

리니어모터 이송계 제어 특성분석에 관한 연구

유송민*

A Study on the Linear Motor Control System

Yoo Song Min*

Abstract

In order to analyze linear motor driven feed system, preliminary studies have been conducted focusing on the performance evaluation of the system based on the various combination of control gain along with acceleration. Tentative simulation revealed that due to the complexity of control system, reduced number of control condition is recommended. Actual machining process with conventional feed system using endmill tool was employed as a preliminary study. Several sensing methods including AE, acceleration sensors and tool dynamometer were used. Results revealed the consistency in AE and cutting resistance. There were inconsistent empirical results in accelerometer probably due to the insensitivity of the sensor signal with respect to the experimental system.

Key Words : Linear motor(리니어모터), Control gain(제어이득), RMS signal(RMS신호)

1. 서론

발전하는 산업시스템에 효율적으로 부합하기 위하여 고정도, 고속화, 고효율화 되도록 요구되고 있는 가공시스템 중 새로이 도입되고 있는 것은 새로운 개념의 고속가공이 가능한 지능형 머시닝센터이며 부가적으로 인공적인 판단능력이 겸비되어 있다. 이를 위하여 개선된 제반 기술이 요구되고 있다. 고속가공조건을 충족시키기 위하여 주축

및 이송계의 고속화가 필수적으로 달성되어야 하는데 이를 위하여 재래식 이송계의 기계적인 장애요소를 극복할 수 있는 리니어모터가 도입되고 있는 추세이다.

일반적으로 회전형태의 모터를 길게 펼쳐 놓은 구조를 나타내는 리니어모터는 자기부상열차에서 사용되는 것과 유사한 형식을 나타낸다. 이러한 리니어모터를 이용한 이송계는 공작기계에서의 각종 장착물이 장착된 운동부의 이송을 담당하게 된다. 리니어모터를 구동함에 있어서

* 주저자, 경희대학교 기계공학과 (smyoo@khu.ac.kr)
주소: 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

볼스크류(ball screw)와는 달리 기계적인 요소가 배제되므로 여러 가지의 특성면에서 차이가 크다. 대표적인 특징으로 동력전달계에서 나타나는 휨현상이나 백래쉬가 없어져 강성이 크게 향상되며 결과적으로 고속가공시에 정밀도의 향상을 기대할 수 있게 된다. 특히 분당 30 m/min 이상의 고정도 가공이 가능해져 되는 고속가공기기의 경우에는 볼스크류를 사용하는 이송계의 경우 백래쉬, 발열, 탄성변형 및 낮은 강성으로 인하여 제어성이 저하되므로 리니어모터를 사용한 직접적인 슬라이드 구동을 사용하게 된다.

이송계의 제어기법으로서 재래식 이송계형태인 회전운동형 서보모터시스템에는 재래식 PID제어, 비선형제어 및 feedforward 제어기법 등 다양한 방법에 대한 특징이 비교되었다[1].

리니어모터 제어계를 구성하기 위한 시스템모델링으로서 기자력(magnetomotive force)과 역기전력(back electromotive force)을 이용한 모델이 제기되어 재래식 제어기법에 따른 각종 성능평가가 시도되었으며[2] Lagrange법을 이용한 모델이 개발되어 동작기계의 이송구동계에 적용되었다[3].

리니어모터를 제어하기 위하여 재래식 PID기법도 시도되어 각각의 이득을 조정하기 위한 성능평가가 검토되기도 하였으며 외란(force disturbance)을 보상하는 feedforward 제어기법도 시도되었다[4]. 밀링가공에 MIMO H_∞ 제어기를 사용하여 엔드밀링가공 중에 절삭력에 의한 추종오차를 감소시켰다[5]. 모델링이 어려운 비선형요소를 신경망을 이용한 학습법을 이용하여 제어기에 적용시킨 결과 추종오차를 상당히 감소시켰다.

이러한 리니어모터의 비선형적 요소로 마찰, cogging 및 추력리플(thrust ripple) 또는 토크리플(torque ripple)현상 등의 장애요소가 있으며 이로 인한 성능저하를 개선하기 위한 노력이 다양하게 시도되었다.

