

Analysis of Motor Performance in Normal Finger Force Capabilities

Hyunji Park¹, Baekhee Lee¹, Kihyo Jung², Byunghwa Lee³, Duk L. Na³, and Heecheon You¹

¹Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH, Pohang, 790-784

²Department of Industrial Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 680-749

³Department of Neurology, Sungkyunkwan University School of Medicine, Samsung Medical Center, Seoul, 135-710

ABSTRACT

Objective: The present study is to analyze motor performances by evaluating finger force control capabilities in normal controls by age and gender. **Background:** Four phases of the force control capabilities consist of initiation, development, maintenance, and termination; however, the existing studies with regards to motor performances have been primarily conducted on reaction time of the initiation phase. **Method:** The study measured initiation time (IT), development time (DT), maintenance error (ME), termination time (TT) of 360 normal controls (30 males and females from each of age group 20s to 70s) by force control phase using Finger Touch (FT) system. Three-factor mixed-subjects ANOVA was conducted to analyze effects of age (20s ~ 70s), gender (male, female), and hand (left hand, right hand) on finger force control capabilities ($\alpha = .001$). **Results:** Age and gender were significant in all phases and maintenance phase, respectively. IT of 60s and 70s had 9% and 19% higher than that of 20s ~ 50s. DT of 60s and 70s had 9% and 24% higher than that of 20s ~ 50s. ME of 60s and 70s had 43% and 110% higher than that of 20s ~ 50s. TT of 60s and 70s had 22% and 42% higher than that of 20s ~ 50s. ME of female in 20 ~ 50s, 60s, and 70s had significantly 22%, 42%, and 67% higher than that of male. Aforementioned measures of patients with aMCI, svMCI, and SVaD had 1.1 ~ 3.4 times higher than those of normal controls. **Application:** The characteristics of normal force control capabilities can be applied to develop a diagnostic model which evaluates quantitatively the existence and severity for various patients with motor intentional disorders.

Keywords: Motor performance, Finger force control capability, Age effect, Gender effect, Quantitative diagnostic model

1. Introduction

운동능력(psychomotor performance)은 perceptual process에 근간한 운동 수행 능력으로, 대뇌의 운동 피질(motor cortex)과 감각 피질(sensory cortex)에서 통제된다. 운동능력의 저하는 골격근 양의 감소, 근력 저하, 인지 감퇴, 뇌 손상 등에 기인하며 연령이 증가함에 따라 저하되는 것으로 알려져 있다(Holvia et al., 2012; Ward et al., 2003). 운동능력이 저하되면 hand나 finger와 같은 신체 기관 움직임에 영향을 주어 일상생활 중 기본동작 수행이 어려울 수 있다(Vinoth et al., 2001).

기존 운동능력 유관 연구들은 motor performance test (예: finger tapping, finger pinch)를 수행하여 운동능력 및 운동통제 기능을 평가하였다. Der and Deary(2006)는 finger tapping test를 수행하여 정상인의 reaction time

(RT)은 나이가 증가할수록 급격하게 증가(20대 ~ 50대: 300 ~ 350 msec, 60대 ~ 80대: 350 ~ 650 msec)하며, 남성이 여성보다 30 msec 정도 빠른 경향을 파악하였다. 또한, Vinoth et al.(2001)은 finger pinch task를 수행하여 연령 집단 별 일정한 힘을 유지하는 능력을 평가한 결과, finger force fluctuation은 target force가 클수록 고 연령 집단이 저 연령 집단보다 큰 것으로 분석되었다.

