



# 이상치 검출 기반 낙상 검출

연세대학교 생체역학연구실  
구범모

Department of Biomedical Engineering  
The Graduate School  
Yonsei University

# 01. 연구배경

## ◆ 낙상의 정의

- “가구, 벽 또는 다른 물체들 위로의 의도적인 위치변화를 제외한, 비자발적으로 지면, 바닥 또는 낮은 곳으로의 위치변화가 발생하는 것”

– WHO [1] –

## ◆ 낙상의 위험요인 [2-5]

- **내재적**: 근력 약화, 균형 및 보행 상 문제, 약물 문제
- **외재적**: 환경적인 요소들 (미끄러운 바닥, 어두운 조명)
- 위험요인의 수가 증가할 수록 낙상 위험 증가 [4]
- 노화에 따라서 위험요인의 발현 가능성 증가 [5]



[1] Organization, W. H., Ageing, W. H. O., & Unit, L. C. (2008). WHO global report on falls prevention in older age. World Health Organization.

[2] Gauchard, G., Chau, N., Mur, J. M., & Perrin, P. (2001). Falls and working individuals: role of extrinsic and intrinsic factors. Ergonomics, 44(14), 1330–1339.

[3] Houry, D., Florence, C., Baldwin, G., Stevens, J., & McClure, R. (2016). The CDC Injury Center's Response to the Growing Public Health Problem of Falls Among Older Adults. American Journal of Lifestyle Medicine, 10(1), 74–77.

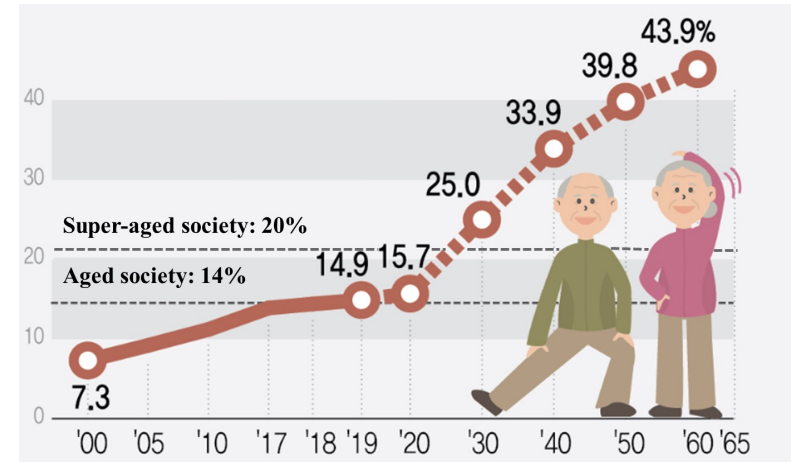
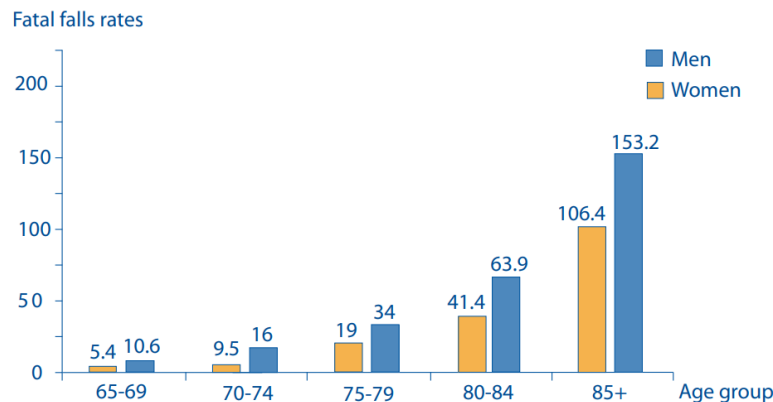
[4] Tinetti, M. E., Franklin Williams, T., & Mayewski, R. (1986). Fall risk index for elderly patients based on number of chronic disabilities. The American Journal of Medicine, 80(3), 429–434.

[5] Stevens, J. A. (2005). Falls among older adults—risk factors and prevention strategies. Journal of Safety Research, 36(4), 409–411.

# 01. 연구배경

## ◆ 낙상의 치사율과 인구 고령화

- 노화가 진행됨에 따라 잠재적인 낙상 치사율 증가 [5].
- 대한민국의 65세 이상 고령자들의 비율은 2020년에는 15.7%로 고령사회에 진입했으며, 2025년에는 20.3%로 초고령사회에 도달할 것으로 예상됨 [6].