본 연구에서는 개발 중인 리니어모터 및 모터제어기를 토대로 이에 적용시킬 수 제어 알고리즘을 개선하기 위한 단계로 제어이득 조합에 따른 위치오차계산 및 분포를 도출한다. 또한 제어구현에 따른 가공효과를 확인하기 위하여 예비시험으로서의 가공자료를 확보하여 분석한다.

2. 이론적 배경

2.1 시스템모델링

시스템의 각종 변수 및 실험을 통하여 계산된 전압과 속

도간의 관계인 시스템의 동력학적인 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{V(s)}{E_a(s)} = \frac{1}{5.072 \times 10^{-6} s^2 + 0.5047 s + 2.2} \quad (\text{m/V})$$

2.2 제어기

신경망시스템은 본 연구에서는 시스템의 특성이 파악된 상태에서 제어기의 성능을 비교하기 위하여 일반적으로 활용되는 PID제어기의 개념을 활용하였다. 본 시스템에서 사용된 PID제어기의 제어이득은 신경망시스템을 적용시켜 추출된 최적의 값을 기준으로 활용하였다.

3. 제어이득 및 위치오차

사다리꼴의 속도궤적을 추종하는 기준궤적에 대한 위치오차를 산정하기 위하여 Figs 1 및 2 와 같은 위치궤적 및 오차경향을 참조하여 RMS오차를 구할 수 있다.

앞에서 제시한 모델에 대하여 PID제어기를 적용시켜 각각의 제어이득에 대한 성능을 평가한다.

비례 및 적분이득에 대한 RMS오차분포는 Figs 3 및 4와 같다. 각각의 이득의 조합에 대한 오차분포경향의 등고선도와 3차원그래프를 참조하여 가용한 영역을 결정할 수 있다.

유사한 방법으로 비례 및 미분이득에 대한 RMS오차분포는 Figs 5 및 6과 같다. 오차분포를 표시하는 등고선도를 참조하면 중간부분에서의 오차를 최소화시킬 수 있으며 이는 가시화된 3차원선도에서 확인할 수 있다.

