

# VU Research Portal

## Standing Well

Lubeck, A.J.A.

2016

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

### **citation for published version (APA)**

Lubeck, A. J. A. (2016). *Standing Well*.

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

### **E-mail address:**

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

---

# References

## References

1. Bos, J. E. Nuancing the relationship between motion sickness and postural stability. *Displays* **32**, 189–193 (2011).
2. Bos, J. E., Bles, W. & Groen, E. L. A theory on visually induced motion sickness. *Displays* **29**, 47–57 (2008).
3. Bos, J. E. & Bles, W. Theoretical considerations on canal-otolith interaction and an observer model. *Biol. Cybern.* **86**, 191–207 (2002).
4. Bles, W., Bos, J. E., de Graaf, B., Groen, E. & Wertheim, A. H. Motion sickness: only one provocative conflict? *Brain Res. Bull.* **47**, 481–487 (1998).
5. Raphan, T., Matsuo, V. & Cohen, B. Velocity storage in the vestibulo-ocular reflex arc (VOR). *Exp. brain Res.* **35**, 229–248 (1979).
6. Kawato, M. Internal models for motor control and trajectory planning. *Curr Opin Neurobiol* **9**, 718–727 (1999).
7. Einstein, A. On the relativity principle and the conclusions drawn from it. *Jahrb. der Radioakt. Elektron.* **4**, 411–462 (1907).
8. Merfeld, D. M., Zupan, L. & Peterka, R. J. Humans use internal models to estimate gravity and linear acceleration. *Nature* **398**, 615–618 (1999).
9. Wolpert, D. M., Ghahramani, Z. & Jordan, M. I. An internal model for sensorimotor integration. *Science (80)*. **269**, 1880–1882 (1995).
10. Hess, B. J. & Angelaki, D. E. Oculomotor control of primary eye position discriminates between translation and tilt. *J. Neurophysiol.* **81**, 394–398 (1999).
11. Pérennou, D. A. *et al.* Lateropulsion, pushing and verticality perception in hemisphere stroke: A causal relationship? *Brain* **131**, 2401–2413 (2008).
12. Barra, J. *et al.* Humans use internal models to construct and update a sense of verticality. *Brain* **133**, 3552–3563 (2010).
13. Horak, F. B. Postural orientation and equilibrium: What do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age Ageing* **35**, 7–11 (2006).
14. Oman, C. M. Sensory conflict in motion sickness: an observer theory approach. *NASA, Ames Res. Center, Spat. Displays Spat. Instruments* 1–16 (1989).
15. Solimini, A. G. Are there side effects to watching 3D movies? A prospective crossover observational study on visually induced motion sickness. *PLoS One* **8**, e56160 (2013).
16. Chang, C. H., Pan, W. W., Chen, F. C. & Stoffregen, T. A. Console video games, postural activity, and motion sickness during passive restraint. *Exp. brain Res.* **229**, 235–242 (2013).
17. Read, J. C. A. & Bohr, I. User experience while viewing stereoscopic 3D television. *Ergonomics* **57**, 1140–1153 (2014).
18. Pölönen, M., Salmimaa, M., Aaltonen, V., Häkkinen, J. & Takatalo, J. Subjective measures of presence and discomfort in viewers of color-separation-based stereoscopic cinema. *J. Soc. Inf. Disp.* **17**, 459–466 (2009).
19. Chang, C.-H., Pan, W.-W., Tseng, L.-Y. & Stoffregen, T. A. Postural activity and motion sickness during video game play in children and adults. *Exp. Brain Res.* **217**, 299–309 (2012).
20. Merhi, O., Faugloire, E., Flanagan, M. & Stoffregen, T. A. Motion sickness, console

- video games, and head-mounted displays. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* **49**, 920–934 (2007).
21. Chen, Y., Dong, X. & Chen, F. Control of a virtual avatar influences postural activity and motion sickness. *Ecol. Psychol.* **24**, 279–299 (2012).
  22. Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J. & Paul, J. P. What is balance? *Clin. Rehabil.* **14**, 402–406 (2000).
  23. Massion, J. Postural control system. *Curr. Opin. Neurobiol.* **4**, 877–87 (1994).
  24. Winter, D. A. Human balance and posture standing and walking control during. *Gait Posture* (1995).
  25. Gage, W. H., Winter, D. A., Frank, J. S. & Adkin, A. L. Kinematic and kinetic validity of the inverted pendulum model in quiet standing. *Gait Posture* **19**, 124–132 (2004).
  26. Latash, M. L., Scholz, J. P. & Schönner, G. Motor control strategies revealed in the structure of motor variability. *Exerc. Sport Sci. Rev.* **30**, 26–31 (2002).
  27. van Emmerik, R. E. A. & van Wegen, E. E. H. On the functional aspects of variability in postural control. *Exerc. Sport Sci. Rev.* **30**, 177–183 (2002).
  28. Stoffregen, T. A., Faugloire, E., Yoshida, K., Flanagan, M. B. & Merhi, O. Motion sickness and postural sway in console video games. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* **50**, 322–331 (2008).
  29. Stanney, K. M., Kennedy, R. S., Drexler, J. M. & Harm, D. L. Motion sickness and proprioceptive aftereffects following virtual environment exposure. *Appl. Ergon.* **30**, 27–38 (1999).
  30. Guerraz, M. *et al.* Visual vertigo: symptom assessment, spatial orientation and postural control. *Brain a J. Neurol.* **124**, 1646–1656 (2001).
  31. Pavlou, M. *et al.* The effect of repeated visual motion stimuli on visual dependence and postural control in normal subjects. *Gait Posture* **33**, 113–8 (2011).
  32. Tanahashi, S., Ujike, H., Kozawa, R. & Ukai, K. Effects of visually simulated roll motion on vection and postural stabilization. *J. Neuroeng. Rehabil.* **4**, (2007).
  33. Bos, J. E., Ledegang, W. D., Lubeck, A. J. A. & Stins, J. F. Cinerama sickness and postural instability. *Ergonomics* **56**, 1430–1436 (2013).
  34. Murata, A. Effects of duration of immersion in a virtual reality environment on postural stability. *Int. J. Hum. Comput. Interact.* **17**, 463–477 (2004).
  35. van Emmerik, M. L., de Vries, S. C. & Bos, J. E. Internal and external fields of view affect cybersickness. *Displays* **32**, 169–174 (2011).
  36. Wardman, D. L., Taylor, J. L. & Fitzpatrick, R. C. Effects of galvanic vestibular stimulation on human posture and perception while standing. *J. Physiol.* **551**, 1033–1042 (2003).
  37. Barra, J. *et al.* Are rotations in perceived visual vertical and body axis after stroke caused by the same mechanism? *Stroke* **39**, 3099–3101 (2008).
  38. Karnath, H. O., Ferber, S. & Dichgans, J. The origin of contraversive pushing: evidence for a second graviceptive system in humans. *Neurology* **55**, 1298–1304 (2000).
  39. Reason, J. T. & Brand, J. J. *Motion sickness*. (Academic Press, 1975).

## References

40. Oman, C. M. A heuristic mathematical model for the dynamics of sensory conflict and motion sickness. *Acta Otolaryngol.* **392**, 1–44 (1982).
41. Kennedy, R. S., Drexler, J. & Kennedy, R. C. Research in visually induced motion sickness. *Appl. Ergon.* **41**, 494–503 (2010).
42. Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S. & Lilienthal, M. G. Simulator sickness questionnaire: an enhanced method for quantifying simulator sickness. *Int. J. Aviat. Psychol.* **3**, 203–220 (1993).
43. Solimini, A. G., Mannocci, A., Di Thiene, D. & La Torre, G. A survey of visually induced symptoms and associated factors in spectators of three dimensional stereoscopic movies. *BMC Public Health* **12**, 779 (2012).
44. Lackner, J. R. Motion sickness: more than nausea and vomiting. *Exp. brain Res.* **232**, 2493–2510 (2014).
45. Golding, J. F. & Gresty, M. A. Pathophysiology and treatment of motion sickness. *Curr. Opin. Neurol.* **28**, 83–88 (2015).
46. Howarth, P. A. & Hodder, S. G. Characteristics of habituation to motion in a virtual environment. *Displays* **29**, 117–123 (2008).
47. Bos, J. E., de Vries, S. C., van Emmerik, M. L. & Groen, E. L. The effect of internal and external fields of view on visually induced motion sickness. *Appl. Ergon.* **41**, 516–521 (2010).
48. Howarth, P. A. Potential hazards of viewing 3-D stereoscopic television, cinema and computer games: A review. *Ophthalmic Physiol. Opt.* **31**, 111–122 (2011).
49. Lubeck, A. J. A., Bos, J. E. & Stins, J. F. Motion in images is essential to cause motion sickness symptoms, but not to increase postural sway. *Displays* **38**, 55–61 (2015).
50. Kennedy, R. S., Stanney, K. M. & Dunlap, W. P. Duration and exposure to virtual environments: sickness curves during and across sessions. *Presence Teleoperators Virtual Environ.* **9**, 463–472 (2000).
51. Stanney, K. M., Mourant, R. R. & Kennedy, R. S. Human factors issues in virtual environments: A review of the literature. *Presence* **7**, 327–351 (1998).
52. Ujike, H., Ukai, K. & Nihei, K. Survey on motion sickness-like symptoms provoked by viewing a video movie during junior high school class. *Displays* **29**, 81–89 (2008).
53. Akiduki, H., Nishiike, S., Watanabe, H. & Matsuoka, K. Visual-vestibular conflict induced by virtual reality in humans. *Neurosci. Lett.* **340**, 197–200 (2003).
54. Dong, X., Yoshida, K. & Stoffregen, T. A. Control of a virtual vehicle influences postural activity and motion sickness. *J. Exp. Psychol. Appl.* **17**, 128–138 (2011).
55. Keshavarz, B. & Hecht, H. Stereoscopic viewing enhances visually induced motion sickness but sound does not. *Presence Teleoperators Virtual Environ.* **21**, 213–228 (2012).
56. Yang, S. *et al.* Stereoscopic viewing and reported perceived immersion and symptoms. *Optom. Vis. Sci. Off. Publ. Am. Acad. Optom.* **89**, 1068–1080 (2012).
57. Ujike, H. & Watanabe, H. Effects of stereoscopic presentation on visually induced motion sickness. in *IS&T/SPIE Electron. Imaging* (Woods, A. J., Holliman, N. S. & Dodgson, N. A.) **7863**, 786314–786320 (2011).

58. Diels, C. & Howarth, P. A. Visually induced motion sickness : Single- versus dual-axis motion. *Displays* **32**, 175–180 (2011).
59. Lo, W. T. & So, R. H. Y. Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes. *Appl. Ergon.* **32**, 1–14 (2001).
60. Guerraz, M. & Bronstein, A. M. Mechanisms underlying visually induced body sway. *Neurosci. Lett.* **443**, 12–16 (2008).
61. Hale, K. S. & Stanney, K. M. Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications. *CRC Press, Boca Raton, Florida, second edition*, (2014).
62. Keshavarz, B., Riecke, B. E., Hettinger, L. J. & Campos, J. L. Vection and visually induced motion sickness: how are they related? *Front. Psychol.* **6**, 1–11 (2015).
63. Dichgans, J. & Brandt, T. in *Perception* (Held, R., Leibowitz, H. W. & Teubner, H. L.) (Springer Berlin Heidelberg, 1978). doi:10.1007/978-3-642-46354-9\_25
64. Deveze, A., Bernard-Demanze, L., Xavier, F., Lavieille, J.-P. & Elziere, M. Vestibular compensation and vestibular rehabilitation. Current concepts and new trends. *Neurophysiol. Clin. Neurophysiol.* **44**, 49–57 (2014).
65. Bronstein, A. M. Vision and vertigo: some visual aspects of vestibular disorders. *J. Neurol.* **251**, 381–7 (2004).
66. Lacour, M. Restoration of vestibular function: basic aspects and practical advances for rehabilitation. *Curr. Med. Res. Opin.* **22**, 1651–1659 (2006).
67. Roberts, E., Bronstein, A. M. & Seemungal, B. M. Visual-vestibular Interaction: Basic science to clinical relevance. *Adv. Clin. Neurosci. Rehabil.* **13**, 8–12 (2013).
68. Bronstein, A. M., Golding, J. F. & Gresty, M. a. Vertigo and dizziness from environmental motion: Visual vertigo, motion sickness, and drivers' disorientation. *Semin. Neurol.* **33**, 219–230 (2013).
69. Seno, T., Ito, H. & Sunaga, S. The object and background hypothesis for vection. *Vision Res.* **49**, 2973–2982 (2009).
70. Ohmi, M., Howard, I. P. & Landolt, J. P. Circular vection as a function of foreground-background relationships. *Perception* **16**, 17–22 (1987).
71. Dichgans, J., Brandt, T. Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control. in *Perception* 755–804 (Springer Berlin Heidelberg, 1978).
72. Thurrell, A. E. I. & Bronstein, A. M. Vection increases the magnitude and accuracy of visually evoked postural responses. *Exp. Brain Res.* **147**, 558–560 (2002).
73. Ijsselstein, W., de Ridder, H., Freeman, J., Avons, S. E. & Bouwhuis, D. Effects of stereoscopic presentation, image motion, and screen size on subjective and objective corroborative measures of presence. *Presence* **10**, 298–312 (2001).
74. Freeman, J., Avons, S. E., Meddis, R., Pearson, D. E. & Ijsselstein, W. Using behavioral realism to estimate presence: a study of the utility of postural responses. *Presence Teleoperators Virtual Environ.* **9**, 149–164 (2000).
75. Reed-Jones, R. J., Vallis, L. A., Reed-Jones, J. G. & Trick, L. M. The relationship between postural stability and virtual environment adaptation. *Neurosci. Lett.* **435**, 204–209 (2008).
76. Smart, L. J., Pagulayan, R. J. & Stoffregen, T. A. Self-induced motion sickness in

## References

- unperturbed stance. *Brain Res. Bull.* **47**, 449–457 (1998).
77. Bonnet, C. T., Faugloire, E., Riley, M. A., Bardy, B. G. & Stoffregen, T. A. Self-induced motion sickness and body movement during passive restraint. *Ecol. Psychol.* **20**, 121–145 (2008).
78. Stoffregen, T. A. & Smart, L. J. Postural instability precedes motion sickness. *Brain Res. Bull.* **47**, 437–448 (1998).
79. Edge Staff. Leap of faith: DICE's Mirror's Edge. *Edge* (2007). at <<http://www.edge-online.com/features/leap-faith-dices-mirrors-edge/>>
80. Horslen, B. C. & Carpenter, M. G. Arousal, valence and their relative effects on postural control. *Exp. brain Res.* **215**, 27–34 (2011).
81. Golding, J. F. Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness. *Brain Res. Bull.* **47**, 507–516 (1998).
82. Bos, J. E., MacKinnon, S. N. & Patterson, A. Motion sickness symptoms in a ship motion simulator: effects of inside, outside, and no view. *Aviat. Space. Environ. Med.* **76**, 1111–1118 (2005).
83. Peng, C. K., Havlin, S., Stanley, H. E. & Goldberger, A. L. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos An Interdiscip. J. Nonlinear Sci.* **5**, 82–87 (1995).
84. Delignières, D., Torre, K. & Bernard, P. L. Transition from persistent to anti-persistent correlations in postural sway indicates velocity-based control. *PLoS Comput. Biol.* **7**, e1001089 (2011).
85. Collins, J. J. & De Luca, C. J. Open-loop and closed-loop control of posture: a random-walk analysis of center-of-pressure trajectories. *Exp. brain Res.* **95**, 308–318 (1993).
86. Oman, C. M. Motion sickness: a synthesis and evaluation of the sensory conflict theory. *Can. J. Physiol. Pharmacol.* **68**, 294–303 (1990).
87. Riecke, B. E. & Schulte-pelkum, J. in *Hum. Walk. Virtual Environ.* (Steinicke, F., Visell, Y., Campos, J. & Lécuyer, A.) 27–54 (Springer New York, 2013). doi:10.1007/978-1-4419-8432-6
88. Howard, I. P. *Human visual orientation.* (Chicester-New York: J. Wiley., 1982).
89. Dichgans, J., Held, R., Young, L. R. & Brandt, T. Moving visual scenes influence the apparent direction of gravity. *Science (80-. ).* **178**, 1217–1219 (1972).
90. Fushiki, H., Kobayashi, K., Asai, M. & Watanabe, Y. Influence of visually induced self-motion on postural stability. *Acta Otolaryngol.* **125**, 60–64 (2005).
91. Smart, L. J., Stoffregen, T. A. & Bardy, B. G. Visually induced motion sickness predicted by postural instability. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* **44**, 451–465 (2002).
92. Bonnet, C. T., Faugloire, E., Riley, M. A., Bardy, B. G. & Stoffregen, T. A. Motion sickness preceded by unstable displacements of the center of pressure. *Hum. Mov. Sci.* **25**, 800–820 (2006).
93. Cobb, S. & Gray, V. Measurement of postural stability before and after immersion in a virtual environment. *Appl. Ergon.* **30**, 47–57 (1999).

94. Horlings, C. G. C. *et al.* Influence of virtual reality on postural stability during movements of quiet stance. *Neurosci. Lett.* **451**, 227–31 (2009).
95. Kennedy, R. S., Berbaum, K. S. & Lilienthal, M. G. Disorientation and postural ataxia following flight simulation. *Aviat. Sp. Environ. Med.* **68**, 13–17 (1997).
96. Kennedy, R. S. & Stanney, K. M. Postural instability induced by virtual reality exposure: development of a certification protocol. *Int. J. Hum. Comput. Interact.* **8**, 25–47 (1996).
97. Fukuda, T. Postural behavior and motion sickness. *Acta Otolaryngol. Suppl.* **330**, 9–14 (1975).
98. Owen, N., Leadbetter, A. G. & Yardley, L. Relationship between postural control and motion sickness in healthy subjects. *Brain Res. Bull.* **47**, 471–474 (1998).
99. Takahashi, M., Takei, Y., Saito, A., Okada, Y. & Kanzaki, J. Motion sickness and equilibrium ataxia. *Aviat. Sp. Environ. Med.* **63**, 486–490 (1992).
100. Feenstra, P. J., Bos, J. E. & Van Gent, R. N. H. W. A visual display enhancing comfort by counteracting airsickness. *Displays* **32**, 194–200 (2011).
101. Loader, B. *et al.* Improved postural control after computerized optokinetic therapy based on stochastic visual stimulation in patients with vestibular dysfunction. *J. Vestib. Res. Equilib. Orientat.* **17**, 131–136 (2007).
102. Pavlou, M., Lingeswaran, A., Davies, R. A., Gresty, M. A. & Bronstein, A. M. Simulator based rehabilitation in refractory dizziness. *J. Neurol.* **251**, 983–95 (2004).
103. Riccio, G. E. & Stoffregen, T. A. An ecological theory of motion sickness and postural instability. *Ecol. Psychol.* **3**, 195–240 (1991).
104. Berezin, O. Digital Cinema in Russia: Is 3D today still a driver for development of cinema market? in *3D Stereo MEDIA 2010* (2010).
105. de Wit, G., Vente, P. E. ., Bos, J. E. & Bles, W. Het snelle labyrint ten dienste van het trage oog. *Ned. Tijdschr. Kno-heelkd.* **5**, 7–10 (1999).
106. Khasnis, A. & Gokula, R. M. Romberg's Test. *J. Postgrad. Med.* **49**, 169–172 (2003).
107. Golding, J. F. *et al.* Off-vertical axis rotation of the visual field and nauseogenicity. *Aviat. Sp. Environ. Med.* **80**, 516–521 (2009).
108. Golding, J. F., Doolan, K., Acharya, A., Tribak, M. & Gresty, M. a. Cognitive cues and visually induced motion sickness. *Aviat. Sp. Environ. Med.* **83**, 477–482 (2012).
109. Lê, T. T. & Kapoula, Z. Distance impairs postural stability only under binocular viewing. *Vision Res.* **46**, 3586–3593 (2006).
110. Cohn, T. E. & Lasley, D. J. Wallpaper illusion: cause of disorientation and falls on escalators. *Perception* **19**, 573–580 (1990).
111. Draper, M. H., Viirre, E. S., Furness, T. A. & Gawron, V. J. Effects of image scale and system time delay on simulator sickness within head-coupled virtual environments. *Hum. Factors* (2001).
112. Kolasinski, E. Simulator Sickness in Virtual Environments. *Tech. Rep. 1027* (1995).
113. Cheung, B. S. K., Howard, I. P. & Money, K. E. Visually-induced sickness in normal and bilaterally labyrinthine-defective subjects. *Aviat. Sp. Environ. Med.* **62**, 527–531 (1991).



## References

114. Bos, J. E., Damala, D., Lewis, C., Ganguly, A. & Turan, O. Susceptibility to seasickness. *Ergonomics* **50**, 890–901 (2007).
115. Italian Ministry of Health. *3D Glasses for Viewing Motion Pictures*. (2010). at <<http://www.otticiweb.it/informazioni/2010/occhiali3d.pdf>>
116. Modig, F., Patel, M., Magnusson, M. & Fransson, P. A. Study I: Effects of 0.06% and 0.10% blood alcohol concentration on human postural control. *Gait Posture* **35**, 410–418 (2012).
117. Nieschalk, M. *et al.* Effects of alcohol on body-sway patterns in human subjects. *Int. J. Legal Med.* **112**, 253–260 (1999).
118. Post, R. B., Lott, L. A., Beede, J. I. & Maddock, R. J. The effect of alcohol on the vestibulo-ocular reflex and apparent concomitant motion. *J. Vestib. Res. Equilib. Orientat.* **4**, 181–187 (1994).
119. Ross, L. E. & Mughni, W. N. Effect of alcohol on the threshold for detecting angular acceleration. *Aviat. Sp. Environ. Med.* **66**, 635–640 (1995).
120. Chiang, H. H. & Young, Y. H. Impact of alcohol on vestibular function in relation to the legal limit of 0.25 mg/l breath alcohol concentration. *Audiol. Neurotol.* **12**, 183–188 (2007).
121. Villard, S. J., Flanagan, M. B., Albanese, G. M. & Stoffregen, T. A. Postural instability and motion sickness in a virtual moving room. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* **50**, 332–345 (2008).
122. Urvoy, M., Barkowsky, M. & Le Callet, P. How visual fatigue and discomfort impact 3D-TV quality of experience: A comprehensive review of technological, psycho-physical, and psychological factors. *Ann. des Telecommun. Telecommun.* **68**, 641–655 (2013).
123. Tam, W. J., Speranza, F., Yano, S., Shimono, K. & Ono, H. Stereoscopic 3D-TV: Visual comfort. *IEEE Trans. Broadcast.* **57**, 335–346 (2011).
124. Seuntiëns, P. J. H. *et al.* Viewing experience and naturalness of 3D images. in *Proc. SPIE* **6016**, 43–49 (2005).
125. Naqvi, S. A. A., Badruddin, N., Malik, A. S., Hazabbah, W. & Abdullah, B. Does 3D produce more symptoms of visually induced motion sickness? *Eng. Med. Biol. Soc. (EMBC), 2013 35th Annu. Int. Conf. IEEE* 6405–6408 (2013).
126. Chen, C.-Y. *et al.* The influence of polarized 3D display on autonomic nervous activities. *Displays* **35**, 196–201 (2014).
127. Rubin, P. The inside story of oculus rift and how virtual reality became reality. *Wired.com* (2014).
128. Lambooi, M., IJsselsteijn, W., Fortuin, M. & Heynderickx, I. Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review. *J. Imaging Sci. Technol.* **53**, 030201 (2009).
129. Blehm, C., Vishnu, S., Khattak, A., Mitra, S. & Yee, R. W. Computer vision syndrome: A review. *Surv. Ophthalmol.* **50**, 253–262 (2005).
130. Norkin, A. & Girdzijauskas, I. 3DTV: One stream for different screens: Keeping perceived scene proportions by adjusting camera parameters. in *Pict. Coding Symp.*

- 489–492 (2012).
131. Zilly, B. F., Kluger, J. & Kauff, P. Production rules for stereo Acquisition. in *Proc. IEEE* **99**, 590–606 (2011).
  132. Gresty, M. A., Waters, S., Bray, A., Bunday, K. & Golding, J. F. Impairment of spatial cognitive function with preservation of verbal performance during spatial disorientation. *Curr. Biol.* **13**, R829–R830 (2003).
  133. van Wegen, E. E. H., van Emmerik, R. E. A. & Riccio, G. E. Postural orientation: Age-related changes in variability and time-to-boundary. *Hum. Mov. Sci.* **21**, 61–84 (2002).
  134. Riccio, G. E. in *Var. Mot. Control* (Newell, K. M. & Corcos, D. M.) 317–357 (IL: Human Kinetics, 1993).
  135. Mach, E. *Grundlinien der Lehre von den Bewegungsempfindungen*. (Leipzig: Engelmann, 1875).
  136. Bourdon, B. Sur le rôle de la tête dans la perception de l'espace. *Rev. Philos. France Let.* **61**, 526–529 (1906).
  137. Angelaki, D. E., Shaikh, A. G., Green, A. M. & Dickman, J. D. Neurons compute internal models of the physical laws of motion. *Nature* **430**, 560–564 (2004).
  138. Zupan, L. H. & Merfeld, D. M. Neural processing of gravito-inertial cues in humans. IV. Influence of visual rotational cues during roll optokinetic stimuli. *J. Neurophysiol.* **89**, 390–400 (2003).
  139. Mittelstaedt, H. A new solution to the problem of the subjective vertical. *Naturwissenschaften* **70**, 272–281 (1983).
  140. Isableu, B., Ohlmann, T., Cremieux, J. & Amblard, B. Selection of spatial frame of reference and postural control variability. *Exp. brain Res.* **114**, 584–589 (1997).
  141. Witkin, H. A. & Asch, S. E. Studies in space orientation: I. Perception of the upright with displaced visual fields. *J. Exp. Psychol.* **38**, 325–337 (1948).
  142. Witkin, H. A. & Asch, S. E. Studies in space orientation. IV. Further experiments on perception of the upright with displaced visual fields. *J. Exp. Psychol.* **38**, 762–782 (1948).
  143. Isableu, B., Gueguen, M., Fourré, B., Giraudet, G. & Amorim, M. A. Assessment of visual field dependence: comparison between the mechanical 3D rod-and-frame test developed by Oltman in 1968 with a 2D computer-based version. *J. Vestib. Res.* **18**, 239–47 (2008).
  144. Guerraz, M., Poquin, D. & Ohlmann, T. The role of head-centric spatial reference with a static and kinetic visual disturbance. *Percept. Psychophys.* **60**, 287–295 (1998).
  145. Pavlou, M., Davies, R. A. & Bronstein, A. M. The assessment of increased sensitivity to visual stimuli in patients with chronic dizziness. *J. Vestib. Res.* **16**, 223–31 (2006).
  146. Agarwal, K. *et al.* Visual dependence and BPPV. *J. Neurol.* **259**, 1117–1124 (2012).
  147. Pavlou, M. The use of optokinetic stimulation in vestibular rehabilitation. *J. Neurol. Phys. Ther. JNPT* **34**, 105–10 (2010).
  148. Pavlou, M., Bronstein, A. M. & Davies, R. A. Randomized trial of supervised versus unsupervised optokinetic exercise in persons with peripheral vestibular disorders. *Neurorehabil. Neural Repair* **27**, 208–18 (2013).

## References

149. Pavlou, M. *et al.* The effect of virtual reality on visual vertigo symptoms in patients with peripheral vestibular dysfunction: A pilot study. *J. Vestib. Res.* **22**, 273–281 (2012).
150. Vitte, E., Sémont, A. & Berthoz, A. Repeated optokinetic stimulation in conditions of active standing facilitates recovery from vestibular deficits. *Exp. Brain Res.* **102**, 141–148 (1994).
151. Dyde, R. T., Jenkin, M. R. & Harris, L. R. The subjective visual vertical and the perceptual upright. *Exp. Brain Res.* **173**, 612–22 (2006).
152. Riley, M. A., Stoffregen, T. A., Grocki, M. J. & Turvey, M. T. Postural stabilization for the control of touching. *Hum. Mov. Sci.* **18**, 795–817 (1999).
153. Allison, R. S., Howard, I. P. & Zacher, J. E. Effect of field size, head motion, and rotational velocity on roll vection and illusory self-tilt in a tumbling room. *Perception* **28**, 299–306 (1999).
154. Riecke, B. E. & Jordan, J. D. Comparing the effectiveness of different displays in enhancing illusions of self-movement (vection). *Front. Psychol.* **6**, 1–16 (2015).
155. Bronstein, A. M. The visual vertigo syndrome. *Acta Otolaryngol. Suppl.* **520**, 45–48 (1995).
156. Bronstein, A. M. Visual vertigo syndrome: clinical and posturography findings. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry* **59**, 472–476 (1995).
157. Longridge, N., Mallinson, A. & Denton, A. Visual vestibular mismatch in patients treated with intratympanic gentamicin for Ménière's disease. *J. Otolaryngol.* **1**, 5–8 (2002).
158. Bisdorff, A., Van Brevern, M., Lempert, T. & Newman-Toker, D. E. Classification of vestibular symptoms: Towards an international classification of vestibular disorders. *J. Vestib Res* **19**, 1–13 (2009).
159. Jacob, R. G. Panic disorder and the vestibular system. *Psychiatr. Clin. North Am.* **11**, 361–374 (1988).
160. Yardley, L. Contribution of symptoms and beliefs to handicap in people with vertigo: a longitudinal study. *Br. J. Clin. Psychol.* **33 ( Pt 1)**, 101–113 (1994).
161. Pollak, L. *et al.* Magnetic resonance brain imaging in patients with visual vertigo. *Brain Behav.* (2015). doi:10.1002/brb3.402
162. Peterka, R. J. Sensorimotor Integration in Human Postural Control. *J. Neurophysiol.* **88**, 1097–1118 (2002).
163. Witkin, H. A. The perception of the upright. *Am. Sci.* 50–57 (1959).
164. Yelnik, A. *et al.* Postural visual dependence after recent stroke: assessment by optokinetic stimulation. *Gait Posture* **24**, 262–9 (2006).
165. Merfeld, D. M. *et al.* Neural Processing of Gravitoinertial Cues in Humans. III. Modeling Tilt and Translation Responses. *J. Neurophysiol.* **87**, 819–833 (2002).
166. Shumway-Cook, A. & Horak, F. B. Rehabilitation strategies for patients with vestibular deficits. *Neurol. Clin.* **8**, 441–457 (1990).
167. Van Ombergen, A., Van Rompaey, V., Van de Heyning, P. & Wuyts, F. Vestibular Migraine in an Otolaryngology Clinic. *Otol. Neurotol.* **1** (2014).

168. Wuyts, F. L. & Bronstein, A. M. SO STONED questionnaire. in *XXV Meet. Bárányi Soc. 31 March - 3 April* (2008).
169. Mallinson, A. I. Visual Vestibular Mismatch: A poorly understood presentation of balance system disease. *PhD Thesis*, Maastricht University (2011).
170. Brainard, D. H. The Psychophysics Toolbox. *Spat. Vis.* **10**, 433–436 (1997).
171. Pelli, D. G. The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies. *Spat. Vis.* **10**, 437–442 (1997).
172. Harm, D. L., Parker, D. E., Reschke, M. F. & Skinner, N. C. Relationship between selected orientation rest frame, circular vection and space motion sickness. *Brain Res. Bull.* **47**, 497–501 (1998).
173. Hettinger, L. J., Berbaum, K. S., Kennedy, R. S., Dunlap, W. P. & Nolan, M. D. Vection and Simulator Sickness. *Mil. Psychol.* **2**, 171–181 (1990).
174. Oppenländer, K. *et al.* Subliminal galvanic-vestibular stimulation recalibrates the distorted visual and tactile subjective vertical in right-sided stroke. *Neuropsychologia* **74**, 178–183 (2015).
175. Schniepp, R. *et al.* Nonlinear variability of body sway in patients with phobic postural vertigo. *Front. Neurol.* **4**, 1–7 (2013).
176. Wuehr, M. *et al.* Inadequate interaction between open- and closed-loop postural control in phobic postural vertigo. *J. Neurol.* **260**, 1314–1323 (2013).
177. Van Ombergen, A. *et al.* Regional white and gray matter differences between visual vertigo patients and healthy controls: preliminary results. in *II. Vertigo Acad. Int. Meet. 22-23 May 2015* (2015).
178. Eckhardt-Henn, A. *et al.* Psychiatric comorbidity in different organic vertigo syndromes. *J. Neurol.* **255**, 420–428 (2008).
179. Zur, O. *et al.* Anxiety among individuals with visual vertigo and vestibulopathy. *Disabil. Rehabil.* **37**, 2197–2202 (2015).
180. Brandt, T., Kugler, G., Schniepp, R., Wuehr, M. & Huppert, D. Acrophobia impairs visual exploration and balance during standing and walking. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **1343**, 37–48 (2015).
181. Schniepp, R. *et al.* Quantification of gait changes in subjects with visual height intolerance when exposed to heights. *Front. Hum. Neurosci.* **8**, 963 (2014).
182. Wuehr, M. *et al.* Balance control and anti-gravity muscle activity during the experience of fear at heights. *Physiol. Rep.* **2**, e00232 (2014).
183. Brandt, T., Huppert, D. & Dieterich, M. Phobic postural vertigo: a first follow-up. *J. Neurol.* **241**, 191–195 (1994).
184. Brandt, T. Phobic postural vertigo. *Neurology* **46**, 1515–1519 (1996).
185. Staab, J. P. Chronic subjective dizziness. *Contin. Lifelong Learn. Neurol.* **18**, 1118–1141 (2012).
186. Huppert, D., Strupp, M., Rettinger, N., Hecht, J. & Brandt, T. Phobic postural vertigo: A long-term follow-up (5 to 15 years) of 106 patients. *J. Neurol.* **252**, 564–569 (2005).
187. Staab, J. P., Rohe, D. E., Eggers, S. D. Z. & Shepard, N. T. Anxious, introverted personality traits in patients with chronic subjective dizziness. *J. Psychosom. Res.* **76**,

## References

---

- 80–83 (2014).
188. Pollak, L. *et al.* Phobic postural vertigo: a new proposed entity. *Isr. Med. Assoc. J. IMAJ* **5**, 720–723 (2003).
189. Strupp, M. *et al.* [The most common form of dizziness in middle age: phobic postural vertigo]. *Nervenarzt* **74**, 911–914 (2003).
190. Schniepp, R. *et al.* Gait characteristics of patients with phobic postural vertigo: Effects of fear of falling, attention, and visual input. *J. Neurol.* **261**, 738–746 (2014).
191. Staab, J. P. The influence of anxiety on ocular motor control and gaze. *Curr. Opin. Neurol.* **27**, 118–124 (2014).
192. Lestienne, F., Soechting, J. & Berthoz, A. Postural Readjustments Induced by Linear Motion of Visual Scenes. *Exp. Brain Res.* **384**, 363–384 (1977).
193. Berthoz, A., Lacour, M., Soechting, J. F. & Vidal, P. P. The role of vision in the control of posture during linear motion. *Prog. Brain Res.* **50**, 197–209 (1979).
194. Howard, I. P. & Heckmann, T. Circular vection as a function of the relative sizes, distances, and positions of two competing visual displays. *Perception* **18**, 657–665 (1989).
195. Riecke, B. E. in *Virtual Real.* (Jae-Jin Kim), 149–176 (InTech, 2010).
196. Nakamura, S. Effects of depth, eccentricity and size of additional static stimulus on visually induced self-motion perception. *Vision Res.* **46**, 2344–2353 (2006).
197. Telford, L. & Frost, B. J. Factors affecting the onset and magnitude of linear vection. *Percept. Psychophys.* **53**, 682–692 (1993).
198. Brandt, T., Wist, E. R. & Dichgans, J. Foreground and background in dynamic spatial orientation. *Percept. Psychophys.* **17**, 497–503 (1975).
199. Ohmi, M. & Howard, I. P. Effect of stationary objects on illusory forward self-motion induced by a looming display. *Perception* **17**, 5–11 (1988).
200. Ito, H. & Shibata, I. Self-motion perception from expanding and contracting optical flows overlapped with binocular disparity. *Vision Res.* **45**, 397–402 (2005).
201. Howard, P. & Howard, A. Vection: the contributions of absolute and relative visual motion. *Perception* **23**, 745–751 (1994).
202. Palmisano, S. & Gillam, B. Stimulus eccentricity and spatial frequency interact to determine circular vection. *Perception* **27**, 1067–1077 (1998).
203. van Asten, W. N. J. C., Gielen, C. C. A. M. & Denier van der Gon, J. J. Postural movements induced by rotations of visual scenes. *J. Opt. Soc. Am. A* **5**, 1781–1789 (1988).
204. Benjamini, Y. & Hochberg, Y. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *J. R. Stat. Soc.* **57**, 289–300 (1995).
205. Thissen, D., Steinberg, L. & Kuang, D. Quick and easy implementation of the Benjamini-Hochberg procedure for controlling the false positive rate in multiple comparisons. *J. Educ. Behav. Stat.* **27**, 77–83 (2002).
206. Telford, L., Spratley, J. & Frost, B. J. Linear vection in the central visual field facilitated by kinetic depth cues. *Perception* **21**, 337–349 (1992).
207. Reason, J., Wagner, H. & Dewhurst, D. A visually-driven postural after-effect. *Acta Psychol. (Amst.)* **48**, 241–251 (1981).

208. Kuno, S., Kawakita, T., Kawakami, O., Miyake, Y. & Watanabe, S. Postural adjustment response to depth direction moving patterns produced by virtual reality graphics. *Jpn. J. Physiol.* **49**, 417–424 (1999).
209. Stins, J. F. & Beek, P. J. A Critical Evaluation of the Cognitive Penetrability of Posture. *Exp. Aging Res.* **38**, 208–219 (2012).
210. Carpenter, M. G., Murnaghan, C. D. & Inglis, J. T. Shifting the balance: evidence of an exploratory role for postural sway. *Neuroscience* **171**, 196–204 (2010).
211. Walker, B. & Ruhe, A. The test – retest reliability of centre of pressure measures in bipedal static task conditions – A systematic review of the literature. *Gait & Posture* **32**, 436–445 (2010).
212. Pinsault, N. & Vuillerme, N. Test-retest reliability of centre of foot pressure measures to assess postural control during unperturbed stance. *Med. Eng. Phys.* **31**, 276–286 (2009).
213. Whittinghill, D. M. Nasum Virtualis: A Simple Technique for Reducing Simulator Sickness. in *Game Dev. Conf.* (2015). doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2
214. Gower, D. W., Lilienthal, M. G., Kennedy, R. S. & Fowlkes, J. E. Simulator sickness in U.S. army and navy fixed- and rotary-wing flight simulators. in *Proc. AGARD Med. Panel Symp. Motion Cues Flight Simul. Simulator Induc. Sick.* 1–20 (1988).
215. Vingerhoets, R. A. A., De Vrijer, M., Van Gisbergen, J. A. M. & Medendorp, W. P. Fusion of visual and vestibular tilt cues in the perception of visual vertical. *J. Neurophysiol.* **101**, 1321–33 (2009).
216. Barra, J., Pérennou, D., Thilo, K. V., Gresty, M. A. & Bronstein, A. M. The awareness of body orientation modulates the perception of visual vertical. *Neuropsychologia* **50**, 2492–2498 (2012).
217. Palmisano, S., Allison, R. S., Schira, M. M. & Barry, R. J. Future challenges for vection research: definitions, functional significance, measures, and neural bases. *Front. Psychol.* **6**, 1–15 (2015).
218. Bisdorff, A. R., Wolsley, C. J., Anastasopoulos, D., Bronstein, A. M. & Gresty, M. A. The perception of body verticality (subjective postural vertical) in peripheral and central vestibular disorders. *Brain a J. Neurol.* **119**, 1523–1534 (1996).
219. Forstmann, B. U., Wagenmakers, E. J., Eichele, T., Brown, S. & Serences, J. T. Reciprocal relations between cognitive neuroscience and formal cognitive models: Opposites attract? *Trends Cogn. Sci.* **15**, 272–279 (2011).
220. O'Doherty, J. P., Hampton, A. & Kim, H. Model-based fMRI and its application to reward learning and decision making. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **1104**, 35–53 (2007).
221. Cummings, J. J., Bailenson, J. N. & Fidler, M. J. How immersive is enough? A meta-analysis of the effect of immersive technology on user presence. *Media Psychol.* **3269**, 1–57 (2015).
222. Cevette, M. J. *et al.* Oculo-Vestibular Recoupling Using Galvanic Vestibular Stimulation to Mitigate Simulator Sickness. *Aviat. Space. Environ. Med.* **83**, 549–555 (2012).
223. Galvez-Garcia, G., Hay, M. & Gabaude, C. Alleviating Simulator Sickness with Galvanic Cutaneous Stimulation. *J. Hum. Factors Ergon. Soc.* **57**, 649–657 (2015).

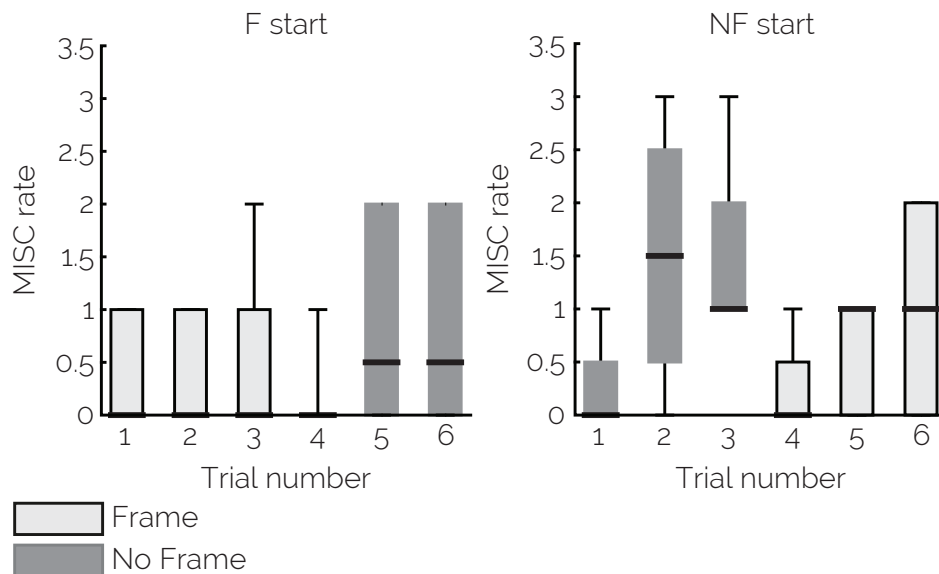
## Supplementary materials

### Supplementary video 2.1

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141938215000529#m0015>

### Supplementary video 2.2

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141938215000529#m0015>



**Supplementary figure 5.1** Boxplots of the MISC rates separated for participants starting with the NF condition (left) and with the F condition (right). The solid black lines indicate the median MISC rate.

### Supplementary data 7.1

[journals.plos.org/plosone/article/asset?unique&id=info:doi/10.1371/journal.pone.0144034.s001](http://journals.plos.org/plosone/article/asset?unique&id=info:doi/10.1371/journal.pone.0144034.s001)

### Supplementary data 7.2

[journals.plos.org/plosone/article/asset?unique&id=info:doi/10.1371/journal.pone.0144034.s002](http://journals.plos.org/plosone/article/asset?unique&id=info:doi/10.1371/journal.pone.0144034.s002)

### Supplementary video 7.1

<http://standingwell.nl/?q=stimuli>

### Supplementary video 7.2

<http://standingwell.nl/?q=stimuli>

---

# Samenvatting



Onze zintuigen zijn fascinerende systemen die ons in staat stellen om de wereld om ons heen waar te nemen en onze bewegingen te controleren. Meestal komt de informatie van de verschillende zintuigen overeen met elkaar en integreren we alle zintuiglijke informatie tot een stabiele gewaarwording. Wanneer we over straat lopen of fietsen zien wij de omgeving langs ons bewegen, registreert ons somatosensorisch systeem luchtstromen en nemen onze evenwichtsorganen onze fysieke lineaire- en hoekversnellingen waar. Regelmatig begeven wij ons echter in situaties waarin de informatie van onze zintuigen niet met elkaar overeenkomen. Hoe zal ons slimme regelmechanisme hiermee omgaan?

Het blijkt dat mensen regelmatig – just for fun! – zichzelf in situaties begeven waarmee ze dit regelmechanisme verstoren. Dit doen we bijvoorbeeld wanneer we naar bewegende beelden kijken, zoals filmpjes, computer games of virtual reality. In het merendeel van deze situaties komt de informatie van de ogen niet overeen met de informatie van de evenwichtsorganen, wat een visueel-vestibulair conflict wordt genoemd. Een visueel-vestibulair conflict zich ook kan voordoen wanneer wij zelf bewegen, maar deze beweging niet zien (zoals bij het lezen van een boek in een rijdende auto). In dit proefschrift focus ik me op een visueel-vestibulair conflict veroorzaakt door het zien van beweging terwijl de kijker niet beweegt.

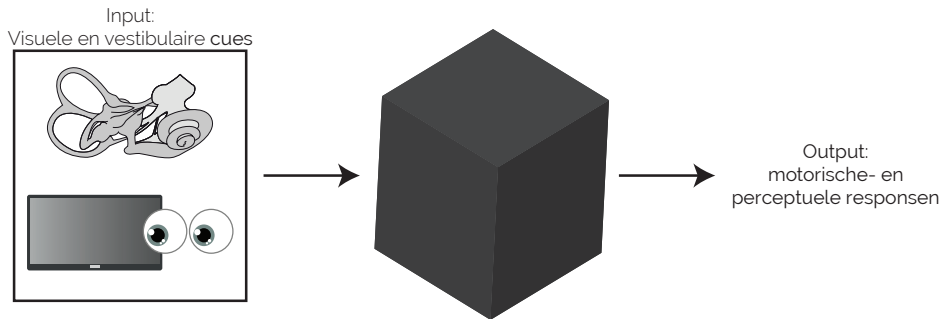
Het is bekend dat een visueel-vestibulair conflict een grote verscheidenheid aan motorische- en perceptuele responsen kan uitlokken die een grote invloed kunnen hebben op het gedrag en welzijn van de kijker. We weten echter minder van de verwerking van de zintuiglijke informatie in het centrale zenuwstelsel (CZS) tijdens een visueel-vestibulair conflict.

In dit proefschrift is verondersteld dat de processen in het CZS zich gedragen zoals verondersteld door de motion sickness theory. Deze theorie gaat ervan uit dat de verwachte zintuiglijke informatie en oriëntatie van het lichaam een cruciale rol speelt in de mate waarin men motorische- en perceptuele responsen ervaart tijdens een visueel-vestibulair conflict. Wanneer tijdens een visueel-vestibulair conflict de verwachte zintuiglijke informatie en verwachte lichaamsoriëntatie niet overeenkomt met de werkelijke zintuiglijke informatie en lichaamsoriëntatie, dan zal dit leiden tot motorische- en perceptuele veranderingen.

Om meer inzicht te krijgen in de processen in het CZS tijdens een visueel-vestibulair conflict hebben we in een reeks experimenten het verloop van de motorische- en perceptuele responsen gemeten. Deze responsen bestonden uit posturale zwaai (een maat voor houdingsevenwicht), de subjectieve visuele verticaal (SVV), visueel geïnduceerde bewegingsziekte (VIMS) en in één studie roll-vectie (een gevoel van zelfbeweging, terwijl je niet beweegt). Tevens hebben we de bewegende beelden op verschillende manieren bewerkt door bijvoorbeeld stereoscopisch 3D toe te voegen, met als doel het visueel-vestibulair conflict te manipuleren en een inzicht

te krijgen in dynamica van de CZS processen.

Figuur 1 laat de algemene onderzoeksopzet van de experimenten uit **Hoofdstuk 2** tot en met **7** zien.



**Figuur 1.** Schematische illustratie van de onderzoeksopzet gebruikt in de in hoofdstukken 2 tot en met 7 om processen in het CZS, hier weergegeven als een 'black box', te onderzoeken tijdens een visueel-vestibulair conflict. Een visueel-vestibulair conflict kan worden uitgelokt door visuele informatie aan te bieden die niet overeenkomt met de vestibulaire informatie. Het is bekend dat het visueel-vestibulair conflict een aantal motorische en perceptuele responsen beïnvloedt. Door deze responsen te monitoren, kunnen we inzicht krijgen in de CZS processen tijdens een visueel-vestibulair conflict. In dit proefschrift wordt onderzocht of deze CZS processen zich gedragen zoals beschreven in de motion sickness theory (MST).

In **Hoofdstuk 2**, waarin het eerste experiment beschreven staat, lag de focus op een cruciaal aspect van een visueel-vestibulair conflict: de aanwezigheid of afwezigheid van visuele beweging in de stimuli. Vrijwel alle studies naar de invloed van visueel-vestibulaire conflicten onderzochten alleen de effecten van bewegende visuele stimuli op motorische en perceptuele responsen. Kortom, een vergelijking van effecten van bewegende visuele en statische visuele stimuli is nog niet gemaakt. In **Hoofdstuk 2** hebben we proefpersonen in twee aparte sessies laten kijken naar bewegende en statische beelden van een populaire first-person shooter game. Vooraf, tijdens en na het kijken scoorden proefpersonen hun VIMS symptomen en werd met een krachtenplatform de posturale zwaai gemeten. Om de posturale zwaai te kwantificeren werden naast globale parameters ook parameters gericht op de correlationele structuur berekend. Zoals in eerder onderzoek is aangetoond, waren ook in dit experiment de VIMS scores significant hoger na het kijken naar bewegende beelden, maar was dit niet het geval voor stilstaande beelden. Tot onze verrassing was de posturale zwaai significant hoger zowel na het kijken naar bewegende als naar stilstaande beelden. Deze bevinding suggereert dus dat motorische responsen (deels) gedissocieerd kunnen zijn van VIMS symptomen tijdens een visueel-vestibulair conflict. Visuele effecten die in beide type beelden aanwezig waren zijn een mogelijke verklaring voor de gelijke verhoging in posturale zwaai.

In de **Hoofdstukken 3** en **4** werd gebruik gemaakt van een andere

visuele manipulatie die het visueel-vestibulair conflict kan beïnvloeden: stereoscopisch 3D. Door de grote populariteit van 3D beelden, groeit de bezorgdheid dat het kijken naar 3D beelden ernstige klachten kan veroorzaken. Bovendien wordt er gedacht dat het kijken naar 3D beelden grotere motorische en perceptuele responsen teweeg brengt dan het kijken naar 2D beelden. Allereerst hebben we in **Hoofdstuk 3** onderzocht of het kijken naar 3D beelden in een bioscoop een stijging in VIMS symptomen en posturale zwaai veroorzaakte. Proefpersonen hebben in een bioscoop een 3D documentaire bekeken en vooraf en achteraf scoorden de proefpersonen hun VIMS symptomen en werd posturale zwaai data verzameld. We vonden dat zowel VIMS als de posturale zwaai significant hoger waren na het kijken naar de 3D beelden ten opzichte van ervoor. Deze veranderingen kunnen verklaard worden door het visueel-vestibulair conflict veroorzaakt door het kijken naar de 3D beelden. Omdat dit onderzoek geen 2D conditie toeliet, was met dit onderzoek de vraag of het kijken naar 3D beelden meer VIMS en posturale zwaai veroorzaakte dan het kijken naar 2D beelden nog niet beantwoord. Bovendien had ook geen enkele andere studie gepoogd deze vraag te beantwoorden.

In **Hoofdstuk 4** zijn we ingesprongen op dit gat in de literatuur door in twee aparte sessies proefpersonen naar de documentaire uit Hoofdstuk 3 in 2D en 3D te laten kijken. In dit onderzoek werd de documentaire getoond op een commercieel verkrijgbaar 55-inch Tv-scherm. Omdat 3D beelden waarheidsgetrouwer overkomen dan 2D beelden was de hypothese gesteld dat 3D beelden een groter visueel-vestibulair conflict zouden veroorzaken dan 2D beelden, wat in de motorische en perceptuele responses tot uiting zou komen. Wederom scoorden de proefpersonen hun VIMS symptomen en werd er data verzameld om de globale en structurele parameters van de posturale zwaai te onderzoeken. Verrassend genoeg vonden we dat zowel 2D beelden als 3D beelden enkel milde oculomotore en desoriënterende symptomen veroorzaakten zonder symptomen van bewegingsziekte. Bovendien was de posturale zwaai evenveel verhoogd na het kijken naar 2D en 3D beelden. Deze resultaten laten dus zien dat stereoscopische 3D beelden niet noodzakelijk een groter visueel-vestibulair conflict hoeven te veroorzaken dan 2D beelden. Een mogelijke verklaring voor deze bevindingen is dat de 3D effecten in de documentaire waren geoptimaliseerd voor vertoning in de bioscoop, zoals gebruikt in **Hoofdstuk 3**. De vertoning van de documentaire op een veel kleiner tv-scherm, zoals in **Hoofdstuk 4**, heeft mogelijk geleid tot quarantaine van de visuele informatie. Met andere woorden, de visuele informatie is door het CZS opzij gezet waardoor het visueel-vestibulair conflict vermindert of zelfs verdwijnt.

Naast dat beweging (**Hoofdstuk 2**) en stereoscopisch 3D (**Hoofdstuk 3** en **4**) een rol spelen in een visueel-vestibulair conflict, wordt door de motion sickness theory (MST) verondersteld dat visuele cues die informatie geven over wat aardverticaal is, het visueel-vestibulaire conflict

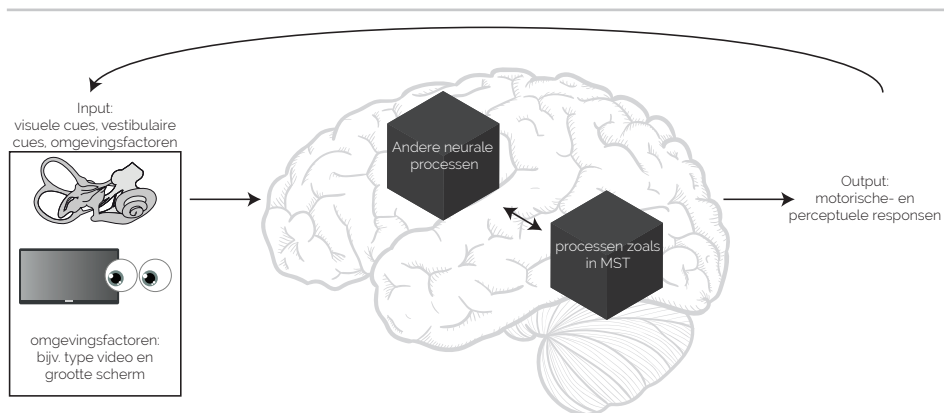
---

kunnen beïnvloeden. Van visuele aardvaste informatie wordt gedacht dat het de invloed van visuele beweging onderdrukt, en dus ook het visueel-vestibulaire conflict. Hoe invloedrijk de aardvaste visuele cues zijn in combinatie met visuele beweging is echter nog niet onderzocht. Het doel van **Hoofdstuk 5** was om te ontrafelen welk effect een aardvaste visuele cue samen met een rond de zichtlijn roterend patroon heeft op het visueel-vestibulaire conflict. Proefpersonen keken naar een roterend patroon met of zonder een visueel aardvast frame rondom het patroon, terwijl de posturale zwaai, subjectieve visuele verticaal (SVV) en VIMS werd gemeten. Zoals verondersteld door de MST onderdrukte het aardvaste visuele frame het effect van het roterende patroon op posturale zwaai, SVV afwijkingen en VIMS symptomen. Deze bevindingen ondersteunen dus de hypothese dat een aardvaste visuele cue het visuele-vestibulaire conflict en de daarbij horende motorische en perceptuele responsen kan onderdrukken. Daarnaast is de consistente invloed van de aardvaste cue en het roterende patroon op alle responsen een indicatie dat het neurale mechanisme karakteristieken bevat zoals beschreven in de MST.

In **Hoofdstuk 6** hebben we het visueel-vestibulaire conflict van een heel andere invalshoek benaderd door een groep patiënten te onderzoeken die een verergering van hun vestibulaire symptomen (o.a. posturale instabiliteit en bewegingsziekte) rapporteren wanneer zij specifieke visuele stimuli zien. Deze groep patiënten staat ook wel bekend als visueel-vestibulaire mismatch (VVM) patiënten. Het eerste doel van dit onderzoek was om een beter inzicht te krijgen in het onderliggende neurale mechanisme van VVM door dezelfde variabelen te onderzoeken als in **Hoofdstuk 5**: posturale zwaai, de SVV en VIMS. Ten tweede is onderzocht of beweging rond de zichtlijn noodzakelijk is om VVM symptomen te verergeren. In twee aparte sessies werden een groep VVM patiënten en gezonde proefpersonen blootgesteld aan een roterend patroon en een stilstaand patroon terwijl bovenstaande variabelen meerdere keren gemeten werden. Een eerste bevinding was dat patiënten altijd een grotere posturale zwaai hadden dan de gezonde proefpersonen, ongeacht het type stimulus. Ten tweede lieten zowel de patiënten als de controles een significante stijging in posturale zwaai en VIMS zien na blootstelling aan het roterende patroon, terwijl de SVV na afloop onveranderd bleek. Alleen de patiënten rapporteerden een significante stijging in VIMS na het kijken naar het roterende patroon in vergelijking met de VIMS scores gemeten na blootstelling aan het stilstaande patroon. Samengevat laten de resultaten zien dat deze groep VVM patiënten wel degelijk significant verschilt van gezonde proefpersonen op deze motorische en perceptuele responsen. Daarnaast heeft dit onderzoek aangetoond dat visuele beweging rondom de zichtlijn inderdaad een cruciale factor is in de verergering van de VVM symptomen. Een mogelijke verklaring voor deze bevindingen is dat een langdurige visuele-vestibulaire integratie problematiek kan leiden tot verkeerde neurale representaties, welke uiteindelijk uitmonden in de

geobserveerde VVM symptomen.

Tenslotte hebben we in **Hoofdstuk 7** het effect van een andere visuele manipulatie op het visueel-vestibulaire conflict onderzocht: de voor-achtergrond segregatie. In dit hoofdstuk wordt uitgegaan van het idee dat visuele factoren gerelateerd aan de voor-achtergrond segregatie, zoals stimulusgrootte en objectdichtheid, het visueel-vestibulaire conflict zowel kunnen verergeren als verminderen. Als een visuele factor behorend tot de achtergrond in een roterende achtergrond wordt gepresenteerd, zal het visueel-vestibulaire conflict worden verergerd. Maar als deze visuele factor in een roterende voorgrond wordt vertoond zal het visueel-vestibulaire conflict worden onderdrukt. Gebaseerd op de observatie dat het aantal objecten (i.e. dichtheid) onder normale omstandigheden verschilt tussen de voor- en achtergrond, is in **Hoofdstuk 7** gesteld dat het visueel-vestibulaire conflict differentieel wordt beïnvloed door de interactie tussen de objectdichtheid en de voor-achtergrond segregatie. Om deze hypothese te onderzoeken werden zowel posturale zwaai als roll-vectie (gevoel van zelf-kanteling) als variabelen geïncorporeerd. Bovendien heeft eerder onderzoek aangetoond dat posturale zwaai en roll-vectie tijdens blootstelling aan een roterend patroon gelijk worden beïnvloed, wat kan duiden op een gezamenlijk neurale mechanisme. Wanneer in dit onderzoek posturale zwaai en roll-vectie ook vergelijkbare veranderingen laten zien door de manipulaties, dan zal het bijdragen aan het bewijs voor een gezamenlijk neurale mechanisme. In dit onderzoek werden proefpersonen gevraagd te kijken naar roterende patronen waarin de objectdichtheid in voor- en achtergrond werd gevarieerd, terwijl data over posturale zwaai en roll-vectie werd verzameld. Zoals verwacht lieten de resultaten zien dat de objectdichtheid interacteerde met de voor-achtergrond segregatie in de beïnvloeding van posturale zwaai en roll-vectie. Gebaseerd op deze resultaten kan worden geconcludeerd dat de ratio tussen de objectdichtheid van de voor- en achtergrond patronen een belangrijke factor is in de interactie met de voor- en achtergrond en dat niet enkel de dichtheid van het roterende patroon cruciaal is. In andere woorden, een roterende achtergrond met meer objecten (hogere dichtheid) dan de stilstaande voorgrond veroorzaakte een groter visueel-vestibulair conflict, resulterend in meer posturale zwaai en roll-vectie, vergeleken met een roterende voorgrond met meer objecten dan de stilstaande achtergrond. Ten slotte zijn de consistente veranderingen in posturale zwaai en roll-vectie nieuw bewijs voor een gezamenlijke neurale oorsprong die posturale zwaai en roll-vectie reguleert.



**Figuur 2.** Een schematische illustratie van de veronderstelde interacties tussen CZS processen tijdens een visueel-vestibulair conflict. Naast de visuele en vestibulaire informatie zagen we dat omgevingsfactoren, zoals de grootte van het scherm of de gebruikte video, de motorische- en perceptuele responsen ook significant beïnvloedden.

Een vergelijking van deze bevindingen hebben ons een 'sneak peek' gegeven in onze 'black box' tijdens een visueel-vestibulair conflict. Al deze resultaten samengenomen maken aannemelijk dat de CZS processen zich gedragen als beschreven in de motion sickness theory. Echter hebben we ook gezien dat andere factoren de onderzochte motorische- en perceptuele responsen significant kunnen beïnvloeden. Een vergelijking van de resultaten van **Hoofdstukken 3** en **4** laten bijvoorbeeld zien dat de combinatie van de video met de grootte van het scherm een significant invloed heeft op VIMS.

De bevindingen uit dit proefschrift nodigen uit tot verder onderzoek. Zo zou vervolgonderzoek zich onder andere kunnen richten op het vinden van motorische en perceptuele responsen die volledig afhankelijk zijn van de betreffende CZS processen. Het onderzoek uit dit proefschrift heeft ook laten zien dat visuele factoren, zoals een aardvast-frame (**Hoofdstuk 5**) of de dichtheid (**Hoofdstuk 7**), motorische en perceptuele responsen kan verergeren of verminderen. Verder onderzoek naar visuele factoren die de motorische responsen kan vergroten of verminderen zou verder inzicht kunnen geven in hoe ongewilde effecten geminimaliseerd kunnen worden, terwijl gewenste effecten gemaximaliseerd kunnen worden. Meer kennis op dit gebied zou een boost kunnen geven aan het gebruik van virtual reality, omdat makkelijker stimuli ontwikkeld kunnen worden die aan specifieke eisen voldoen. Samengevat, ondanks dat virtuele omgevingen nog niet als echt zullen aanvoelen, zijn er meer dan genoeg redenen voor verder onderzoek om **Standing Well** in virtuele omgevingen realiteit te maken!





# Dankwoord



Het proefschrift, is dat nou de kers op de taart of een bittere pil? Voor mij is het proefschrift beiden: tijdens het schrijven was het soms een bittere pil, maar nu het er eenmaal ligt begint het steeds meer op een kers op de taart te lijken. Ik wil dan ook graag een aantal mensen bedanken voor zowel de steun die ik kreeg toen het proefschrift een bittere pil was, als voor de hulp om van deze bittere pil een kers op de taart te maken.

Allereerst wil jou graag bedanken dr. prof Bos. Jelte, zonder jouw positiviteit, kennis en toewijding zou dit proefschrift er zeker niet zijn geweest. Ik wil je dan ook ontzettend bedanken voor alle kennis die je met mij hebt willen delen en de steun die je me hebt gegeven. Ondanks het feit dat je maar 1 dag in de week op de VU was, kon ik altijd al mijn vragen, twijfels en gedachten bij je kwijt en wist je uit mijn vaak ongeordende gedachten datgene te destilleren wat er echt toe deed.

Beste John, ook zonder jou had dit proefschrift er niet in deze hoedanigheid gelegen. De rol van 'advocaat van de duivel' die je geregeld op je nam leidde soms tot hoofdbrekende situaties, maar uiteindelijk zorgde deze 'food for thought' altijd tot een beter resultaat. Ook wil ik je graag bedanken dat ik heb mogen leren van je talent om wetenschappelijke stukken bijna poëtisch op te schrijven. Als ik niet wist hoe ik iets goed kon verwoorden, kwam je altijd met een passende oplossing waar ik zelf nooit op was gekomen.

Dear Jeroen Smeets, Michael Gresty, Eric Groen, Floris Wuyts, Herman Kingma, thank you for all your time and dedication into reading my PhD thesis and for taking the time to participate in my defence.

I would also like to thank my colleagues from AUREA at the University of Antwerp (zie website) and the neuro otology department from Imperial College London. I'm very grateful you gave me the chance to work at your departments, from which I have learned so much. Special thanks goed out to Angelique van Ombergen, I think we were a great team! You were a delight to work with and I'm really happy we managed to write two nice papers together.

Ook wil ik graag mijn collega's van de afdeling Bewegingswetenschappen bedanken voor een leuke tijd. Met name mijn A613 roomies – Robert, Laura, Marriëtte, Roy, Sabrina, Sander en Jonathan – wil ik bedanken. Het was ontzettend fijn om te weten elke dag naar zo'n gezellige werkplek te kunnen gaan.

En Pussies – Nina, Anick, Ellen, Lidwi, Carolien, Djoeke, Boudine, Caroline en Ineke – wat ben ik blij met jullie! Ondanks dat we elkaar minder zien dan tijdens onze studietijd, zijn de keren dat we elkaar zien er niet

minder leuk op geworden. Het is ontzettend fijn om te weten dat wij er altijd voor elkaar zijn in zowel mooie als moeilijke tijden. Ineke en Ellen, dank dat jullie mijn paranimfen willen zijn!

Pap, Mam, Marcel, Karin, Oma, jullie maken het zonnige zuiden voor mij nog wat zonniger! Ook al was dat promoveren van mij soms moeilijk te begrijpen, ik ben jullie dankbaar dat jullie er altijd vragen over zijn blijven stellen. Het is ontzettend fijn om te weten dat mijn familie zo begaan met mij is.

Last but not least, liefste Pim, woorden schieten tekort als ik moet beschrijven hoe dankbaar ik jou ben. Jij hebt alles van dichtbij meegemaakt en stond elke keer weer voor mij klaar. Als ik weer een nieuwe experimentele opstelling had, stond jij er als eerste om me als proefkonijn te helpen. En als mijn proefschrift weer een bittere pil dreigde te worden, was jij degene die me opvrolijkte. Maar ook bij mooie momenten was jij daar, zoals het Bàrány congres en uiteraard mijn verdediging. Ik hoop dat wij nog vele mooie herinneringen samen mogen maken.

Kortom, dank jullie wel allemaal! Nu is het tijd om met jullie deze kers op de taart te vieren! Proost!



# List of publications

## Articles in scientific journals

Bos, J. E., Ledegang, W. D., **Lubeck, A. J. A.**, & Stins, J. F. (2013). Cinerama sickness and postural instability. *Ergonomics*, **56** (9), 1430-1436.

**Lubeck, A. J. A.**, Bos, J. E., & Stins, J. F. (2015). Motion in images is essential to cause motion sickness symptoms, but not to increase postural sway. *Displays*, **38**, 55-61.

**Lubeck, A. J. A.**, Bos, J. E., & Stins, J. F. (2016). Equally moved and not really sick from viewing 2D and 3D motion stimuli on a TV screen. *Displays*, **41**, 9-15.

**Lubeck, A. J. A.**, Bos, J. E., & Stins, J. F. (2015). Interaction between depth order and density affects vection and postural sway. *PLoS One*, **10** (12), e0144034.

**Lubeck, A. J. A.**, Bos, J. E., & Stins, J. F. (under revision). Framing visual roll-motion affects postural sway, the subjective visual vertical and motion sickness.

**Lubeck, A. J. A.**<sup>1</sup>, Van Ombergen, A.<sup>1</sup>, Van Rompaey, V., Maes, L. K., Stins, J. F., Van de Heyning, P. H., Wuyts, F. L. & Bos, J. E. (under revision). The effect of optokinetic stimulation on perceptual and postural symptoms in visual vestibular mismatch patients.

**Lubeck, A.J.A.**<sup>1</sup>, Van Ombergen, A.<sup>1</sup>, Ahmad, H., Bos, J.E., Wuyts, F.L., Bronstein, A.M., Arshad, Q. (submitted). Differential effect of visual motion adaption upon visual cortical excitability.

## International conference abstracts

**Lubeck, A.J.A.**, Bos, J. E., & Stins, J. F. (2013). *Moving and still images can induce comparable amounts of postural sway, but different levels of sickness*. Oral presentation, 4th International Symposium on Visual Image Safety (VIMS), Stratford-upon-Avon, UK, 3-4 September

**Lubeck, A.J.A.**, Bos, J. E., & Stins, J. F. (2013). *The effect of depth cues in a 2D motion pattern on vection and postural sway*. Poster presentation, Leuven Christmas Applied Vision Association (AVA) conference, KU Leuven, Leuven, Belgium, 19-20 December

**Lubeck, A.J.A.**, Bos, J. E., & Stins, J. F. (2014). *The effect of 2D depth cues on postural sway and roll-vection*. Poster presentation, 24th Neural Control of Movement (NCM) annual meeting, The NH Grand Hotel Krasnapolsky, Amsterdam, Netherlands, 21-25 April

**Lubeck, A.J.A.**, Bos, J.E., & Stins, J.F. (2014). *The effect of 2D depth cues on postural sway and roll-vection*. Poster presentation, XXVIII Barany Society Meeting, Hilton Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 25-28 May

**Lubeck A.J.A.**, van Ombergen A., Bos J.E., Stins J.F., Vereeck L., van Rompaey V., van de Heyning P. H., Wuyts F. L. (2014). *Course of postural sway and symptoms in visual-vestibular mismatch patients during exposure to optic flow*. Poster presentation, XXVIII

---

1 authors A.J.A. Lubeck and A. van Ombergen have equal contributions

Bárány Society Meeting, Hilton Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 25-28 May

**Lubeck, A.J.A.**, Bos, J.E., & Stins, J.F. (2015). *Equally moved and not really sick from viewing 2D and 3D motion stimuli on a TV screen*. Oral presentation, 5th International Symposium on Visual Image Safety (VIMS), Tokyo, Japan, 15-17 September

**Lubeck, A.J.A.**, Bos, J.E., & Stins, J.F. (2015). *Interaction between depth order and density affects vection and postural sway*. Oral presentation, 5th International Symposium on Visual Image Safety (VIMS), Tokyo, Japan, 15-17 September

## National conference abstracts

**Lubeck, A.J.A.**, Bos, J.E., & Stins, J.F. (2013). *Prolonged postural instability after watching motion pictures*. Poster presentation, 4th Annual Research Meeting of MOVE research institute Amsterdam, VU Medical Center, Amsterdam, Netherlands, 30 January

**Lubeck, A.J.A.**, Bos, J.E., & Stins, J.F. (2013). *Prolonged postural instability after watching motion pictures*. Oral presentation, Vestibulaire Vereniging, EMC, Rotterdam, Netherlands, 31 January

**Lubeck, A.J.A.**, Bos, J.E., & Stins, J.F. (2013). *Prolonged postural instability after watching motion pictures*. Poster presentation, VU University Medical Center Science Exchange Day, VU Medical Center, Amsterdam, Netherlands, 8 March

**Lubeck, A.J.A.**, Bos, J.E., & Stins, J.F. (2013). *Moving and still images can induce comparable amounts of postural sway, but different levels of sickness*. Oral presentation, Helmholtz Ph.D Day, Universiteit van Utrecht, Utrecht, Netherlands, 1 November

**Lubeck, A.J.A.**, Bos, J.E., & Stins, J.F. (2013). *Moving and still images can induce comparable amounts of postural sway, but different levels of sickness*. Oral presentation, Joint meeting of the Vestibulaire Vereniging and Dutch ENT Society, MECC Maastricht, Maastricht, Netherlands, 14 November

**Lubeck, A.J.A.**, Bos, J.E., & Stins, J. F. (2014). *The effect of depth cues in a 2D motion pattern on vection and postural sway*. Poster presentation, 5th annual MOVE research meeting, VUmc, Amsterdam, Netherlands, 30 January

**Lubeck A.J.A.**, van Ombergen A., Bos J.E., Stins J.F., Vereeck L., van Rompaey V., van de Heyning P. H., Wuyts F. L. (2015). *The effect of optokinetic stimulation on perceptual and postural symptoms in visual vestibular mismatch patients*. Oral presentation, Joint meeting of the Vestibulaire Vereniging and Dutch ENT Society, Nieuwegein, Netherlands, 19 November

**Lubeck, A.J.A.**, Bos, J.E., & Stins, J.F. (2015). *Equally moved and not really sick from viewing 2D and 3D motion stimuli on a TV screen*. Oral presentation, Joint meeting of the Vestibulaire Vereniging and Dutch ENT Society, Nieuwegein, Netherlands, 19 November

