 결합가능한 면과 결합가능한 방향을 고려하여 결합능 벡터를 정의한다. 모든 모듈은 2개의 결합 면을 가지며, 각각의 결합 면은 2개의 결합 방향을 가진다고 가정하였다. 각각의 모듈별로 결합면의 결합가능성과 결합방향별 결합가능성을 고려하여 결합능 벡터의 요소 값을 그림에서와 같이 0 또는 1로 정하였다. 스피indel 모듈의 경우는 1면의 2방향은 결합 불가능하다고 간주하여 왜 0으로 하였다.

슬라이드와 테이블 모듈의 경우는 1면의 1방향만 결합가능하다고 간주하여 1로 두고, 2면은 무슨 이유 때문에 결합이 불가능하므로 해당 요소 값을 모두 0으로 두었다.

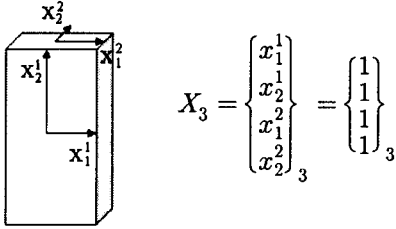
칼럼과 베드 모듈들은 두 면 모두 결합 가능하고, 각각의 면에서 두 가지 방향으로 모두 결합 가능하다고 보아 결합능 벡터의 모든 요소 값을 1로 정하였다.



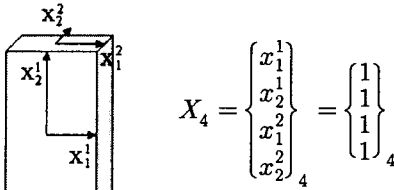
(a) Spindle module



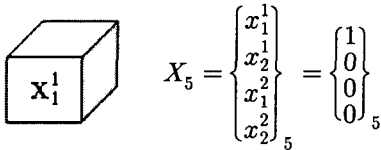
(b) Slide module



(d) Column module



(e) Bed module



(c) Table module

Fig. 4 Combinability vectors for each module

8개 모듈의 배열 순서를 정함에 있어서 스펀들과 테이블모듈은 반드시 터미널(terminals)이 된다는 가정을 하였다. 그러므로 모듈을 배열하는 경우의 수는 6! (720)가지이다. 각각의 배열에 대하여, 인접하는 두 모듈끼리의 결합 면과 결합방향을 변화시키면서 가능한 구조형태를 생성하게 되는 과정은 인접한 두 모듈 간의 결합능 벡터의 2차 형식을 축차적으로 곱하여 주는 것과 같다. 이 과정을 세분하여 설명하면 다음과 같다.

스핀들 모듈과 슬라이드 모듈, 그리고 칼럼모듈이 순서대로 결합되는 경우를 예로 들면, 스펀들 모듈 X_1 과 슬라이드 모듈 X_2 의 결합 가능한 형태의 종류는 아래의 식 (5)와

같이 두 모듈의 결합능 벡터의 2차 형식으로 표현할 수 있다. 이 때 상호결합능 계수행렬 A_{12} 는 식 (6)과 같으며, 요소 a_{11}^{11} , a_{11}^{21} , a_{21}^{21} 의 값이 1이다.

$$X_1^T A_{12} X_2 = \sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 (a_{mn})_{12} (x_m)_1 (x_n)_2 \quad (5)$$

$$A_{12} = \begin{Bmatrix} a_{11}^{11} & a_{11}^{11} & a_{11}^{12} & a_{11}^{12} \\ a_{11}^{11} & a_{11}^{11} & a_{11}^{12} & a_{11}^{12} \\ a_{21}^{21} & a_{21}^{21} & a_{21}^{22} & a_{21}^{22} \\ a_{21}^{21} & a_{21}^{21} & a_{21}^{22} & a_{21}^{22} \end{Bmatrix}_{12} = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}_{12} \quad (6)$$

슬라이드 모듈 X_2 와 칼럼 모듈 X_3 의 결합은 식 (7)와 같이 표현되며, 두 모듈간의 상호결합능 계수행렬은 식 (8)과 같다. 상호결합능 계수행렬 A_{23} 의 요소중에서 a_{11}^{11} , a_{12}^{11} , a_{11}^{12} , a_{12}^{12} 은 1의 값을 가진다.

$$X_2^T A_{23} X_3 = \sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 (a_{mn})_{23} (x_m)_2 (x_n)_3 \quad (7)$$

$$A_{23} = \begin{Bmatrix} a_{11}^{11} & a_{11}^{11} & a_{11}^{12} & a_{11}^{12} \\ a_{11}^{11} & a_{11}^{11} & a_{11}^{12} & a_{11}^{12} \\ a_{21}^{21} & a_{21}^{21} & a_{21}^{22} & a_{21}^{22} \\ a_{11}^{11} & a_{11}^{11} & a_{11}^{12} & a_{11}^{12} \\ a_{21}^{21} & a_{21}^{21} & a_{21}^{22} & a_{21}^{22} \end{Bmatrix}_{23} = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}_{23} \quad (8)$$

스핀들 모듈과 슬라이드 모듈의 결합 가능한 형태를 살펴보면 아래의 Fig. 9와 같다.