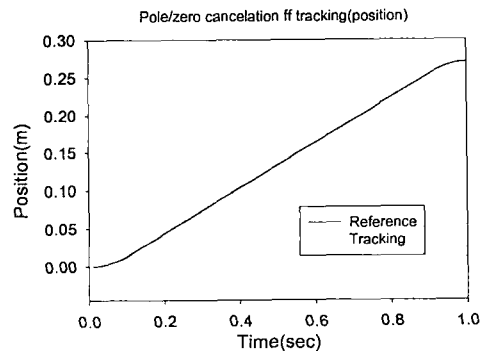


Fig. 1. Position tracking

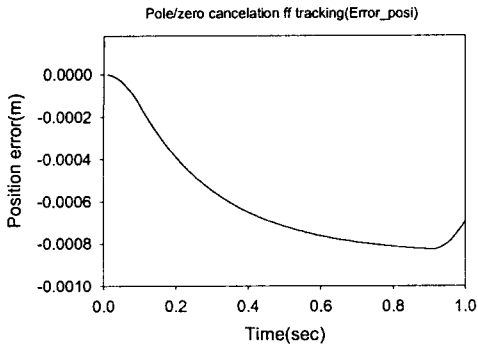


Fig. 2. Position error

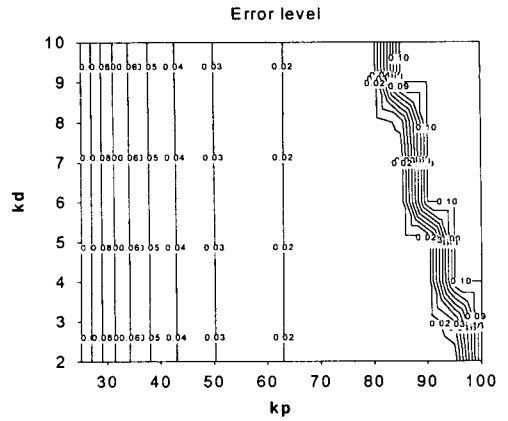


Fig. 5. Error level contour diagram

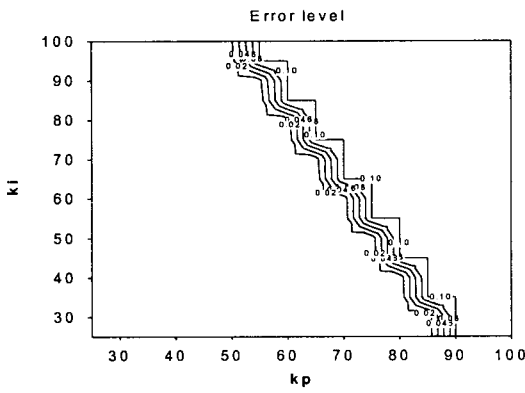


Fig. 3. Error level contour diagram

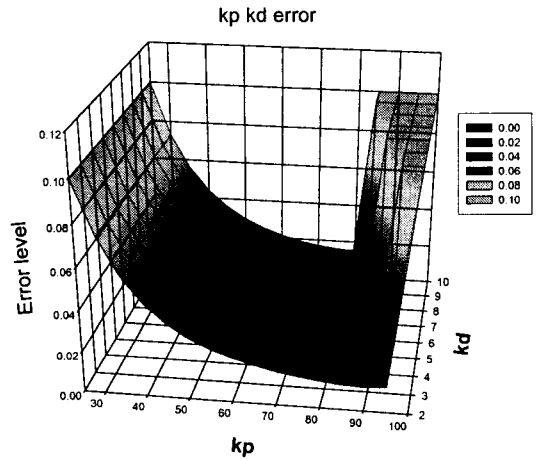


Fig. 6. 3D error level

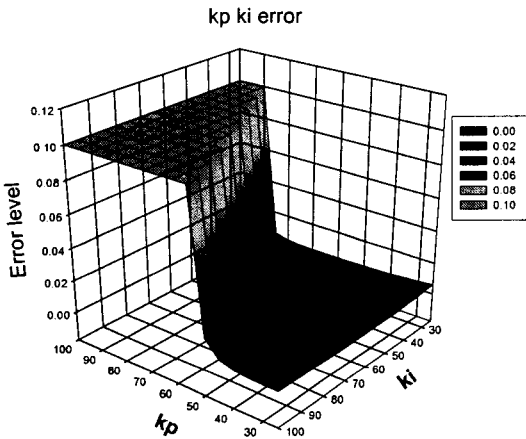


Fig. 4. 3D error level

미분 및 적분이득에 대한 RMS오차분포는 Figs 7 및 8과 같다. 이송계의 성능평가에 영향을 미치는 다른 인자 중 가속도변화에 대한 오차경향이 Figs 9-11에 나타나있다. 모든 가속도에 대하여 k_p 가 증가할수록 오차가 증가하였으며 k_p 가 40이하인 경우에도 약간 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 11은 특정 가속도에 대하여 k_p 별 오차를 표시하였으며 오차의 상한선을 설정하여 가용한 영역을 확인 할 수 있다. 여러 인자를 조합하여 성능을 판단하는 경우에 종합적인 고찰을 통하여 가용한 이득을 설정할 수 있다.

