

# VU Research Portal

## Biomechanical evaluation of exoskeletons for the prevention of Low-Back Pain

Koopman, A.S.

2020

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

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

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

Koopman, A. S. (2020). *Biomechanical evaluation of exoskeletons for the prevention of Low-Back Pain*.

### **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

- Abdoli, E. M., Agnew, M. J., and Stevenson, J. M. (2006). An on-body personal lift augmentation device (plad) reduces emg amplitude of erector spinae during lifting tasks. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 21:456–465.
- Abdoli, E. M. and Stevenson, J. M. (2008). The effect of on-body lift assistive device on the lumbar 3d dynamic moments and emg during asymmetric freestyle lifting. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 23(3):372–80.
- Abdoli-Eramaki, M., Stevenson, J. M., Reid, S. A., and Bryant, T. J. (2007). Mathematical and empirical proof of principle for an on-body personal lift augmentation device (plad). *Journal of Biomechanics*, 40(8):1694–700.
- Adams, M. A. and Hutton, W. C. (1985). Gradual disc prolapse. *Spine*, 10(6):524–554.
- Ahmed, A. I. A., Cheng, H., Lin, X., Omer, M., and Atieno, J. M. (2016). Survey of on-line control strategies of human-powered augmentation exoskeleton systems. *Adv Robot Autom*, 5(3):158.
- Alemi, M. M., Geissinger, J., Simon, A. A., Chang, S. E., and Asbeck, A. T. (2019). A passive exoskeleton reduces peak and mean emg during symmetric and asymmetric lifting. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 47:25–34.
- Ansari, A., Atkeson, C. G., Choset, H., and Travers, M. (2015). Estimating operator intent (draft 4.0). *Tech. rep.*
- Arjmand, N., Gagnon, D., Plamondon, A., Shirazi-Adl, A., and Lariviere, C. (2009). Comparison of trunk muscle forces and spinal loads estimated by two biomechanical models. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 24(7):533–41.
- Babič, J., Mombaur, K., Lefebvre, D., van Dieën, J., Graimann, B., Russold, M., Šarabon, N., and Houdijk, H. (2017). Spexor: Spinal exoskeletal robot for low back pain prevention and vocational reintegration. In González-Vargas, J., Ibáñez, J., Contreras-Vidal, J. L., van der Kooij, H., and Pons, J., editors, *Wearable Robotics: Challenges and Trends*, pages 311–315. Springer International Publishing.
- Bakker, E. W., Verhagen, A. P., van Trijffel, E., Lucas, C., and Koes, B. W. (2009). Spinal mechanical load as a risk factor for low back pain: a systematic review of prospective cohort studies. *Spine*, 34(8):93.

- Baltrusch, S. J., Houdijk, H., van Dieën, J. H., van Bennekom, C. A. M., and de Kruif, A. J. T. C. M. (2020a). Perspectives of end users on the potential use of trunk exoskeletons for people with low-back pain: A focus group study. *Human Factors*.
- Baltrusch, S. J., van Dieën, J. H., Bruijn, S. M., Koopman, A. S., van Bennekom, C. A. M., and Houdijk, H. (2019). The effect of a passive trunk exoskeleton on metabolic costs during lifting and walking. *Ergonomics*, 62(7):903–916.
- Baltrusch, S. J., van Dieën, J. H., Koopman, A. S., Näf, M. B., Rodriguez-Guerrero, C., Babič, J., and Houdijk, H. (2020b). Spexor passive spinal exoskeleton decreases metabolic cost during symmetric repetitive lifting. *European Journal of Applied Physiology*, 120(2):401–412.
- Baltrusch, S. J., van Dieën, J. H., van Bennekom, C., and Houdijk, H. H. (2020c). Testing an exoskeleton that helps workers with lower-back pain: Less discomfort with the passive spexor trunk device. *IEEE Robotics Automation Magazine*.
- Baltrusch, S. J., van Dieën, J. H., van Bennekom, C. A. M., and Houdijk, H. (2018). The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Applied Ergonomics*, 72:94–106.
- Barrett, A. and Fathallah, F. (2001). Evaluation of four weight transfer devices for reducing loads on lower back during agricultural stoop labor. In *ASAE Annual International Meeting*.
- Bazrgari, B., Shirazi-Adl, A., Trottier, M., and Mathieu, P. (2008). Computation of trunk equilibrium and stability in free flexion-extension movements at different velocities. *Journal of Biomechanics*, 41(2):412–21.
- Beléndez, T., Neipp, C., and Beléndez, A. (2002). Large and small deflections of a cantilever beam. *European Journal of Physics*, 23(3):371–379.
- Bergmann, A., Bolm-Audorff, U., Ditchen, D., Ellegast, R., Grifka, J., Haerting, J., Hofmann, F., Jäger, M., Linhardt, O., Luttmann, A., Meisel, H. J., Michaelis, M., Petereit-Haack, G., Schumann, B., and Seidler, A. (2011). Do occupational risks for low back pain differ from risks for specific lumbar disc diseases?: Results of the german lumbar spine study (epilift). *Spine*, 42(20):1204–1211.
- Bisschop, A., Mullender, M., Kingma, I., Jiya, T., van der Veen, A., Roos, J., and et al. (2012). The impact of bone mineral density and disc degeneration on shear strength and stiffness of the lumbar spine following laminectomy. *Eur. Spine J.*, 21:530–536.
- Bogduk, N., Macintosh, J. E., and Percy, M. J. (1992). A universal model of the lumbar back muscles in the upright position. *Spine*, 17(8):897–913.
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K., and de Looze, M. P. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*, 54:212–7.