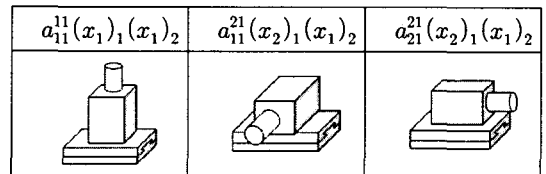


Fig. 9 Possible configurations combining spindle & slide

식 (10)에 의해 생성된 슬라이드 모듈과 칼럼 모듈의 결합가능 형태는 Fig. 10과 같다.

$a_{11}^{11}(x_1)_2(x_1)_3$	$a_{12}^{11}(x_1)_2(x_1)_3$	$a_{11}^{12}(x_1)_2(x_2)_3$	$a_{12}^{12}(x_1)_2(x_2)_3$

Fig. 10 Possible configurations combining slide & column

그러므로 스핀들 모듈, 슬라이드 모듈, 칼럼 모듈 순으로 결합된다면 가능한 구조형태는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(X_1 A_{12} X_2)(X_2 A_{23} X_3) = \left[\sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 (a_{mn})_{12} (x_m)_1 (x_n)_2 \right] \left[\sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 (a_{mn})_{23} (x_m)_2 (x_n)_3 \right] \quad (9)$$

식 (9)에 의해 생성된 스핀들-슬라이드-칼럼 순으로 결합되는 밀링 형 RMT의 생성 가능한 구조형태의 종류를 구할 수 있으며, 생성된 각각의 기계 구조의 모양을 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11 Possible configurations combining spindle, slide, and

$a_{11}^{11}(x_1)_1(x_1)_2$ $a_{11}^{11}(x_1)_2(x_1)_3$	$a_{12}^{11}(x_1)_1(x_1)_2$ $a_{12}^{11}(x_1)_2(x_1)_3$	$a_{11}^{12}(x_1)_1(x_1)_2$ $a_{11}^{12}(x_1)_2(x_2)_3$	$a_{12}^{11}(x_1)_1(x_1)_2$ $a_{12}^{11}(x_1)_2(x_2)_3$
$a_{11}^{21}(x_2)_1(x_1)_2$ $a_{11}^{21}(x_1)_2(x_1)_3$	$a_{12}^{21}(x_2)_1(x_1)_2$ $a_{12}^{21}(x_1)_2(x_1)_3$	$a_{11}^{22}(x_2)_1(x_1)_2$ $a_{11}^{22}(x_1)_2(x_2)_3$	$a_{12}^{21}(x_2)_1(x_1)_2$ $a_{12}^{21}(x_1)_2(x_2)_3$
$a_{11}^{22}(x_2)_1(x_1)_2$ $a_{11}^{22}(x_1)_2(x_1)_3$	$a_{12}^{22}(x_2)_1(x_1)_2$ $a_{12}^{22}(x_1)_2(x_1)_3$	$a_{11}^{23}(x_2)_1(x_1)_2$ $a_{11}^{23}(x_1)_2(x_2)_3$	$a_{12}^{22}(x_2)_1(x_1)_2$ $a_{12}^{22}(x_1)_2(x_2)_3$

column modules in series

이와 같은 방법으로 N개의 모듈이 자유롭게 조합되는 경우에도 생성 가능한 RMT의 구조형태를 찾아 낼 수 있다. Fig. 3의 8가지 기본 모듈들을 이용하여 생성된 3축 밀링머신의 구조형태 중에서 밀링가공에 적합하다고 판단되는 몇 가지를 Fig. 12에 나타내었다.

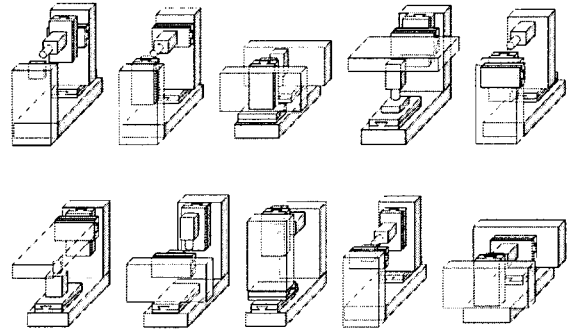


Fig. 12 Some of feasible RMT configurations generated by this paper

4. 결론

본 논문에서는 몇 가지의 모듈로부터 다양한 가공기능과 구조형태를 가지는 모듈러 RMT(Reconfigurable Machine Tool)의 구조형태를 생성하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 기존의 구조형태 생성 방법들은 특정 모듈들 간의 결합 가능 여부와 결합 순서에 중점을 두었으나, 본 논문에서 제안한 방법은 각 모듈간의 결합순서는 물론 결합가능한 면과 결합방향까지 고려함으로써 생성 가능한 모든 구조형태를 구할 수 있다.