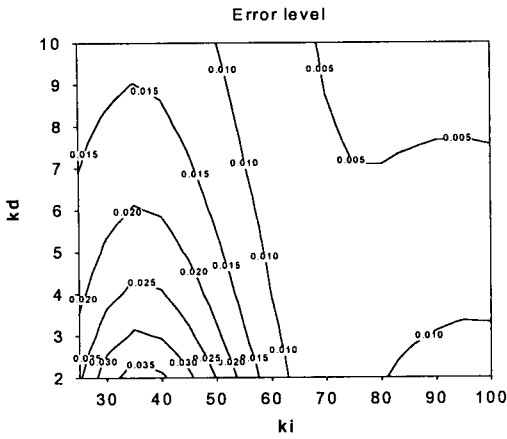


Fig. 7. Error level contour diagram

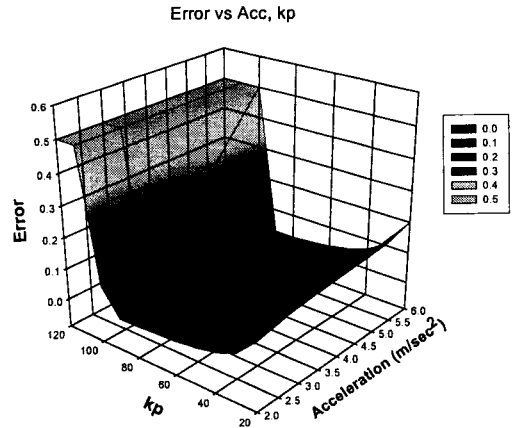


Fig. 10. 3D error level

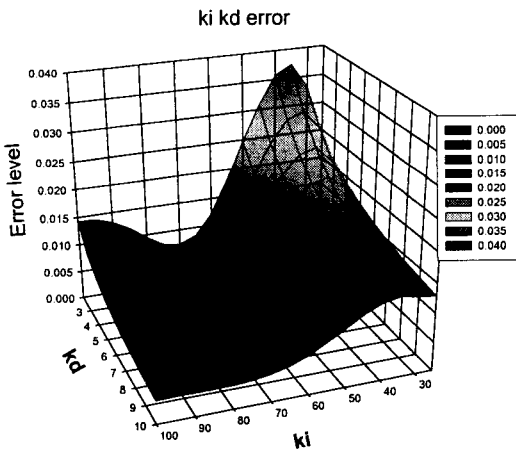


Fig. 8. 3D error level

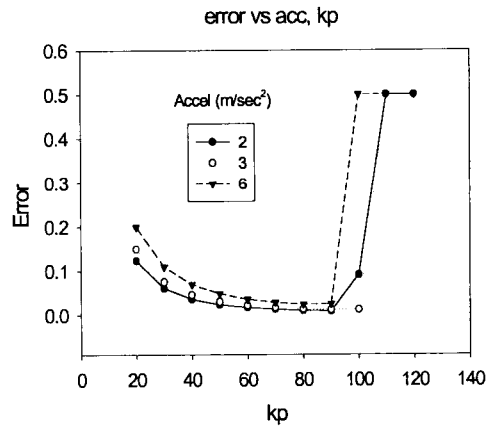


Fig. 11. 2D display of error level

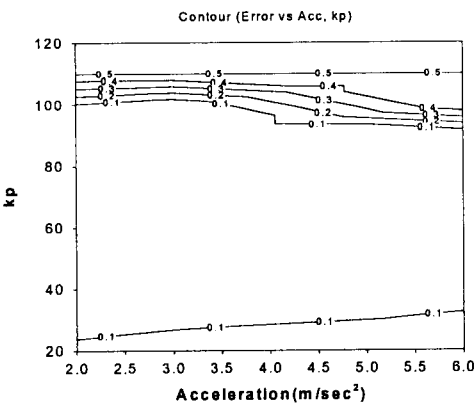


Fig. 9. Error level contour diagram

4. 가공특성분석

리니어모터를 이용한 이송시스템의 특성을 분석하기 위하여 특정한 가공특성분석을 통한 예비실험을 수행한다. Fig. 12에 나타난 것과 같은 엔드밀가공에 대하여 가공 중에 이송조건 변화에 따른 특성을 분석한다. 신호검출을 위한 센서로서 AE, 가속도센서 및 공구동력계가 사용되었다. 측정된 신호는 RMS로 처리하여 정량화시켰다. 작업조건 중 이송속도는 65, 110, 185 mm/min의 3가지로 변화시켰으며 절삭깊이는 1.0 mm에서 3.0 mm까지 1.0 mm 씩 변화시켰다.

Fig. 13은 절삭깊이에 대한 이송속도별 AE신호의 RMS 수치를 상대적으로 표시한 것이다. 일반적으로 절삭깊이가

증가할수록 신호의 크기가 증가하였으며 이송속도가 높은 경우에는 전반적으로 낮은 경우보다 작은 RMS값을 보이고 있다.

Figs 14-16은 공구동력계를 사용하여 가공 중에 절삭력을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 이송방향인 x축 방향으로의 성분분석에 의하면 절삭깊이와 이송속도가 증가할수록 신호의 크기가 증가하였다. 이송방향과 직각인 y축 및 z축 방향에 대하여도 증가하는 이송속도와 절삭깊이에 대하여 큰 절삭저항을 관찰할 수 있었다.

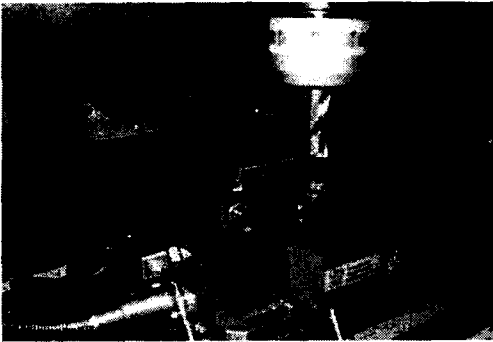


Fig. 12. Experimental apparatus

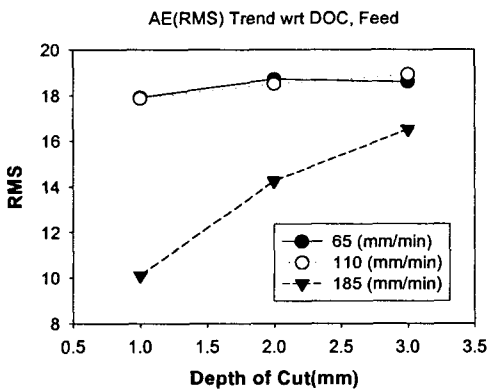


Fig. 13. AE trend

Figs 17-19는 가속도센서를 사용하여 가공 중에 발생하는 가속도성분을 표시한 것이다. 공작물 고정구의 견고함, 공구와 공작물의 상호작용에 따라 가속도 신호가 영향을 받을 것으로 추정되나 절삭깊이 증가에 대하여 증가하는 경향이 관찰되었을 뿐, 이송속도의 변화에 대하여는 일관성 있는 결과를 얻을 수 없었다. z축에 대한 신호처리 결과에서 만 이송속도 증가시 가속도신호의 크기가 증가하는 결과가

관찰되었다.

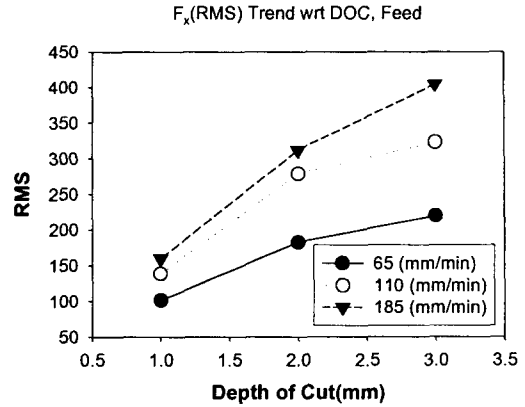


Fig. 14. Fx trend

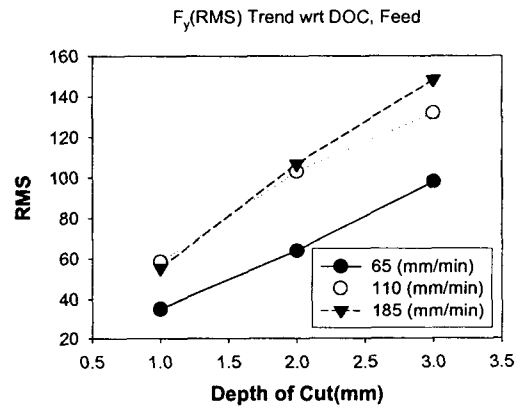


Fig. 15. Fy trend

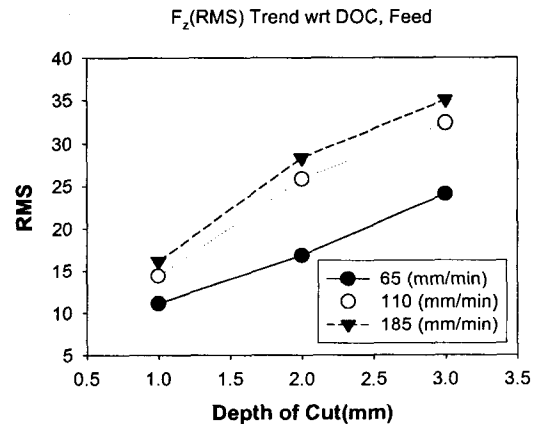


Fig. 16. Fz trend

5. 결 론

리니어모터를 이용한 이송시스템의 제어특성을 개선하고 가공특성을 분석하기 위한 실시시험결과 및 예비실험결과가 정리되었으며 다음과 같은 관점에서 추가적인 작업을 추진하고자 한다.

이송계의 제어는 복합적인 인자를 기준으로 가속도, 최고 속도, 가공궤적 등에 대한 추종오차를 최소화시키도록 설계되어야 하므로 좀 더 다각적인 측면에서 연구를 수행한다.

리니어모터 이송시스템의 특성을 분석하기 위한 예비연구로서 재래식이송시스템을 이용한 가공특성을 엔드밀가공에 국한시켜 실시하였으며 이를 여러 가공(디스크연삭 및 브러시연삭 등)에 적용시켜 분석한다. 특히 이송계의 구성부가 가공에 미치는 영향을 분석하기 위하여 이송계의 요소별로 센서를 활용하여 신호를 측정하며 분석수단으로 신경망시스템을 활용한다.

참고 문헌

- (1) Renton, D. and Elbestawi, M.A., 2000, "High Speed Servo Control of Multi-Axis Machine Tools", *Int'l J. of Mach Tool & Manufact.*, Vol. 40, pp. 539~559,
- (2) Ha, K.S., Im, T.B., Chung, J.K. and Yang, J.M., 1999, "High Speed Position Control System with Linear Brushless DC Motor", *Proc. of ICEE*, Vol. 2, pp. 259~262
- (3) Kumin, L., Stumberger, G., Dolinar, D. and Jezernik, K., 1999, "Modeling and Control Design of a Linear Induction Motor", *Proc. of IEEE, ISIE*, Vol., 2, pp. 963~967
- (4) Basie, E., Benzi, F. and Buja, G., 1999, "Force Disturbance Compensation for an A.C. Brushless Linear Motor", *Proc. of IEEE ISIE*, Vol. 3, pp 1350~1354
- (5) Choi, C., Tsao, T.C. and Matsubara, A., 1999, "Control of Linear Motor Machine Tool Feed Drivers for End Milling" Robust MIMO Approach", *Proc of ACC*, Vol. 5, pp. 3723~3727

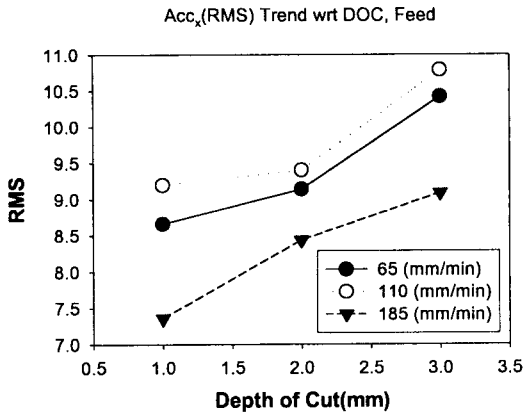


Fig. 17. Acceleration trend(X)

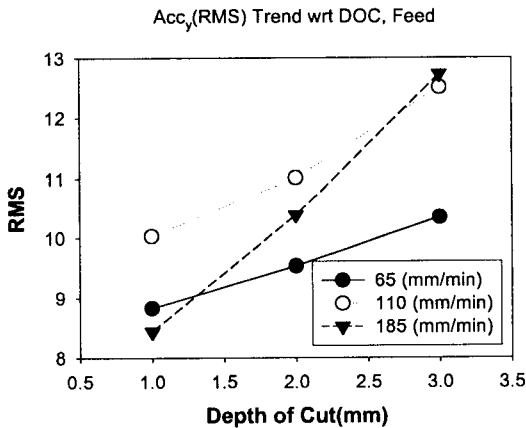


Fig. 18. Acceleration trend(Y)

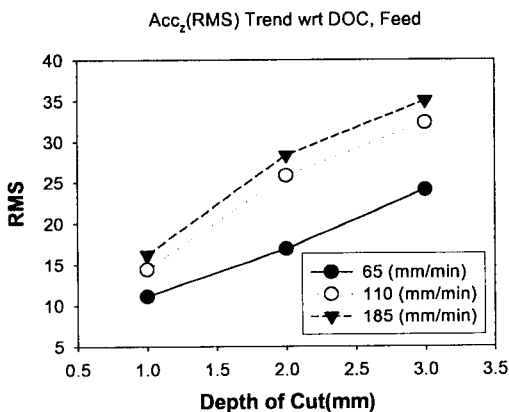


Fig. 19. Acceleration trend(Z)