- Brinckmann, P., Biggemann, M., and Hilweg, D. (1988). Fatigue fracture of human lumbar vertebrae. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 3.
- Brinckmann, P., Biggemann, M., and Hilweg, D. (1989). Prediction of the compressive strength of human lumbar vertebrae. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 4.
- Buchbinder, R., Blyth, F. M., March, L. M., Brooks, P., Woolf, A. D., and Hoy, D. G. (2013). Placing the global burden of low back pain in context. *Best Pract Res Clin Rheumatol*, 27(5):575–89.
- Burgess-Limerick, R. and Abernethy, B. (1998). Effect of load distance on self-selected manual lifting technique. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 22(4-5):367–372.
- Cappozzo, A., Catani, F., Croce, D. U., and Leardini, A. (1995). Position and orientation in space of bones during movement: anatomical frame definition and determination. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 10:171–178.
- Cha, J. S., Monfared, S., Ecker, K., Lee, D., and Stefanidis, D. (2019). Identifying barriers and facilitators of exoskeleton implementation in the operating room. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*.
- Chen, B., Ma, H., Qin, L. Y., Gao, F., Chan, K. M., Law, S. W., Qin, L., and Liao, W. H. (2015). Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons. *J. Orthop. Translat.*, 5:26–37.
- Christophy, M., Faruk, S., Nur, A., Lotz, J. C., and O’Reilly, O. M. (2012). A musculoskeletal model for the lumbar spine. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 11(1):19–34.
- Coenen, P. (2013). *On the origin of back pain*. Thesis.
- Coenen, P., Kingma, I., Boot, C. R., Bongers, P. M., and van Dieën, J. H. (2012). The contribution of load magnitude and number of load cycles to cumulative low-back load estimations: a study based on in-vitro compression data. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 27(10):1083–6.
- Coenen, P., Kingma, I., Boot, C. R., Bongers, P. M., and van Dieën, J. H. (2014). Cumulative mechanical low-back load at work is a determinant of low-back pain. *Occup Environ Med.*, 71(5):332–338.
- Coenen, P., Kingma, I., Boot, C. R., Faber, G. S., Xu, X., Bongers, P. M., and van Dieën, J. H. (2011). Estimation of low back moments from video analysis: A validation study. *Journal of Biomechanics*, 44:2369–2375.
- Coenen, P., Kingma, I., Boot, C. R., Twisk, J. W., Bongers, P. M., and van Dieën, J. H. (2013). Cumulative low back load at work as a risk factor of low back pain: a prospective cohort study. *J Occup Rehabil*, 23(1):11–18.