제안된 방법은, 먼저 각각의 모듈에 대하여 결합 가능한 면별로 결합 가능한 결합방향을 나타내는 결합능 벡터 (combinability vector)를 정의하고, 두 개의 모듈이 결합되는 경우 상호결합면과 결합방향별 결합 가능여부를 나타내는 상호결합능 계수행렬(mutual combinability coefficient matrix)을 정의한다. 인접하여 결합되는 두 모듈의 결합 구조형태는 두 모듈의 결합능 벡터의 2차형식(quadratic form)으로 표현할 수 있다. 그리고 여러 개의 모듈이 임의의 순서로 배열되어 상호 결합하는 경우의 생성 가능한 구조형태는 배열된 두 모듈 간의 결합능 벡터의 이차형식을 축차적으로 곱하여 구할 수 있다.

본 논문에서는 스핀들, 병진 슬라이드, 칼럼, 베드, 테이블

블 등의 8개의 모듈로부터 재구성가능형 3축 밀링머신 (3-axes milling RMT)의 구조형태를 생성하는 문제에 제안된 방법을 적용하여 다양한 형태의 구조가 생성될 수 있음을 보였다.

향후 생성 가능한 모든 구조형태들에 대해서 어떤 것이 좋고 나쁜지를 판단할 수 있는 생성된 구조형태의 적합도 판단 방법에 대한 연구를 수행할 필요가 있다.

후기

본 연구는 산업자원부의 차세대 신기술개발사업인 "Micro/Meso 부품 대응형 마이크로 기계가공 시스템 기술 연구" 과제의 일환으로 한국기계연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) S. I. Kim, D. B. Choi, J. P. Kang and N. K. Kim, 1995, "Design Technique of the Latest Machine Tool," Bando Press, Seoul.
- (2) Moon, Y., and Kota, S., 2002, "Design of Reconfigurable Machine Tool," *Transaction of the ASME, J. of Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 124, pp.480-483.
- (3) Landers, R. G., Min, B. K., and Koren, Y., 2001, "Reconfigurable Machine Tools," *Annals of the CIRP*, Vol. 50, pp.269-274.
- (4) Franitza, D., Qian, X., and Hiller, M., 2003, "Error compensation for Parallel Reconfigurable Machine-tools," *Int. conference on mechatronics*, Vol. International conference on me, pp.153-158.
- (5) Zhang, G., 2002, "Reconfigurable Machine Tools and Its Key Techniques," *Flexible automation; Int. conf. on new technological innovation for the 21th century*, Vol. 3, pp.1213-1220.
- (6) Xu, H., Tang, R. Z., and Cheng, Y. D., 2004, "Modular Design Method for Control of Reconfiguration Machine Tools," *Journal-Zhejiang University Engineering Science*, Vol. 38, No. 1, pp.5-10.
- (7) Vladimir, T. P., and Ichiro, I., 1996, "Theory of Form-Shaping Systems and Its Application to Grinding Machines," *JSME International Journal (C)*, Vol. 39, No. 4, pp.850-856.
- (8) Koren, Y., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, G., and Van Brussel, H., 1999, "Reconfigurable Manufacturing Systems," *Annals of the CIRP*, Vol. 48, No. 2, pp.527-540.
- (9) Vladimir, T. P., Ichiro, I., Moriaki, S., and Makoto, I., 1998, "Form-Shaping Systems of Machine Tools: Theory and Applications," *Annals of the CIRP*, Vol. 47, No. 1, pp.329-332.
- (10) S. K. Seo, S. S. Park, T. J. Ko, and H. S. Kim, 2000, "Geometric error compensation of machine tools by geometry redesign," *Spring conference of KSPE*, pp.367-372.
- (11) J. H. Cha, I. H. Lee, M. W. Park, and J. J. Kim, 2002, "Inference System for Complex Mechanical Design Knowledge," *J. of KSME(A)*, Vol. 26, No. 9, pp.1772-1778.
- (12) Fumiki, T., Hiroki, H., and Takeshi, K., 1998, "Characteristics of Machining Operation and Machined Shape by Form Shaping Function," *J. of JSPE*, Vol. 64, No. 5, pp.758-762.
- (13) Mishima, N., Ashida, K., Tanikawa, T., Maekawa, H., Kaneko, K., and Tanaka, M., 2000, "Microfactory and a Design Evaluation Method for Miniature Machine Tools," *Proc. of ASPE 2000 Annual Meeting*, pp.567-570.