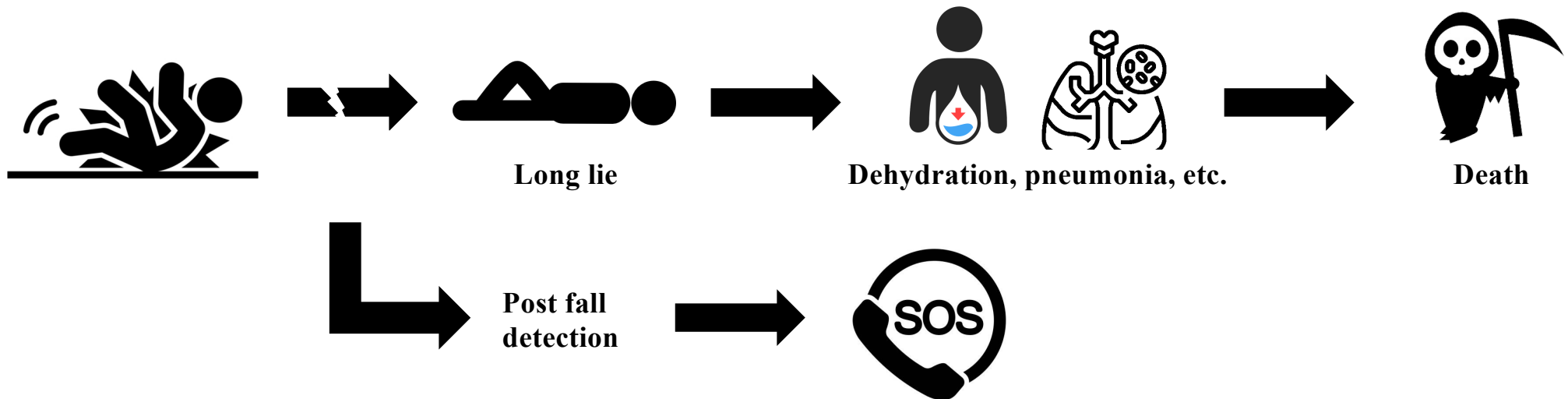
[5] Stevens, J. A. (2005). Falls among older adults—risk factors and prevention strategies. Journal of Safety Research, 36(4), 409–411.

[6] Statistics Korea. “2021 Statistics on the Aged.” (2021).

## 01. 연구배경

### ◆ 낙상의 위험성

- **골절**은 고령자들의 이동성에 영향을 미치고 죽음에 이르게 함 [7].
- 도움을 받지 못하고 **'long lie'** 상태를 오래 유지하게 되면 **탈수증, 폐렴, 심지어 죽을 가능성 있음** [8-10].



[7] Keene, G. S., Parker, M. J., & Pryor, G. A. (1993). Mortality and morbidity after hip fractures. *British Medical Journal*, 307(6914), 1248–1250.

[8] King, M. B., & Tinetti, M. E. (1995). Falls in community-dwelling older persons. *Journal of the American Geriatrics Society*, 43(10), 1146–1154.

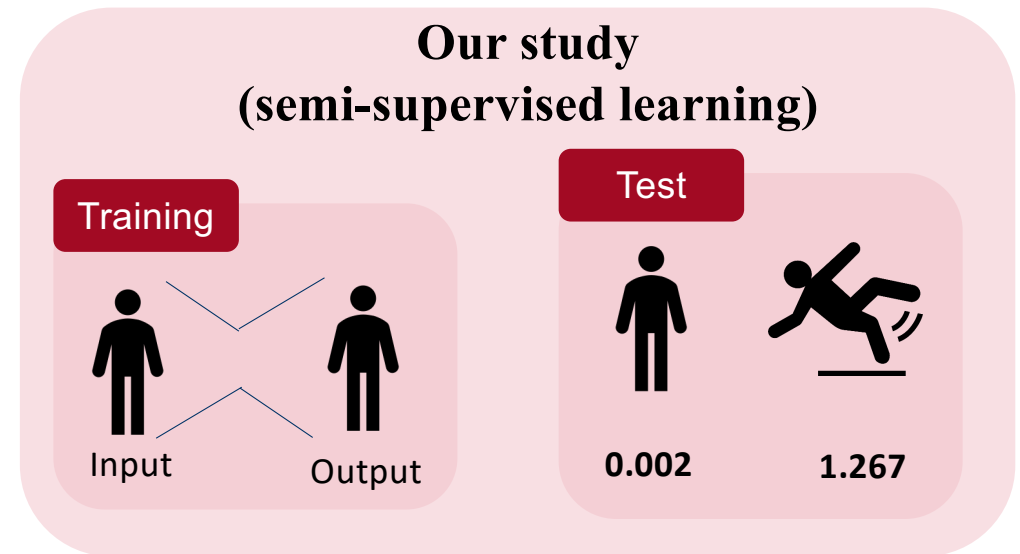
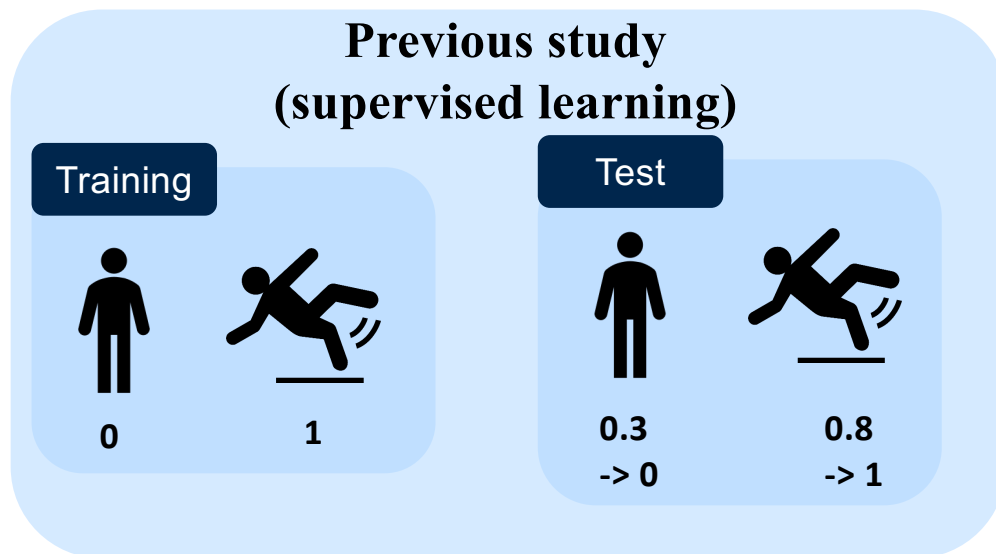
[9] Mallinson, W. J. W., & Green, M. F. (1985). Covert muscle injury in aged patients admitted to hospital following falls. *Age and Ageing*, 14(3), 174–178.

[10] Nevitt, M. C., Cummings, S. R., Kidd, S., & Black, D. (1989). Risk factors for recurrent nonsyncopal falls: a prospective study. *Jama*, 261(18), 2663–2668.

## 01. 연구배경

### ◆ 낙상 검출에서의 이상치 검출??

- ‘unseen falls’을 검출하기 위해서
- Khan & Taati et al [11]: Autoencoder 를 사용해서 충격후 낙상 검출 시도



## 02. 연구방법

### ◆ 공용데이터셋 (K-Fall [12])

- 실험대상자
  - 32명의 건강한 성인 남성  
( $24.9 \pm 3.7$  yrs,  $69.3 \pm 9.5$  kg,  $174.0 \pm 6.3$  cm)
- 실험 프로토콜
  - 21가지 ADLs과 15가지 falls을 3회 씩 반복 측정
- IMU: LPMS-B2
  - Three-axis accelerometer ( $\pm 16$  G)
  - Three-axis gyroscope ( $\pm 2,000$  °/s)
  - Three-axis magnetometer ( $\pm 16$  Gs)
  - Sampling rate = 100 Hz
- 충격 전 낙상 검출을 위한 유일한 데이터셋
  - Fall onset moment(낙상시작 시점) 와  
Fall impact moment(낙상 종료 시점) 제공

| Task Code | Task ID | Description                                                                              |
|-----------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| D01       | 01      | Stand for 30 seconds                                                                     |
| D02       | 02      | Stand, slowly bend the back with or without bending at knees, tie shoe lace , and get up |
| D03       | 03      | Pick up an object from the floor                                                         |
| D04       | 04      | Gently jump (try to reach an object)                                                     |
| D05       | 05      | Stand, sit to the ground, wait a moment, and get up with normal speed                    |
| D06       | 06      | Walk normally with turn (4m)                                                             |
| D07       | 07      | Walk quickly with turn (4m)                                                              |
| D08       | 08      | Jog normally with turn (4m)                                                              |
| D09       | 09      | Jog quickly with turn (4m)                                                               |
| D10       | 10      | Stumble while walking                                                                    |
| D11       | 11      | Sit on a chair for 30 seconds                                                            |
| D12       | 12      | Sit on the sofa (back is inclined to the support) for 30 seconds                         |
| D13       | 13      | Sit down to a chair normally, and get up from a chair normally                           |
| D14       | 14      | Sit down to a chair quickly, and get up from a chair quickly                             |
| D15       | 15      | Sit a moment, trying to get up, and collapse into a chair                                |
| D16       | 16      | Stand, sit on the sofa (back is inclined to the support), and get up normally            |
| D17       | 17      | Lie on the bed for 30 seconds                                                            |
| D18       | 18      | Sit a moment, lie down to the bed normally, and get up normally                          |
| D19       | 19      | Sit a moment, lie down to the bed quickly, and get up quickly                            |
| D20       | 35      | Walk upstairs and downstairs normally (5 steps)                                          |
| D21       | 36      | Walk upstairs and downstairs quickly (5 steps)                                           |
| F01       | 20      | Forward fall when trying to sit down                                                     |
| F02       | 21      | Backward fall when trying to sit down                                                    |
| F03       | 22      | lateral fall when trying to sit down                                                     |
| F04       | 23      | Forward fall when trying to get up                                                       |
| F05       | 24      | lateral fall when trying to get up                                                       |
| F06       | 25      | Forward fall while sitting, caused by fainting                                           |
| F07       | 26      | lateral fall while sitting, caused by fainting                                           |
| F08       | 27      | Backward fall while sitting, caused by fainting                                          |
| F09       | 28      | Vertical(forward) fall while walking caused by fainting                                  |
| F10       | 29      | Fall while walking, use of hands to dampen fall, caused by fainting                      |
| F11       | 30      | Forward fall while walking caused by a trip                                              |
| F12       | 31      | Forward fall while jogging caused by a trip                                              |
| F13       | 32      | Forward fall while walking caused by a slip                                              |
| F14       | 33      | Lateral fall while walking caused by a slip                                              |
| F15       | 34      | Backward fall while walking caused by a slip                                             |

[12] Yu, X., Jang, J., Xiong, S., & Yu, X. (2021). A Large-Scale Open Motion Dataset (KFall) and Benchmark Algorithms for Detecting Pre-impact Fall of the Elderly Using Wearable Inertial Sensors. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 13.

## 02. 연구방법

### ◆ Window

- **Shifting window**
  - Length: 64 frames (0.64s)
  - Overlap: 75% (Step: 0.16 s)
- **Event-defined window**: 256 frames (2.56 s)
- Criteria of the labelling [49]
  - Fall: more than 40% of the window
  - ADLs: all frames

|    | ADLs           |                  | Falls          |                  |
|----|----------------|------------------|----------------|------------------|
|    | Type           | Window size/step | Type           | Window size/step |
| M1 | Sliding window | 0.64/0.16        | Sliding window | 0.64/0.16        |
| M2 | Event-defined  | 2.56/-           | Event-defined  | 2.56/-           |

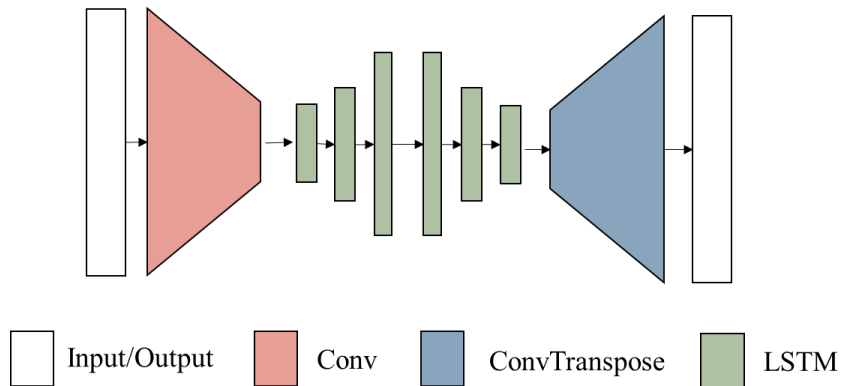
### ◆ Data Split

- Train-validation-test split
  - Training: 26 subjects
  - Test: 6 subjects
  - Validation split: 0.2

## 02. 연구방법

### ◆ ConvLSTM Autoencoder (ConvLSTM-AE)

- 단순한 CNN과 LSTM을 기반으로한 Autoencoder 구조를 가진 모델을 개발
- ResNet의 bottleneck(병목) 구조를 LSTM을 사용하여 구현
- 입력데이터를 압축한 뒤, 동일한 형태의 출력데이터로 복원  
→ 입력데이터와 복원된 출력데이터 간의 mean squared error (MSE) 값이 최소가 되도록 훈련 진행



## 02. 연구방법

### ◆ ConvLSTM Autoencoder (ConvLSTM-AE)

| Layer                  | Filters | Kernel size/Stride | Output size |
|------------------------|---------|--------------------|-------------|
| <b>Encoder</b>         |         |                    |             |
| Input                  | -       | -                  | 64×6×1      |
| Conv (LeakyReLU)       | 4       | (2, 2) / (2, 1)    | 32×5×4      |
| Conv (LeakyReLU)       | 8       | (2, 2) / (2, 1)    | 16×4×8      |
| Conv (LeakyReLU)       | 16      | (2, 2) / (2, 1)    | 8×3×16      |
| Conv (LeakyReLU)       | 32      | (2, 2) / (2, 1)    | 4×2×32      |
| Reshape                | -       | -                  | 8×32        |
| <b>LSTM bottleneck</b> |         |                    |             |
| LSTM (LeakyReLU)       | 64      | -                  | 8×64        |
| LSTM (LeakyReLU)       | 128     | -                  | 8×128       |
| LSTM (LeakyReLU)       | 64      | -                  | 8×64        |
| LSTM (LeakyReLU)       | 32      | -                  | 8×32        |
| Reshape                | -       | -                  | 4×2×32      |
| <b>Decoder</b>         |         |                    |             |
| Input                  | -       | -                  | 4×2×32      |
| ConvTran (ReLU)        | 16      | (2, 2) / (2, 1)    | 8×3×16      |
| ConvTran (ReLU)        | 8       | (2, 2) / (2, 1)    | 16×4×8      |
| ConvTran (ReLU)        | 4       | (2, 2) / (2, 1)    | 32×5×4      |
| ConvTran (tanh)        | 1       | (2, 2) / (2, 1)    | 64×6×1      |

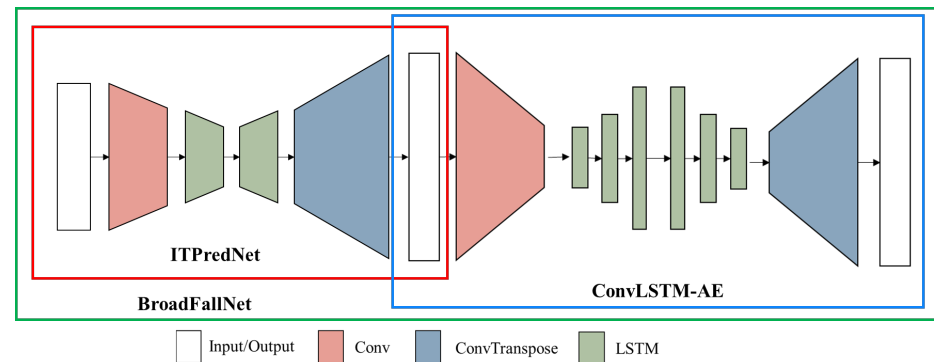
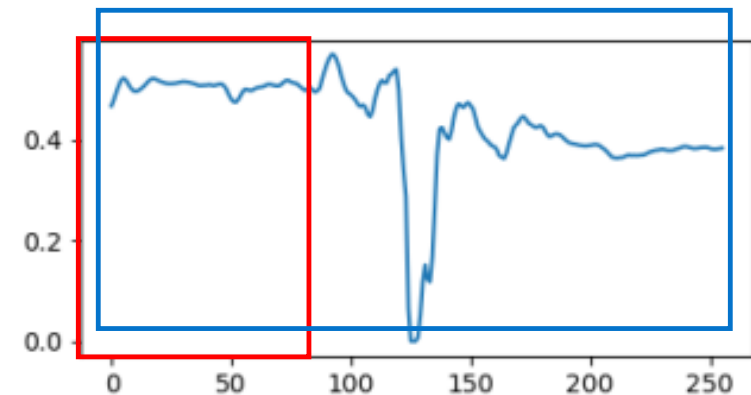
| Layer                  | Filters | Kernel size/Stride | Output size |
|------------------------|---------|--------------------|-------------|
| <b>Encoder</b>         |         |                    |             |
| Input                  | -       | -                  | 256×6×1     |
| Conv (LeakyReLU)       | 4       | (2, 2) / (2, 1)    | 128×5×4     |
| Conv (LeakyReLU)       | 8       | (2, 2) / (2, 1)    | 64×4×8      |
| Conv (LeakyReLU)       | 16      | (2, 2) / (2, 1)    | 32×3×16     |
| Conv (LeakyReLU)       | 32      | (2, 2) / (2, 1)    | 16×2×32     |
| Reshape                | -       | -                  | 32×32       |
| <b>LSTM bottleneck</b> |         |                    |             |
| LSTM (LeakyReLU)       | 64      | -                  | 32×64       |
| LSTM (LeakyReLU)       | 128     | -                  | 32×128      |
| LSTM (LeakyReLU)       | 64      | -                  | 32×64       |
| LSTM (LeakyReLU)       | 32      | -                  | 32×32       |
| Reshape                | -       | -                  | 16×2×32     |
| <b>Decoder</b>         |         |                    |             |
| Input                  | -       | -                  | 16×2×32     |
| ConvTran (ReLU)        | 16      | (2, 2) / (2, 1)    | 32×3×16     |
| ConvTran (ReLU)        | 8       | (2, 2) / (2, 1)    | 64×4×8      |
| ConvTran (ReLU)        | 4       | (2, 2) / (2, 1)    | 128×5×4     |
| ConvTran (tanh)        | 1       | (2, 2) / (2, 1)    | 256×6×1     |

## 02. 연구방법

### ◆ ITPredNet(IMU Trend Prediction Network):

#### 제안된 예측모델

- **First stage:** 충격 이전의 데이터로 충격 이후의 데이터를 복원하는 기능
- **Second stage:** 훈련된 데이터와 상이한 이상데이터를 검출하는 기능



## 02. 연구방법

### ◆ 평가 방법

#### ○ 평가 파라미터

$$Sensitivity = TP / (TP + FN)$$

$$Specificity = TN / (FP + TN)$$

$$Accuracy = (TP + TN) / (TP + FP + FN + TN)$$

$$Precision = TP / (TP + FP)$$

$$Recall = TP / (TP + FN)$$

$$F1\ score = 2 \times (Precision \times Recall) / (Precision + Recall)$$

#### ○ Anomaly score

$$Anomaly\ score = E_{x \sim P_X} |x - G(x)|_1$$

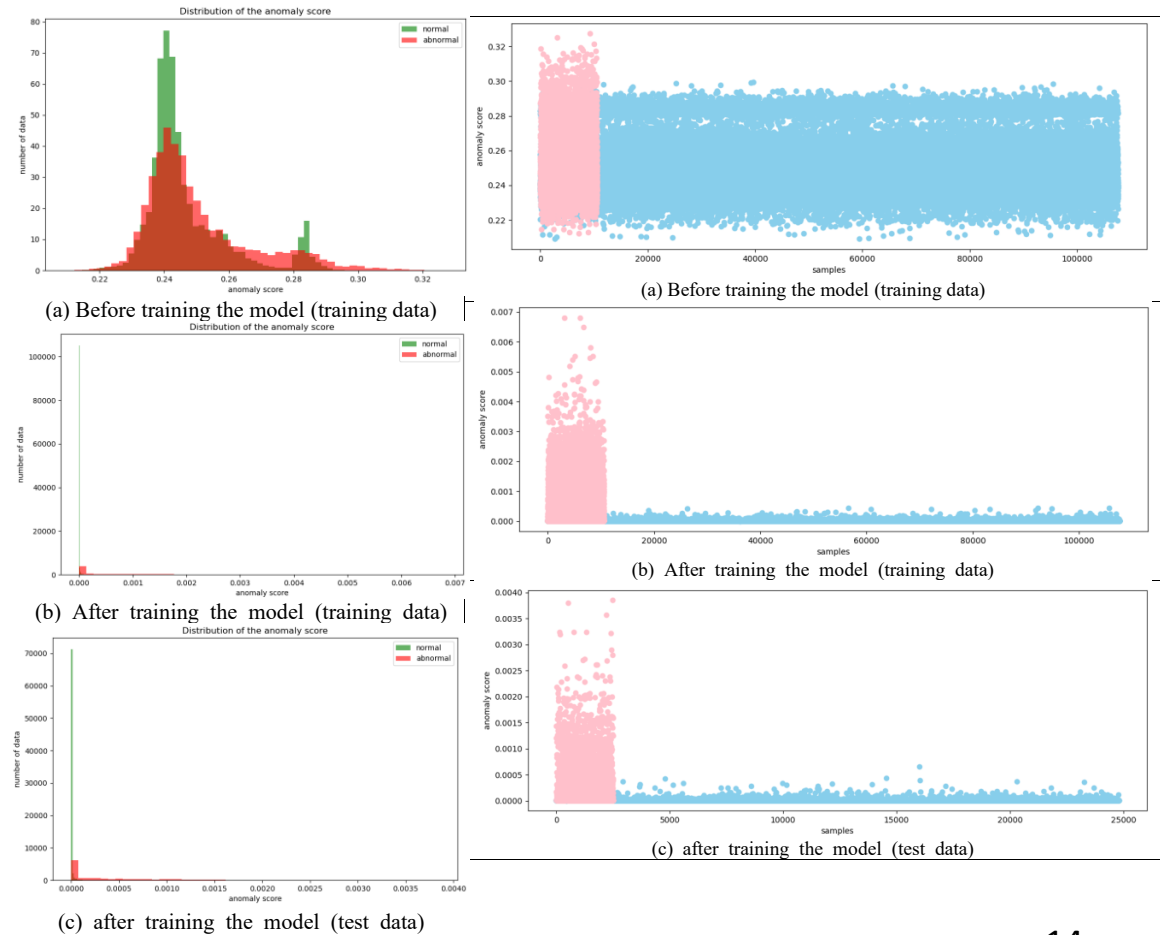
$$Threshold = Q3 + \omega(Q3 - Q1)$$

### 03. 연구결과

#### ◆ 충격전 낙상 검출

- 모델이 훈련되면 두 집단이 이전보다 잘 나뉘는 현상 보임
- 여전히 두 집단 사이에 겹치는 경향 보임

| Data        | Training |         | Test    |         |
|-------------|----------|---------|---------|---------|
| Weight      | 90       | 100     | 110     | 100     |
| Threshold   | 7.4e-05  | 8.2e-05 | 9.0e-05 | 8.2e-05 |
| F1 score    | 0.663    | 0.664   | 0.662   | 0.656   |
| Precision   | 0.908    | 0.924   | 0.933   | 0.873   |
| Recall      | 0.522    | 0.518   | 0.513   | 0.525   |
| Accuracy    | 0.953    | 0.953   | 0.953   | 0.949   |
| Sensitivity | 0.522    | 0.518   | 0.513   | 0.525   |
| Specificity | 0.995    | 0.996   | 0.996   | 0.992   |
| TP          | 5511     | 5470    | 5420    | 1317    |
| FN          | 5047     | 5088    | 5138    | 1191    |
| TN          | 107022   | 107130  | 107190  | 24605   |
| FP          | 556      | 448     | 388     | 192     |

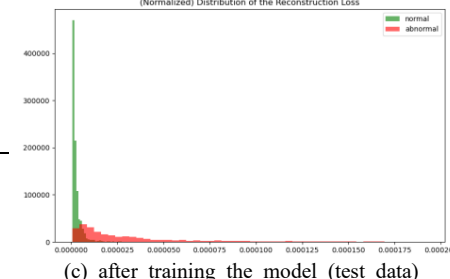
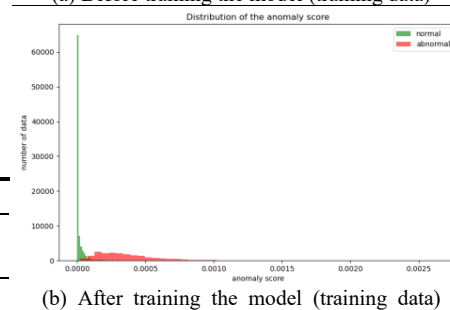
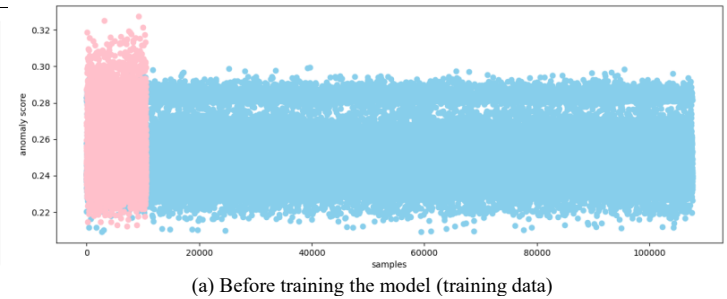
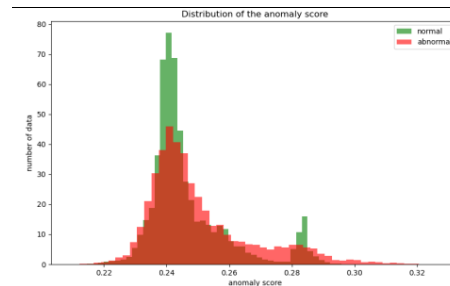


### 03. 연구결과

#### ◆ 충격 후 낙상 검출

- 모델이 훈련되면 두 집단이 이전보다 잘 나뉘는 현상 보임
- 충격 전 낙상 검출에 비하여 두 집단이 잘 분리되는 경향 보임

| Data        | Training |         | Test    |         |
|-------------|----------|---------|---------|---------|
| Weight      | 5        | 6       | 7       | 6       |
| Threshold   | 6.4e-05  | 7.5e-05 | 8.5e-05 | 7.5e-05 |
| F1 score    | 0.963    | 0.963   | 0.960   | 0.933   |
| Precision   | 0.943    | 0.952   | 0.958   | 0.910   |
| Recall      | 0.984    | 0.975   | 0.963   | 0.957   |
| Accuracy    | 0.965    | 0.966   | 0.963   | 0.936   |
| Sensitivity | 0.984    | 0.975   | 0.963   | 0.957   |
| Specificity | 0.949    | 0.958   | 0.964   | 0.917   |
| TP          | 1866     | 1848    | 1825    | 426     |
| FN          | 30       | 48      | 71      | 19      |
| TN          | 2101     | 2120    | 2133    | 463     |
| FP          | 112      | 93      | 80      | 42      |

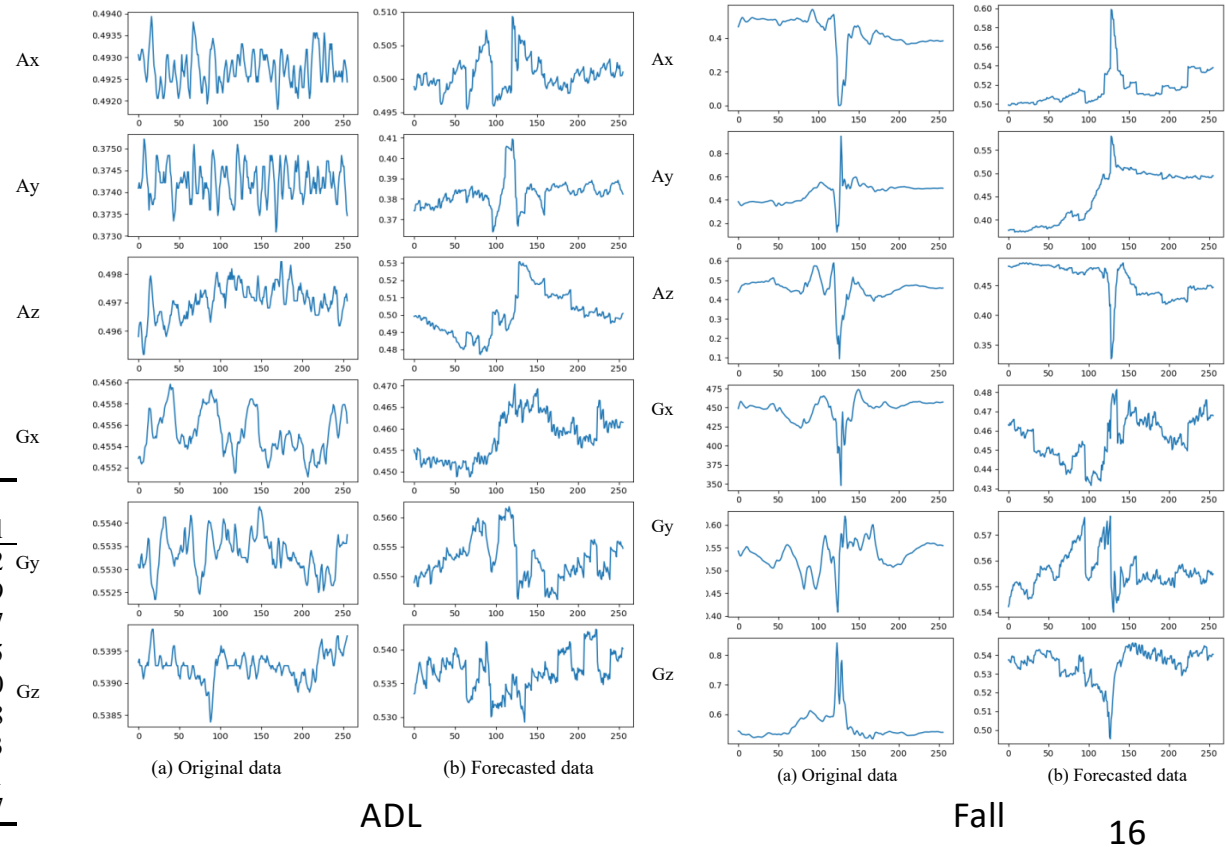


### 03. 연구결과

#### ◆ 데이터 예측

- Error: **가속도<각속도** and **낙상>일상생활동작**
- 완벽한 예측은 불가능  
어느정도 경향 복원 가능

| Feature | Training |          |          | Test     |          |          |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|         | ADL      | Fall     | Total    | ADL      | Fall     | Total    |
| Ax      | 0.000712 | 0.003872 | 0.002170 | 0.000725 | 0.003857 | 0.002192 |
| Ay      | 0.003241 | 0.003555 | 0.003386 | 0.003854 | 0.003930 | 0.003889 |
| Az      | 0.001272 | 0.005492 | 0.003219 | 0.001583 | 0.006117 | 0.003707 |
| Gx      | 0.000122 | 0.000428 | 0.000263 | 0.000128 | 0.000400 | 0.000255 |
| Gy      | 0.000719 | 0.001195 | 0.000939 | 0.000815 | 0.001168 | 0.000980 |
| Gz      | 0.000316 | 0.001264 | 0.000753 | 0.000311 | 0.001180 | 0.000718 |
| A       | 0.001742 | 0.004307 | 0.002925 | 0.002054 | 0.004634 | 0.003263 |
| G       | 0.000385 | 0.000962 | 0.000652 | 0.000418 | 0.000916 | 0.000651 |
| AG      | 0.001064 | 0.002634 | 0.001788 | 0.001236 | 0.002775 | 0.001957 |

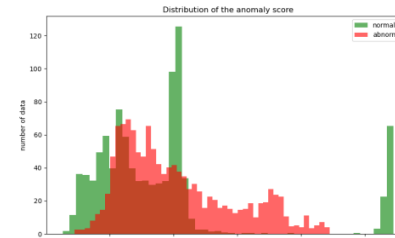


### 03. 연구결과

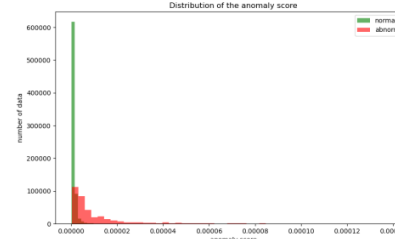
#### ◆ 제안된 방법을 사용한 충격전 낙상검출

- 기존 충격전 낙상검출 기법보다는 높은 성능
- 기존 충격후 낙상검출 기법보다는 낮은 성능

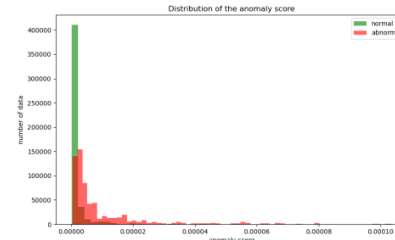
| Data        | Training |          | Test     |          |
|-------------|----------|----------|----------|----------|
| Weight      | 0.7      | 0.8      | 0.9      | 0.8      |
| Threshold   | 1.8e-0.6 | 1.9e-0.6 | 2.0e-0.6 | 1.9e-0.6 |
| F1 score    | 0.855    | 0.855    | 0.851    | 0.787    |
| Precision   | 0.860    | 0.870    | 0.877    | 0.784    |
| Recall      | 0.851    | 0.841    | 0.827    | 0.791    |
| Accuracy    | 0.867    | 0.869    | 0.867    | 0.800    |
| Sensitivity | 0.851    | 0.841    | 0.827    | 0.791    |
| Specificity | 0.881    | 0.892    | 0.901    | 0.808    |
| TP          | 1613     | 1594     | 1568     | 352      |
| FN          | 283      | 302      | 328      | 93       |
| TN          | 1950     | 1975     | 1994     | 408      |
| FP          | 263      | 238      | 219      | 97       |



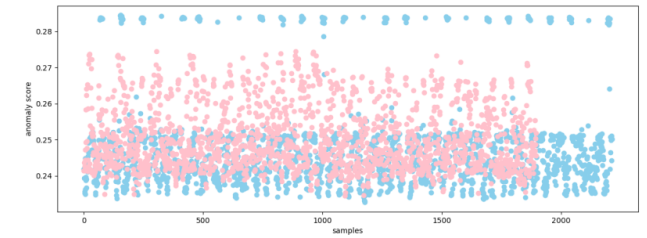
(a) Before training the model (training data)



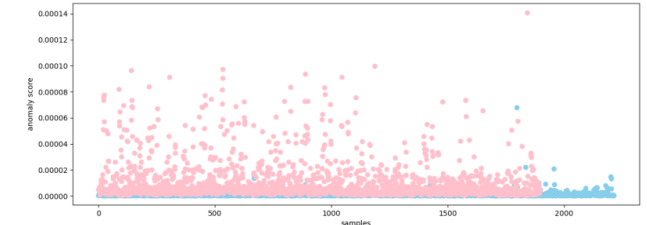
(b) After training the model (training data)



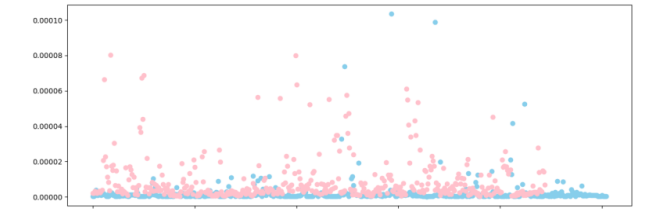
(c) after training the model (test data)



(a) Before training the model (training data)



(b) After training the model (training data)



(c) after training the model (test data)

## 04. 토의

### ◆ 자체 개발한 ConvLSTM-AE 모델을 연구에 적용하였으며, 충격 전 낙상 검출에서는 저조한 성능을 보임

- **분류모델**: 두 집단의 미세한 차이를 분류할 수 있도록 학습
- **복원모델**: 정상데이터를 잘 복원할 수 있도록 학습
  - > 문제는 충격 이전의 낙상 데이터는 정상데이터와 매우 유사하다는 것

### ◆ 충격 후 낙상 검출은 충격이라는 중요한 이벤트를 포함하므로 좋은 성능 보임

- **몇몇 충격을 포함하는 일상생활동작도 존재** (의자나 소파에 빠르게 앉기)
- **주기적으로 나타나는 anomaly score**: 위와 같은 동작들로 인한 오류

## 04. 토의

### ◆ 제안된 기법을 사용하면 충격 전 낙상 검출의 성능 높일 수 있었음

- 충격 이전의 데이터로 충격을 포함하는 데이터 복원
- 완벽한 기술은 아니며, 오직 **경향만을 복원**, **정확한 값은 복원 불가**
- 이전 선행연구[14-15]에서는 충격값만을 예측했던 것에 비하여, 더 넓은 범위를 커버하고, 여러 분야에 이용 가능한 기술이라고 생각됨.

[14] Kim, T. H., Choi, A., Heo, H. M., Kim, H., & Mun, J. H. (2020). Acceleration magnitude at impact following loss of balance can be estimated using deep learning model. *Sensors*, 20(21), 6126

[15] Lee, S., Koo, B., Yang, S., Kim, J., Nam, Y., & Kim, Y. (2022). Fall-from-height detection using deep learning based on IMU sensor data for accident prevention at construction sites. *Sensors*, 22(16), 6107.

## 04. 토의

### ◆ 한계점 및 추후 연구 방향

#### ○ 한계점

- 고령자 데이터 미분석 -> Kfall 및 FARSEEING의 고령자 공용 데이터셋에 적용
- Unseen fall에 대한 효능 미검증 -> 더 적은 동작으로 모델을 훈련시켜서 비교 분석
- 분류모델에 비하여 저조한 성능 -> window shifting을 통한 성능 향상 시도

#### ○ 추후 연구 방향

- 개발된 모델을 1)모바일 어플리케이션, 2) MCU에 임베딩
- 모델 경량화(MobileNet & 지식증류기법)



---

# Q & A

THANK YOU