- Collins, S. H., Wiggin, M. B., and Sawicki, G. S. (2015). Reducing the energy cost of human walking using an unpowered exoskeleton. *Nature*, 522(7555):212–215.
- Cutti, A. G., Giovanardi, A., Rocchi, L., Davalli, A., and Sacchetti, R. (2008). Ambulatory measurement of shoulder and elbow kinematics through inertial and magnetic sensors. *Med Biol Eng Comput*, 46(2):169–78.
- da Costa, B. R. and Vieira, E. R. (2010). Risk factors for work-related musculoskeletal disorders: a systematic review of recent longitudinal studies. *Am J Ind Med*, 53(3):285–323.
- Dagenais, S., Caro, J., and Haldeman, S. (2008). A systematic review of low back pain cost of illness studies in the united states and internationally. *Spine J.*, 8(1):8–20.
- Davis, K. G. and Marras, W. S. (2000). Assessment of the relationship between box weight and trunk kinematics: does a reduction in box weight necessarily correspond to a decrease in spinal loading? *Human Factors*, 42(2):195–208.
- de Leva, P. (1996). Adjustments to zatsiorsky-seluyanov’s segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, 29:1223–1230.
- de Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S., and O’Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59(5):671–81.
- DeLuca, C. J. and Merletti, R. (1988). Surface myoelectric signal cross-talk among muscles of the leg. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 69.
- Dempsey, P. G. (2003). A survey of lifting and lowering tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 31(1):11–16.
- Dennis, G. J. and Barrett, R. S. (2010). Spinal loads during individual and team lifting. *Ergonomics*, 45(10):671–681.
- Dolan, P., Mannion, A. F., and Adams, M. A. (1994). Passive tissues help the back muscles to generate extensor moments during lifting. *J Biomech*, 27(8):1077–85.
- Driessen, M. T., Proper, K. I., van Tulder, M. W., Anema, J. R., Bongers, P. M., and van der Beek, A. J. (2010). The effectiveness of physical and organisational ergonomic interventions on low back pain and neck pain: a systematic review. *Occup Environ Med*, 67:277–285.
- Durfee, W. and Goldfarb, M. (1995). Controlled-brake orthosis. US Patent 5, 476,441.
- Ellegast, R., Hermanns, I., and Schiefer, C. (2009). Workload assessment in field using the ambulatory cuela system. *Digital human modeling*, pages 221–226.
- Eurofound (2012). 5th european working conditions survey. *Publications Office of the European Union, Luxembourg*.

- Faber, G. S. (2010). *Towards ambulatory assessment of spinal loading in the field*. PhD thesis, VU Amsterdam.
- Faber, G. S., Chang, C. C., Kingma, I., and Dennerlein, J. T. (2013a). Estimating dynamic external hand forces during manual materials handling based on ground reaction forces and body segment accelerations. *Journal of Biomechanics*, 46(15):2736–40.
- Faber, G. S., Chang, C. C., Kingma, I., and Dennerlein, J. T. (2013b). Lifting style and participant’s sex do not affect optimal inertial sensor location for ambulatory assessment of trunk inclination. *Journal of Biomechanics*, 46(5):1027–30.
- Faber, G. S., Chang, C. C., Kingma, I., Dennerlein, J. T., and van Dieën, J. H. (2015). Estimating 3d l5/s1 moments and ground reaction forces during trunk bending using a full-body ambulatory inertial motion capture system. *Journal of Biomechanics*, 49(6):904–912.
- Faber, G. S., Chang, C. C., Rizun, P., and Dennerlein, J. T. (2013c). A novel method for assessing the 3-d orientation accuracy of inertial/magnetic sensors. *Journal of Biomechanics*, 46:2745–2751.
- Faber, G. S., Kingma, I., Kuijter, P. P., van der Molen, H. F., Hoozemans, M. J., Frings-Dresen, M. H., and van Dieën, J. H. (2009a). Can low back loading during lifting be reduced by placing one leg beside the object to be lifted? *Phys. Ther.*, 86:1091–1105.
- Faber, G. S., Kingma, I., Schepers, M. H., Veltink, P. H., and van Dieën, J. H. (2009b). Determination of joint moments with instrumented force shoes in a variety of tasks. *Journal of Biomechanics*, 43:2848–2854.
- Faber, G. S., Kingma, I., and van Dieën, J. H. (2007). The effects of ergonomic interventions on low back moments are attenuated by changes in lifting behaviour. *Ergonomics*, 50(9):1377–91.
- Faber, G. S., Kingma, I., and van Dieën, J. H. (2010). Bottom-up estimation of joint moments during manual lifting using orientation sensors instead of position sensors. *Journal of Biomechanics*, 43(7):1432–6.
- Faber, G. S., Kingma, I., and van Dieën, J. H. (2011). Effect of initial horizontal object position on peak l5/s1 moments in manual lifting is dependent on task type and familiarity with alternative lifting strategies. *Ergonomics*, 54(1):72–81.
- Faber, G. S., Kingma, I., van Dieën, J. H., Scherpers, H. M., Herber, S., Veltink, P. H., and Dennerlein, J. T. (2012). A force plate based method for the calibration of force/torque sensors. *Journal of Biomechanics*, 45:1332–1338.
- Faber, G. S., Koopman, A. S., Kingma, I., Chang, C. C., Dennerlein, J. T., and van Dieën, J. H. (2018). Continuous ambulatory hand force monitoring during manual materials handling using instrumented force shoes and an inertial motion capture suit. *Journal of Biomechanics*, 70:235–241.

- Fleischer, C. and Hommel, G. (2008). A human–exoskeleton interface utilizing electromyography. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(4):872–882.
- Floyd, W. F. and Silver, P. H. (1955). The function of the erector spinae muscles in certain movements and postures in man. *J Physiol*, 129(1):184–203.
- for Safety, O. E. A. and at Work), H. (2000). Osh in figures: Work-related musculoskeletal disorders in the eu - facts and figures. *Publications Office of the European Union*.
- Forner-Cordero, A., Mateu-Arce, M., Forner-Cordero, I., Alcantra, E., Moreno, J. C., and Pons, J. L. (2008). Study of the motion artefacts of skin-mounted inertial sensors under different attachment conditions. *Physiol. Meas.*, 29:N21–N31.
- Frei, H., Oxland, T. R., and Nolte, L.-P. (2002). Thoracolumbar spine mechanics contrasted under compression and shear loading. *Journal of Orthopaedic Research*, 20(6):1333–1338.
- Freitag, S., Ellegast, R., Dulon, M., and Nienhaus, A. (2007). Quantitative measurement of stressful trunk postures in nursing professions. *Ann Occup Hyg*, 51(4):385–95.
- Gagnon, D., Arjmand, N., Plamondon, A., Shirazi-Adl, A., and Lariviere, C. (2011). An improved multi-joint emg-assisted optimization approach to estimate joint and muscle forces in a musculoskeletal model of the lumbar spine. *Journal of Biomechanics*, 44(8):1521–9.
- Gallagher, S. and Marras, W. S. (2012). Tolerance of the lumbar spine to shear: A review and recommended exposure limits. *Clinical Biomechanics*, 27(10):973–978.
- Garg, A. (1995). Revised niosh equation for manual lifting: a method for job evaluation. *Aaohn J.*, 43(4):211–216.
- GBD 2015 Disease and Injury Incidence and Prevalence Collaborators (2016). Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 310 diseases and injuries, 1990–2015: a systematic analysis for the global burden of disease study 2015. *The Lancet*, 388(10053):1545–1602.
- Giovacchini, F., Vannetti, F., Fantozzi, M., Cempini, M., Cortese, M., Parri, A., Yan, T., Lefeber, D., and Vitiello, N. (2015). A light-weight active orthosis for hip movement assistance. *Robotics and Autonomous Systems*, 73:123 – 134. Wearable Robotics.
- Godwin, A., Agnew, M., and Stevenson, J. (2009). Accuracy of inertial motion sensors in static, quasistatic, and complex dynamic motion. *J Biomech Eng*, 131(11):114501–5.
- Graham, R. B., Agnew, M. J., and Stevenson, J. M. (2009). Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task: assessment of emg response and user acceptability. *Applied Ergonomics*, 40(5):936–42.
- Grazi, L., Crea, S., Parri, A., and R., M. (2018). Gastrocnemius myoelectric control of a robotic hip exoskeleton can reduce the user’s lower-limb muscle activities at push off. *Frontiers in Neuroscience*.

- Grazi, L., Crea, S., Parri, A., Yan, T., Cortese, M., Giovacchini, F., Cempini, M., Pasquini, G., Micera, S., and Vitiello, N. (2015). Gastrocnemius myoelectric control of a robotic hip exoskeleton. In *2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pages 3881–3884.
- Griffith, L. E., Shannon, H. S., Wells, R. P., Walter, S. D., Cole, D. C., Côté, P., Frank, J., Hogg-Johnson, S., and Langlois, L. E. (2012). Individual participant data meta-analysis of mechanical workplace risk factors and low back pain. *American journal of public health*, 102(2):309–318.
- Hakonen, M., Piitulainen, H., and Visala, A. (2015). Current state of digital signal processing in myoelectric interfaces and related applications. *Biomedical Signal Processing and Control*, 18:334–359.
- Hara, H. and Sankai, Y. (2010). Development of hal for lumbar support. In *SCIS and ISIS 2010 - Joint 5th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 11th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (Okayama, Japan)*, pages 416–421.
- Hartvigsen, J., Hancock, M. J., Kongsted, A., Louw, Q., Ferreira, M., Genevay, S., Hoy, D., Karppinen, J., Pransky, G., Sieper, J., Smeets, R. J., Underwood, M., and on behalf of the Lancet Low Back Pain Series Working Group (2018). What low back pain is and why we need to pay attention. *Lancet*, 391(10137):2356–2367.
- Hayashi, T., Kawamoto, H., and Sankai, Y. (2005). Control method of robot suit hal working as operator’s muscle using biological and dynamical information. In *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3063–3068.
- Hegewald, J., Berge, W., Heinrich, P., Staudte, R., Freiberg, A., Scharfe, J., Girbig, M., Nienhaus, A., and Seidler, A. (2018). Do technical aids for patient handling prevent musculoskeletal complaints in health care workers?—a systematic review of intervention studies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15:476.
- Hof, A. L. (1992). An explicit expression for the moment in multibody systems. *Journal of Biomechanics*, 25(10):1209–11.
- Hoogendoorn, W. E., van Poppel, M. N. M., Bongers, P. M., Koes, B. W., and Bouter, L. M. (2000). Systematic review of psychosocial factors at work and private life as risk factors for back pain. *Spine*, 25(16):2114–2125.
- Hoozemans, M. J., Kingma, I., de Vries, W. H., and van Dieën, J. H. (2008). Effect of lifting height and load mass on low back loading. *Ergonomics*, 51(7):1053–63.
- Hoy, D., March, L., Brooks, P., Blyth, F., Woolf, A., Bain, C., Williams, G., Smith, E., Vos, T., Barendregt, J., Murray, C., Burstein, R., and Buchbinder, R. (2014). The global burden of low back pain: estimates from the global burden of disease 2010 study. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 73(6):968–974.



- Huysamen, K., de Looze, M. P., Bosch, T., Ortiz, J., Toxiri, S., and O'Sullivan, L. W. (2018). Assessment of an active industrial exoskeleton to aid dynamic lifting and lowering manual handling tasks. *Applied Ergonomics*, 68:125–131.
- Ikeuchi, Y., Ashihara, J., Hiki, Y., Kudoh, H., and Noda, T. (2009). Walking assist device with bodyweight support system. In *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'09*, pages 4073–4079, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press.
- Imamura, Y., Tanaka, T., Suzuki, Y., Takizawa, K., and Yamanaka, M. (2014). Analysis of trunk stabilization effect by passive power-assist device. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 26(6):791–798.
- Inose, H., Mohri, S., Arakawa, H., Okui, M., Koide, K., Yamada, Y., Kikutani, I., and Nakamura, T. (2017). Semi-endoskeleton-type waist assist ab-wear suit equipped with compressive force reduction mechanism. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 6014–6019.
- Jäger, M. (2018). Extended compilation of autopsy-material measurements on lumbar ultimate compressive strength for deriving reference values in ergonomic work design: The revised dortmund recommendations. *EXCLI journal*, 17:362–385.
- Jensen, T. S., J, K., Sorensen, J. S., Niinimäki, J., and Leboeuf-Yde, C. (2008). Vertebral endplate signal changes (modic change): a systematic literature review of prevalence and association with non-specific low back pain. *Eur. Spine J.*, 17(11):1407–1428.
- Junius, K., Degelaen, M., Lefeber, N., Swinnen, E., Vanderborght, B., and Lefeber, D. (2017a). Bilateral, misalignment-compensating, full-dof hip exoskeleton: Design and kinematic validation. *Applied Bionics and Biomechanics*.
- Junius, K., Lefeber, N., Swinnen, E., Vanderborght, B., and Lefeber, D. (2017b). Metabolic effects induced by a kinematically compatible hip exoskeleton during sts. *IEEE Trans Biomed Eng.*, 65(6):1399–1409.
- Kadota, K., Saitoh, Y., Kawashima, K., and Kagawa, T. (2009). Estimation of contraction rate from the volume of isothermal pneumatic rubber muscles. *Transactions of the Japan Fluid Power System Society*, 40(2):17–21.
- Karavas, N., Ajoudani, A., Tsagarakis, N., Saglia, J., Bicchi, A., and Caldwell, D. (2013). Tele-impedance based stiffness and motion augmentation for a knee exoskeleton device. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2194–2200.
- Karwowski, W. and Marras, W. S. E. (2003). *Occupational Ergonomics: Principles of Work Design*. CRC Press.
- Kazerooni, H., Racine, J. L., Huang, L., and Steger, R. (2005). On the control of the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex). In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4353–4360.

- Kersten, P., Küçükdeveci, A. A., and Tennant, A. (2012). The use of the visual analogue scale (vas) in rehabilitation outcomes. *J Rehabil Med.*, 44(7):609–10.
- Kim, S. and Nussbaum, M. A. (2013a). Performance evaluation of a wearable inertial motion capture system for capturing physical exposures during manual material handling tasks. *Ergonomics*, 56:314–326.
- Kim, S. and Nussbaum, M. A. (2013b). Performance evaluation of a wearable inertial motion capture system for capturing physical exposures during manual material handling tasks. *Ergonomics*, 56(2):314–326.
- Kim, W., Lee, J., Peternel, L., Tsagarakis, N. G., and Ajoudani, A. (2018). Anticipatory robot assistance for the prevention of human static joint overloading in human–robot collaboration. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3:68–75.
- Kingma, I., Baten, C. T., Dolan, P., Toussaint, H. M., van Dieën, J. H., de Looze, M. P., and Adams, M. A. (2001). Lumbar loading during lifting: a comparative study of three measurement techniques. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11(5):337–45.
- Kingma, I., Bosch, T., Bruins, L., and van Dieën, J. H. (2004). Foot positioning instruction, initial vertical load position and lifting technique: effects on low back loading. *Ergonomics*, 47(13):1365–85.
- Kingma, I., de Looze, M. P., Toussaint, H. M., Klijnsma, H. G., and Bruijnen, T. B. M. (1996). Validation of a full body 3-d dynamic linked segment model. *Human Movement Science*, 15(6):833–860.
- Kingma, I., Faber, G. S., Bakker, A. J. M., and van Dieën, J. H. (2006). Can low back loading during lifting be reduced by placing one leg beside the object to be lifted? *Phys. Ther.*, 86:1091–1105.
- Kingma, I., Faber, G. S., and van Dieën, J. H. (2010). How to lift a box that is too large to fit between the knees. *Ergonomics*, 53(10):1228–1238.
- Kingma, I., Faber, G. S., and van Dieën, J. H. (2016). Supporting the upper body with the hand on the thigh reduces back loading during lifting. *Journal of Biomechanics*, 49(6):881–889.
- Ko, H. K., Lee, S. W., Koo, D. H., Lee, I., and Hyun, D. J. (2018). Waist-assistive exoskeleton powered by a singular actuation mechanism for prevention of back-injury. *Robotics and Autonomous Systems*, 107:1–9.
- Kobayashi, H., Aida, T., and Hashimoto, T. (2009). Muscle suit development and factory application. *International Journal of Automation Technology*, 3(6):709–715.
- Kobayashi, H. and Nozaki, H. (2008). Development of support system for forward tilting of the upper body. In *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*.

- Koes, B. W., van Tulder, M., Lin, C. W., Macedo, L. G., McAuley, J., and Maher, C. (2010). An updated overview of clinical guidelines for the management of non-specific low back pain in primary care. *Eur Spine J*, 19(12):2075–94.
- Konz, S. (1982). Niosh lifting guidelines. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 43(12):931–933.
- Koopman, A. S., Kingma, I., de Looze, M. P., and van Dieën, J. H. (2019a). Effects of a passive back exoskeleton on the mechanical loading of the low-back during symmetric lifting. *Journal of Biomechanics*, ??(??):??
- Koopman, A. S., Kingma, I., Faber, G. S., Bornmann, J., and van Dieën, J. H. (2018). Estimating 3d l5s1 moments using a simplified ambulatory measurement system. *Journal of Biomechanics*, 70:242–248.
- Koopman, A. S., Kingma, I., Faber, G. S., de Looze, M. P., and van Dieën, J. H. (2019b). Effects of a passive exoskeleton on the mechanical loading of the low back in static holding tasks. *Journal of Biomechanics*, 83:97–103.
- Koopman, A. S., Toxiri, S., Power, V., Kingma, I., van Dieën, J. H., Ortiz, J., and de Looze, M. p. (2019c). The effect of control strategies for an active back-support exoskeleton on spine loading and kinematics during lifting. *Journal of Biomechanics*, 91:14–22.
- Kuiper, J. I., Burdorf, A., Frings-Dresen, M. H., Kuijer, P. P., Spreeuwers, D., Lotters, F. J., and Miedema, H. S. (2005). Assessing the work-relatedness of nonspecific low-back pain. *Scand J Work Environ Health*, 31(3):237–43.
- Kuslich, S. D., Ulstrom, C. L., and Michael, C. J. (1991). The tissue origin of low back pain and sciatica: a report of pain response to tissue stimulation during operations on the lumbar spine using local anesthesia. *Orthopaedics Clinics of North America*, 22(2):181–187.
- Laevo, B. V. (2018). Product information - what is the laevo and how does it work?
- Lambeek, L. C., van Tulder, M. W., Swinkels, I. C., Koppes, L. L., Anema, J. R., and van Mechelen, W. (2011). The trend in total cost of back pain in the netherlands in the period 2002 to 2007. *Spine (Phila Pa 1976)*, 36(13):1050–8.
- Lavender, S. A., Ko, P. L., and Sommerich, C. M. (2013). Biomechanical evaluation of the eco-pick lift assist: a device designed to facilitate product selection tasks in distribution centers. *Applied ergonomics*, 44:230–226.
- Leardini, A., Chiari, L., Della Croce, U., and Cappozzo, A. (2005). Human movement analysis using stereophotogrammetry - part 3. soft tissue artifact assessment and compensation. *Gait Posture*, 21:212–225.
- Lenzi, T., De Rossi, S. M. M., Vitiello, N., and Carrozza, M. C. (2012). Intention-based emg control for powered exoskeletons. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 59(8):2180–2190.

- Li, X., Noritsugu, T., Takaiwa, M., and Sasaki, D. (2013). Design of wearable power assist wear for low back support using pneumatic actuators. *The Proceedings of Conference of Chugoku-Shikoku Branch*, 50:81501–81502.
- Liedtke, C., Fokkenrood, S. A. W., Menger, J. T., van der Kooij, H., and Veltink, P. H. (2007). Evaluation of instrumented shoes for ambulatory assessment of ground reaction forces. *Gait Posture*, 26:39–47.
- Lindbeck, L. and Kjellberg, K. (2001). Gender differences in lifting technique. *Ergonomics*, 44(2):202–14.
- Lobo-Prat, J., Kooren, P. N., Stienen, A. H., Herder, J. L., Koopman, B. F., and Veltink, P. H. (2014). Non-invasive control interfaces for intention detection in active movement-assistive devices. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11(1):168.
- Lotz, C. A., Agnew, M. J., Godwin, A. A., and Stevenson, J. M. (2009). The effect of an on-body personal lift assist device (plad) on fatigue during a repetitive lifting task. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(2):331–40.
- Luinge, H. J. and Veltink, P. H. (2005). Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers. *Medical Biological Engineering Computing*, 43(2):273–282.
- Magee, D. J. (2006). *Orthopedic Physical Assessment*. Saunders Elsevier, Philadelphia, PA., 4th edition.
- Marinov, B. (2016). 19 military exoskeletons into 5 categories.
- Marinov, B. (2018). Exoskeleton report catalog.
- Marras, W. D., