

# ANALYSIS OF MOVEMENT VARIABILITY USING NONLINEAR DYNAMICS TIME SERIES

by

MIGUEL P XOCHICALE

A thesis submitted to  
The University of Birmingham  
for the degree of  
DOCTOR OF PHILOSOPHY

School of Engineering  
College of Engineering and Physical Sciences  
The University of Birmingham  
June 2018



## **Abstract**

This is where you write your abstract ...



I would like to dedicate this thesis to my loving parents . . .



## **Acknowledgements**

And I would like to acknowledge ...





# Table of contents

List of figures	<a href="#">xi</a>
List of tables	<a href="#">xiii</a>
<b>1 Introduction</b>	<b><a href="#">1</a></b>
1.1 Short title . . . . .	<a href="#">1</a>
1.2 Opening hook . . . . .	<a href="#">3</a>
1.3 Context . . . . .	<a href="#">3</a>
1.4 Gap in the literature . . . . .	<a href="#">3</a>
1.5 Research Questions . . . . .	<a href="#">3</a>
1.6 Argument . . . . .	<a href="#">3</a>
1.7 Outline of logic . . . . .	<a href="#">3</a>
<b>2 Movement Variability</b>	<b><a href="#">5</a></b>
2.1 Source of Variability in Human Movement . . . . .	<a href="#">5</a>
2.2 Sensors . . . . .	<a href="#">7</a>
2.3 Variability within and between persons . . . . .	<a href="#">7</a>
2.4 Variability for simple and complex activities . . . . .	<a href="#">7</a>
2.5 Short title . . . . .	<a href="#">7</a>
2.5.1 Time-domain . . . . .	<a href="#">7</a>
2.5.2 Frequency-domain . . . . .	<a href="#">8</a>

**Table of contents**

---

2.5.3	Nonlinear dynamics domain . . . . .	8
<b>3</b>	<b>State Space Reconstruction</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Experiments</b>	<b>13</b>
4.1	Dancing Salsa . . . . .	13
4.2	Simple movements . . . . .	14
4.3	Human-Humanoid Imitation . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Automatic Classification</b>	<b>15</b>
5.1	Convolutional Neural Networks (CNN) . . . . .	15
5.2	CNN Using time-series . . . . .	16
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>17</b>
6.1	Short title . . . . .	17
6.2	Short title . . . . .	17
	<b>References</b>	<b>19</b>
	<b>Appendix A How to install L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X</b>	<b>21</b>
	<b>Appendix B Installing the CUED class file</b>	<b>23</b>

# List of figures

2.1	Minion . . . . .	9
-----	------------------	---



## List of tables



# Chapter 1

1

## Introduction

2

### Summary and broad purpose of the chapter

3

\* How long (number of words)? \* Deadline \* What have you got?

4

\* Introduction \* Methods \* Results \* Discussion

5

### 1.1 Introduction

6

Lorem Ipsum is simply dummy text of the printing and typesetting industry (see Section 1.3). Lorem Ipsum ([Aupetit, 1991](#)) has been the industry's Ipsum ([Abramovich et al., 1995](#); [Conway, 1990](#); [Ljubič and Macaev, 1965](#)).

7

8

9

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices

10

11

12

13

14

15

16

## Introduction

---

1 bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac,  
2 nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue  
3 eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

4 Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem  
5 non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet,  
6 tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi.  
7 Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque  
8 a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus  
9 mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus  
10 luctus mauris.

11 Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt  
12 tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante.  
13 Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis,  
14 molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend  
15 at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend  
16 consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna.  
17 Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus.  
18 Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum  
19 pellentesque felis eu massa.

20 Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt  
21 ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea  
22 dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum  
23 wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat  
24 quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet  
25 nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.



---

**1.2 Opening hook**

<b>1.2</b>	<b>Opening hook</b>	<b>1</b>
<b>1.3</b>	<b>Context</b>	<b>2</b>
<b>1.4</b>	<b>Gap in the literature</b>	<b>3</b>
<b>1.5</b>	<b>Research Questions</b>	<b>4</b>
<b>1.6</b>	<b>Argument</b>	<b>5</b>
<b>1.7</b>	<b>Outline of logic</b>	<b>6</b>



## Chapter 2

1

## Movement Variability

2

### Summary and broad purpose of the chapter

3

\* How long (number of words)? \* Deadline \* What have you got?

4

\* Introduction \* Methods \* Results \* Discussion

5

### 2.1 Source of Variability in Human Movement

6

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut,  
placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero,  
nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque.  
Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis  
egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum  
urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer  
sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices  
bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac,  
nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue  
eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

## Movement Variability

---

1 Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem  
2 non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet,  
3 tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi.  
4 Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque  
5 a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus  
6 mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus  
7 luctus mauris.

8 Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt  
9 tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante.  
10 Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis,  
11 molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend  
12 at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend  
13 consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna.  
14 Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus.  
15 Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum  
16 pellentesque felis eu massa.

17 Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt  
18 ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea  
19 dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum  
20 wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat  
21 quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet  
22 nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

<b>2.2</b>	<b>Sensors</b>	1
<b>2.3</b>	<b>Variability within and between persons</b>	2
<b>2.4</b>	<b>Variability for simple and complex activities</b>	3
<b>2.5</b>	<b>Techniques to measure human movement variability</b>	4
<b>2.5.1</b>	<b>Time-domain</b>	6
	<p>Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.</p> <p>Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus</p>	7

## Movement Variability

---

mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

### 2.5.2 Frequency-domain

### 2.5.3 Nonlinear dynamics domain

And now to cite some more people [Ancey et al. \(1996\)](#); [Read \(1985\)](#)

I'm going to randomly include a picture [Figure 2.1](#).

If you have trouble viewing this document contact Krishna at: [kks32@cam.ac.uk](mailto:kks32@cam.ac.uk) or raise an issue at <https://github.com/kks32/phd-thesis-template/>

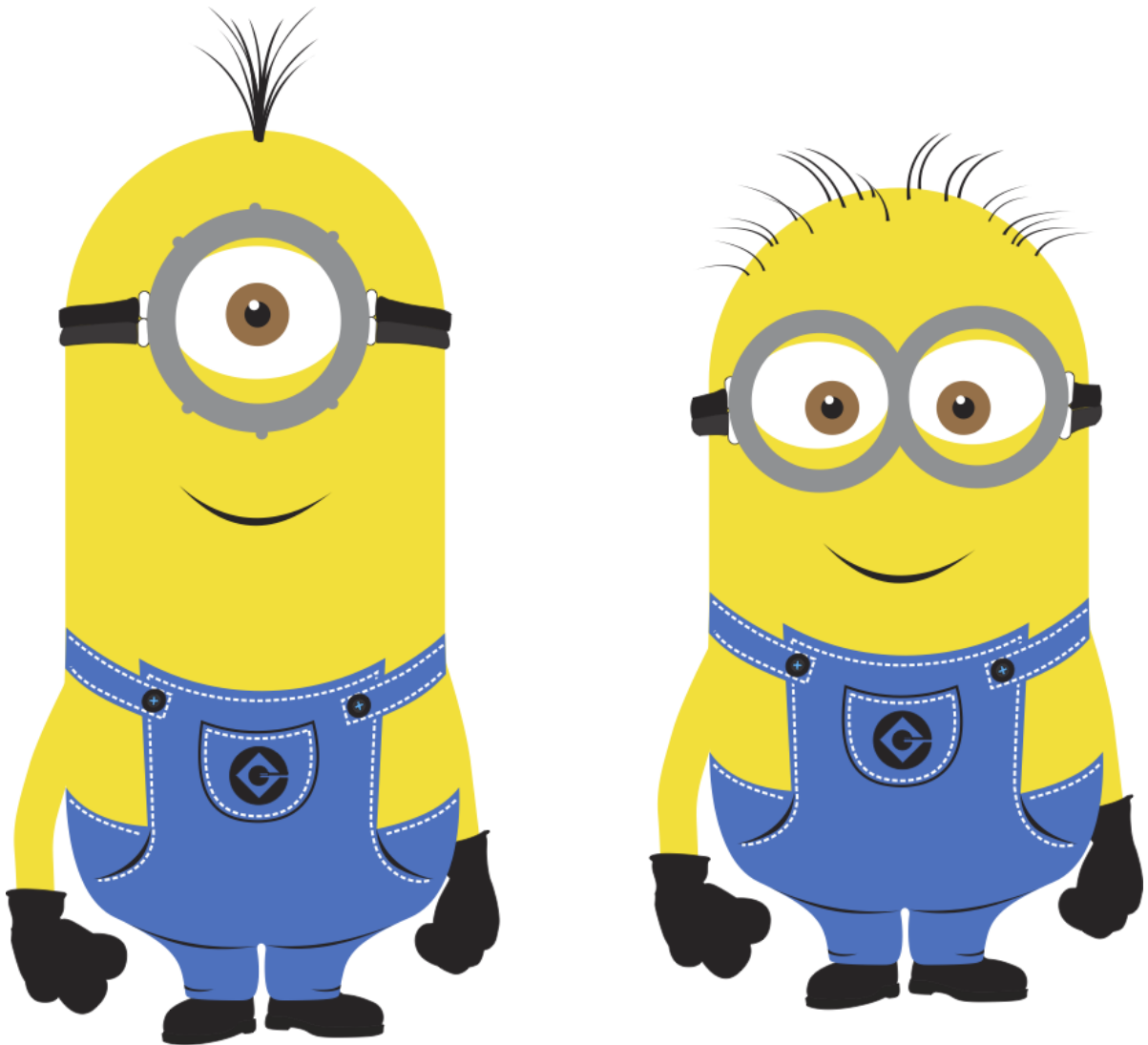


Fig. 2.1 This is just a long figure caption for the minion in Despicable Me from Pixar





## Chapter 3

1

## State Space Reconstruction

2

### Summary and broad purpose of the chapter

3

\* How long (number of words)? \* Deadline \* What have you got?

4

\* Introduction \* Methods \* Results \* Discussion

5



# Chapter 4

1

## Experiments

2

### Summary and broad purpose of the chapter

3

\* How long (number of words)? \* Deadline \* What have you got?

4

\* Introduction \* Methods \* Results \* Discussion

5

### 4.1 Dancing Salsa

6

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut,  
 placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero,  
 nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque.  
 Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis  
 egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum  
 urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer  
 sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices  
 bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac,  
 nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue  
 eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

## Experiments

---

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

## 4.2 Simple movements

## 4.3 Human-Humanoid Imitation

## Chapter 5

1

# Automatic Classification

2

## Summary and broad purpose of the chapter

3

\* How long (number of words)? \* Deadline \* What have you got?

4

\* Introduction \* Methods \* Results \* Discussion

5

## 5.1 Convolutional Neural Networks (CNN)

6

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut,  
placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero,  
nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque.  
Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis  
egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum  
urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer  
sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices  
bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac,  
nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue  
eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

## Automatic Classification

---

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

## 5.2 CNN Using time-series

## Chapter 6

1

## Conclusion

2

### Summary and broad purpose of the chapter

3

\* How long (number of words)? \* Deadline \* What have you got?

4

\* Introduction \* Methods \* Results \* Discussion

5

### 6.1 Summary of Argument

6

### 6.2 Implications

7





# References

- Abramovich, Y. A., Aliprantis, C. D., and Burkinshaw, O. (1995). Another characterization of the invariant subspace problem. *Operator Theory in Function Spaces and Banach Lattices*. The A.C. Zaanen Anniversary Volume, *Operator Theory: Advances and Applications*, 75:15–31. Birkhäuser Verlag. 2 3 4 5
- Ancey, C., Coussot, P., and Evesque, P. (1996). Examination of the possibility of a fluid-mechanics treatment of dense granular flows. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 1(4):385–403. 6 7 8
- Aupetit, B. (1991). *A Primer on Spectral Theory*. Springer-Verlag, New York. 9
- Conway, J. B. (1990). *A Course in Functional Analysis*. Springer-Verlag, New York, second edition. 10 11
- Ljubič, J. I. and Macaev, V. I. (1965). On operators with a separable spectrum. *Amer. Math. Soc. Transl. (2)*, 47:89–129. 12 13
- Read, C. J. (1985). A solution to the invariant subspace problem on the space  $l_1$ . *Bull. London Math. Soc.*, 17:305–317. 14 15



# Appendix A

1

## How to install L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

2

Debian/Ubuntu:

3

```
sudo apt-get install texlive texlive-latex-extra
```

4

```
sudo apt-get install psutils
```

5



## Appendix B

1

## Installing the CUED class file

2

$\LaTeX$ .cls files can be accessed system-wide when they are placed in the `<texmf>/tex/` 3  
latex directory, where `<texmf>` is the root directory of the user's  $\TeX$  installation. On 4  
systems that have a local texmf tree (`<texmflocal>`), which may be named “texmf-local” 5  
or “localtexmf”, it may be advisable to install packages in `<texmflocal>`, rather than 6  
`<texmf>` as the contents of the former, unlike that of the latter, are preserved after the 7  
 $\LaTeX$  system is reinstalled and/or upgraded. 8