운동능력은 평가대상의 연령과 성별 등의 다양한 인자를 체계적으로 반영하여 운동국면 별 힘 통제 특성(force control capabilities)을 파악함으로써 정량적으로 평가될 수 있다. 인간의 운동국면은 시작, 도달, 유지, 그리고 종결의 네 가지로 분류되며, 국면 별로 힘 통제 특성이 상이하게 나타난다(Heilman, 2004; Seo et al., 2009). 기존 연구들은 시작과 유지국면에 대한 힘 통제 특성(e.g., RT, force fluctuation)을 평가하는 연구는 많았으나, 도달과 종결국면에 대한 분석은

미흡하였다. 또한, Yoon et al.(2012)은 네 가지 운동국면에 대해 정상인과 뇌 손상 환자의 운동능력을 비교하였으나, 정상인의 표본 수가 10으로 작다는 한계점이 있다.

본 연구는 네 가지 운동국면 별 손가락 힘 통제 능력을 평가하여 정상인 힘 통제 특성을 체계적으로 분석하고자 한다. 본 연구는 정상인 360명(20대 ~ 70대 남녀 각 30명)을 대상으로 운동국면 별 finger force를 측정하여 연령, 성별, 그리고 손이 운동능력에 미치는 효과를 분석한다. 본 연구는 정상인과 뇌 손상 환자들의 힘 통제 능력을 비교하였다.

2. Force Control Capability Evaluation

2.1 Apparatus

본 연구는 운동국면 별 손가락 힘을 측정하기 위해 Finger Touch (FT; precision = 0.196 N, sampling rate = 30 ~ 32 Hz; SeedTech Co., South Korea) 시스템을 사용하였다. FT 시스템은 Figure 1과 같이 손가락 힘 측정을 위한 두 개의 finger dynamometer와 힘 측정 정보 제공용 스크린으로 구성된다. 피검사자는 힘 측정 센서 및 스크린으로부터 각각 50, 70 cm 거리에 착석하고, finger dynamometers는 중앙을 기준으로 좌, 우 15 cm 떨어진 위치에 고정된다.

2.2 Force control tasks and measures

본 연구는 운동국면 별로 Figure 2와 같은 시작시간 (initiation time, IT), 도달시간(development time, DT), 유지오차(maintenance error, ME), 종결시간(termination time, TT)의 네 가지를 평가하였다. 첫째, IT는 피검사자가 센서 위 1 cm에 검지손가락을 위치한 상태로 스크린 중앙의

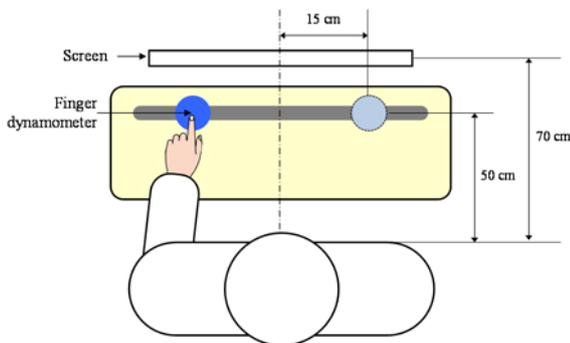


Figure 1. Layout of Finger Touch System

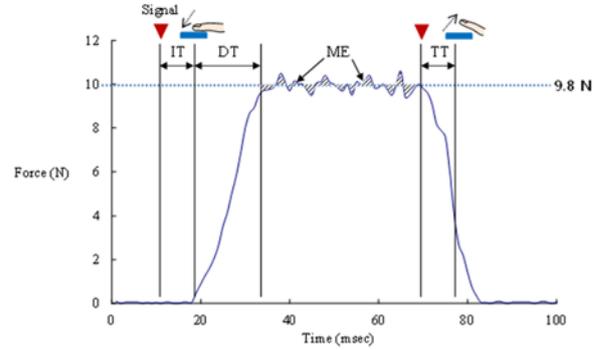


Figure 2. Four measurements by force control phase

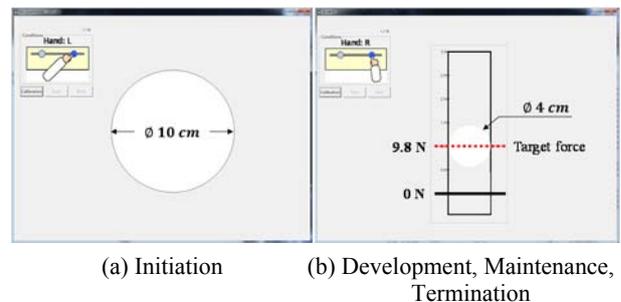
흰색 원에 무작위(2~5 sec)로 제시되는 빨간 신호에 반응하여 dynamometer를 누르는데 까지 소요된 시간이다 (Figure 3.a). 둘째, DT는 피검사자가 손가락 힘을 증가시켜 목표 힘인 9.8N까지 도달하는데 걸리는 시간이다 (Figure 3.b). 셋째, ME는 피검사자가 10초 간 목표 힘을 최대한 유지할 때 Equation 1과 같이 계산된다(Figure 3.b). 마지막으로, TT는 피검사자가 목표 힘을 유지하다가 흰색 원이 무작위로 빨간색으로 변할 때 손가락을 dynamometer로부터 떼는데 소요된 시간이다(Figure 3.b).

$$\text{Maintenance error (ME)} = \frac{\sum_{t=0}^{10000} |f_t - 9.8|}{10000} \quad \text{Equation 1}$$

where, f_t = force (unit: N) at time t (unit: msec)

2.3 Participants

힘 통제 능력 평가실험은 손가락 힘 사용에 문제가 없는 정상인 360명을 대상으로 수행되었다. 피검사자는 20대 ~ 70대까지의 남녀 각각 30명씩 모집되었으며, 평균 연령은 20대 24.5 ± 3.0세, 30대 33.7 ± 2.8세, 40대 44.2 ± 2.6세, 50대 53.4 ± 2.7세, 60대 64.3 ± 2.7세, 그리고 70대 73.6 ± 2.4세인 것으로 나타났다.



(a) Initiation

(b) Development, Maintenance, Termination

Figure 3. User interfaces of the Finger Touch system

2.4 Experimental procedure

운동능력 평가실험은 세 단계 절차(S1. 실험 준비, S2. 연습 시행, S3. 본 실험)를 통해 수행되었다. 첫째, 실험 준비 단계에서는 피검사자에게 실험에 대해 설명하고 실험 참여 동의를 구했다. 둘째, 연습 시행 단계에서는 피검사자가 실험방법에 익숙해지도록 운동국면 별 4회씩 연습을 수행하였으며 필요 시 추가연습을 제공하였다. 마지막으로, 본 실험은 운동국면(시작, 도달, 유지, 종결) 별로 특정 손(왼손, 오른손)을 무작위로 8회씩 제시하여 총 16회(손 2가지 × 반복 8회)가 수행되었다.

2.5 Statistical analysis methods

본 연구는 연령(20대 ~ 70대), 성별(남, 여), 그리고 손(왼손, 오른손)이 유의수준 0.001에서 IT, DT, ME, 그리고 TT 각각에 대한 three-factor mixed-subjects ANOVA를 수행하였다. 유의한 효과에 대한 사후 검정으로는 Turkey-Kramer test를 수행하여 인자 간의 차이를 분석하였다. 또한, 정상인과 뇌 손상 환자의 IT, DT, ME, 그리고 TT를 비교하기 위해 F-test를 수행하였다. 본 연구는 운동국면 별 피검사자의 95% 신뢰구간을 벗어나는 데이터를 이상치로 간주(Barnett and Lewis, 1994)하였다. 본 연구의 통계분석에는 Minitab(ver. 14)과 SAS(ver. 9.2)가 활용되었다.

3. Results

3.1 Effects of age, gender, and hand

3.1.1 Initiation phase

정상인의 IT(unit: msec)에는 연령 효과와 연령대와 성별의 교호작용 효과가 유의한 영향을 미치는 것으로 분석되었다(Table 1 참조). IT는 Figure 4.a와 같이 20대 ~ 40대까지는 유사하나, 50대 이상의 고 연령일수록 서서히 증가하는 경향(20대 ~ 40대: 252.9 ± 63.4 , 50대 ~ 60대: 277.7 ± 58.8 , 70대: 307.7 ± 61.6)이 나타났다($F[5, 344] = 18.40, p < .001$).

3.1.2 Development phase

정상인의 DT(unit: msec)에는 연령과 손 효과가 유의한 영향을 미치는 것으로 분석되었다(Table 1 참조).

Table 1. ANOVA results by force control phase

Factors	시작	도달	유지	종결
Age (A)	$F(5, 344) = 18.40$ $p < .001^*$	$F(5, 347) = 4.95$ $p < .001^*$	$F(5, 347) = 47.04$ $p < .001^*$	$F(5, 341) = 19.08$ $p < .001^*$
Gender (G)	$F(1, 344) = 6.86$ $p = .009$	$F(1, 347) = 6.44$ $p = .012$	$F(1, 347) = 53.03$ $p < .001^*$	$F(1, 341) = 8.95$ $p = .003$
Hand (H)	$F(1, 337) = 0.06$ $p = .803$	$F(1, 347) = 15.56$ $p < .001^*$	$F(1, 347) = 0.21$ $p = .644$	$F(1, 332) = 4.62$ $p = .032$
A × G	$F(5, 344) = 5.07$ $p < .001^*$	$F(5, 347) = 1.24$ $p = .288$	$F(5, 347) = 7.18$ $p < .001^*$	$F(5, 341) = 1.07$ $p = .379$
A × H	$F(5, 337) = 2.11$ $p = .064$	$F(5, 347) = 0.48$ $p = .794$	$F(5, 347) = 1.39$ $p = .227$	$F(5, 332) = 0.85$ $p = .515$
G × H	$F(1, 337) = 1.03$ $p = .310$	$F(1, 347) = 0.10$ $p = .756$	$F(1, 347) = 0.14$ $p = .705$	$F(1, 332) = 1.38$ $p = .242$
A × G × H	$F(5, 337) = 0.51$ $p = .768$	$F(5, 347) = 0.55$ $p = .737$	$F(5, 347) = 1.15$ $p = .336$	$F(5, 332) = 0.78$ $p = .568$

* $p < .001$.

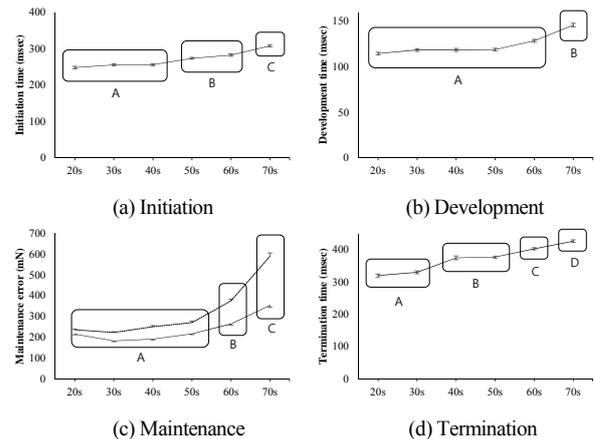


Figure 4. Age and gender effects by force control phase

DT는 Figure 4.b와 같이 20대 ~ 60대는 유사하며, 70대 이상의 고 연령에서 저하되는 경향(20대 ~ 60대: 119.9 ± 47.6 , 70대: 145.9 ± 63.5)이 나타났다($F[5, 347] = 4.95, p < .001$). 오른손의 DT는 왼손에 비해 유의하게 빠른 것으로 나타났으나, 차이가 4로 미미했다.

3.1.3 Maintenance phase

정상인의 ME(unit: mN)에는 연령, 성별, 그리고 연령과 성별의 교호작용이 유의한 영향을 미치는 것으로 분석되었다(Table 1 참조). ME는 Figure 4.c와 같이 고 연령일수록 증가하는 경향(20대 ~ 50대: 223.9 ± 95.0 , 60대: 319.8 ± 171.8 , 70대: 469.4 ± 299.5)이 나타났다($F[5, 347] = 47.04, p < .001$). 여성($323.2 \pm$

220.0)은 남성(238.0 ± 126.9)보다 85만큼 유지를 못하는 것으로 분석되었다($F[1, 347] = 53.03, p < .001$). 연령대와 성별의 교호작용으로는 Figure 4.c와 같이 모든 연령대에서 여성이 남성보다 유지 능력이 저하되는 것으로 나타났으나, 연령이 증가할수록 남녀간 ME의 차이(20대: 20.8, 30대: 40.5, 40대: 59.8, 50대: 54.5, 60대: 110.8, 70대: 235.8)가 증가하는 것으로 나타났다($F[5, 347] = 7.18, p < .001$).

3.1.4 Termination phase

정상인의 TT(unit: msec)에는 연령 효과가 유의한 영향을 미치는 것으로 분석되었다(Table 1 참조). TT는 Figure 4.d와 같이 연령이 증가할수록 느려지는 경향(20대 ~ 30대: 325.6 ± 93.4 , 40대 ~ 50대: 376.6 ± 90.3 , 60대: 403.4 ± 77.2 , 70대: 427.1 ± 90.4)이 나타났다($F[5, 341] = 19.08, p < .001$).

3.2 Comparison of force control capabilities in normal controls with patients

정상인의 IT, DT, ME, 그리고 TT를 Yoon et al. (2012)에서 선행되었던 세 가지 유형의 뇌 손상 환자(amnesic mild cognitive impairment (aMCI), subcortical vascular MCI (svMCI), subcortical vascular dementia (SVaD))와 비교한 결과, Figure 5와 같이 모든 국면에서 뇌 손상 환자는 정상인에 비해 1.1 ~ 3.4배만큼 힘 통제 능력이 저하되는 것으로 나타났다(IT: $F[3, 2014] = 66.34, p < .001$, DT: $F[3, 2042] = 31.65, p < .001$, ME: $F[3, 2069] = 210.06, p < .001$, TT: $F[3, 2014] = 245.46, p < .001$). SVaD

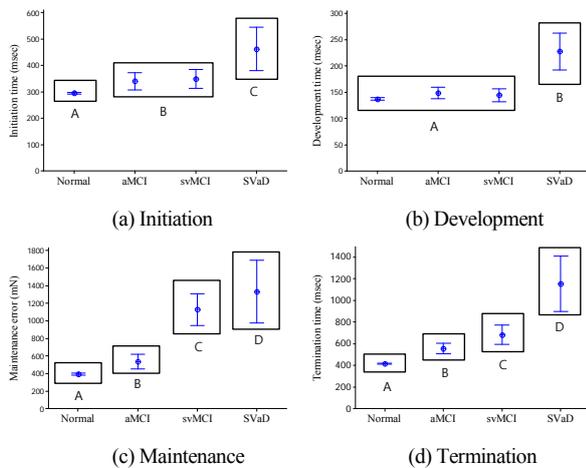


Figure 5. Comparison force control capabilities in normal controls with patients by force control phase

환자는 모든 국면에서 aMCI, svMCI 환자에 비해 정상인과 변별되는 정도가 큰 것으로 파악되었고, 특히 SVaD 환자의 ME, TT는 정상인보다 각각 3.4, 2.8배만큼 저하되는 것으로 분석되었다.

4. Discussion

본 연구는 정상인 손가락 힘 통제 능력을 측정하여 시작, 도달, 유지, 그리고 종결의 네 가지 운동국면 별로 파악하였다. 정상인 힘 통제 특성에 영향을 미치는 인자를 파악한 결과, 모든 운동국면에서 연령이 증가함에 따라 20대 ~ 50대는 서서히, 60 ~ 70대는 급속히 운동능력이 저하되는 것으로 분석되었다. 도달과 종결국면은 연령 증가에 따른 운동능력 저하 양상이 시작국면과 유사하나, 종결국면의 경우 Figure 4.d와 같이 연령 집단 간 차이가 시작, 도달국면에 비해 뚜렷한 것으로 판단된다. 성별 효과는 유지국면에서만 유의하게 남성의 운동능력이 여성보다 1.4배 높은 것으로 나타나, 힘 시작, 힘 도달, 힘 종결과 같은 순간적인 힘 통제 능력에는 성별이 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 손 효과는 도달국면에서 유의한 결과를 보였으나, 오른손과 왼손의 DT 차이가 4 msec로 미미하였다. 본 연구는 각 운동국면에 대해 simple task를 수행하여 IT, DT, ME, 그리고 TT를 평가하였으므로, 정상인은 오른손과 왼손에 따른 운동능력의 차이는 없는 것으로 사료된다.

시작, 도달, 유지, 종결의 운동국면 중 연령과 성별에 따른 변별성(discriminability)이 가장 높은 척도는 ME로 나타났다. ME는 순간적인 힘 통제 능력을 측정하는 IT, DT, TT와 달리 일정시간(예: 10초)동안 평가되는 척도이다. 본 연구의 20 ~ 50대 ME를 100으로 변환하여 분석한 결과, 70대의 ME는 남성과 여성 각각 약 1.8배, 2.4배 저하된 것으로 나타나 다른 척도들(IT: 남성 1.2배, 여성 1.2배; DT: 남성 1.2배, 여성 1.3배; TT: 남성 1.2배, 여성 1.2배)에 비해 변별성이 큰 것으로 파악되었다. 또한, ME가 가장 변별성 높은 척도인 것은 뇌 손상 환자의 힘 통제 능력을 평가한 선행 연구(Seo et al., 2009; Yoon et al., 2012)에서도 파악된 결과로서 운동능력 저하를 정량적으로 평가하는데 유용한 지표로 활용할 수 있다. 본 연구에서 분석된 정상인 힘 통제 특성은 운동의지장애(motor intentional disorder, MID)를 갖는 뇌 손상 환자의 운동능력을 정량적으로 평가할 수 있다.

또한, 네 가지 운동국면 별 정상인과 환자 유형에 따른 힘 통제 특성을 비교한 결과, 환자 유형에 따라 운동능력 저하 정도와 정상인과 구별되는 최적 운동국면이 다른 것으로 파악되었다. 예를 들면, SVaD 환자는 유지국면에서 ME가 정상인보다 3.4배 정도 저하되었고(IT: 1.6배, DT: 1.7배, TT: 2.8배), aMCI, svMCI 환자보다 저하 정도가 각각 2.5배, 1.2배 큰 것으로 파악되었다. 따라서, 본 연구의 정상인 힘 통제 특성은 뇌 손상 환자의 힘 통제 능력과 비교하여 MID 유무 및 정도를 정량적으로 평가하고 다양한 환자 유형을 선별하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 추후 연구로는 IT, DT, ME, 그리고 TT의 운동국면 별 힘 통제 특성 척도들과 유의한 인자(연령, 성별)를 반영하여 MID를 갖는 다양한 뇌 손상 환자 유형을 통계적으로 판별할 수 있는 모형 개발이 수행될 예정이다.

Acknowledgements

This work was jointly supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (No. 2010-0014026), Samsung Biomedical Research Institute grant (C-B0-217-3), and IT Consilience Creative Program of MKE and NIPA(C1515-1121-0003).

References

- Ann B. S., Felicia C. G., James J. L., Allan I. L., & Stewart A. F., Mild cognitive impairment in Parkinson's disease: Subtypes and motor characteristics. *Neurology*, 16(3), 177-180, 2010.
- Barnett V. & Lewis, T., *Outliers in Statistical Data*, Wiley & Sons, New York, 1994.
- Coslett H. B. & Heilman K. M., Hemihypokinesia after right hemisphere stroke. *Brain Cogn.*, 9, 267-278, 1989.
- Coslett H. B., Bowers D., Fitzpatrick E., Haws B., & Heilman K. M., Directional hypokinesia and hemispatial inattention in neglect. *Brain*, 113, 475-486, 1990
- Heilman K. M., Intentional neglect. *Frontiers in Bioscience*, 9, 694-705, 2004.
- Kertesz A., Nicholson I., Cancelliere A., Kassa K. & Black S. E., Motor impersistence: a right-hemisphere syndrome. *Neurology*, 35(5), 662-666, 1985.
- Mark H., MD., Dystonia: A sensory and motor disorder of short latency

inhibition. *Annals of Neurology*. 66(2), 125-127, 2009.

- Petersen R. C., Mild cognitive impairment as a diagnostic entity. *J Internal Medicine*, 256(3), 183-194, 2004.
- Seo S. W., Jung K. H., You H. C., Lee B. H., Kim G. M., Chung C. S., Lee K. H., & Na D. L., Motor-intentional disorders in right hemisphere stroke. *Cogn Behav Neurol*, 22, 242-248, 2009.
- Shim J. K., Brendan S. Lay, Vladimir M. Zatsiorsky, and Mark L. Latash, Age-related changes in finger coordination in static prehension tasks. *J Appl Physiol*, 97, 213-224, 2004.
- Stewart H. M., Stephnie K. P., Daniel J. S., Melissa C. G., Brian C., & James J. P., Decreased connectivity and cerebellar activity in autism during motor task performance. *Neurology*, 132(9), 2413-2425, 2009.
- Ward N. and Frackowiak R., Age-related changes in the neural correlates of motor performance. *Brain*, 126, 873-888, 2003.
- Yoon D. S., Jung K. H., Kim G. H., Kim S. H., Lee B. W., Seo S.W., You H. C., & Na D. L., Motor intentional disorders in vascular mild cognitive impairment and vascular dementia of subcortical type. *Neurocase*, 2012

Author listings

Hyunji Park: parkphj730@postech.ac.kr

Highest degree: B.S., Department of Industrial Engineering, Hongik University

Position title: M.S. candidate, Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Ergonomic Product Design & Development, Medical Ergonomic, Human performance assessment

Baekhee Lee: x200won@postech.ac.kr

Highest degree: M.S., Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

Position title: Ph.D. candidate, Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Ergonomic Product Design & Development, Digital Human Modeling & Simulation, Vehicle Ergonomic, Hospital Ergonomic

Kihyo Jung: kjung@ulsan.ac.kr

Highest degree: Ph.D., Department of Industrial & Management Engineering, Pohang University of Science and Technology

Position title: Assistant Professor, School of Industrial Engineering, University of Ulsan

Areas of interest: Ergonomic product design, Digital human simulation, Usability testing, Work-related musculoskeletal disorders(WMSDs) prevention

Byunghwa Lee: byuryhan@daum.net

Highest degree: M.S., Department of Psychology, Sungkyunkwan University

Position title: Neuropsychologist, Samsung Medical Center

Areas of interest: Cognitive neuroscience, Cognitive Psychology, Behavioral neurology

Duk L. Na: dukna@skku.edu

Highest degree: Ph.D., Department of Neurology, Korea University School of Medicine

Position title: Professor, Department of Neurology, Samsung Medical Center, Sungkyunkwan University School of Medicine

Areas of interest: Dementia and Cognitive Neurology, Cognitive training, Diagnosis, Treatment and Prevention for Dementia, Life style modification for dementia prevention

Hecheon You: hcyou@postech.ac.kr

Highest degree: Ph.D., Industrial Engineering, Pennsylvania State University

Position title: Associate Professor, Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Ergonomic product design & development, User interface design & evaluation, Digital human modeling & simulation, Human performance & workload assessment, Work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) prevention, Usability testing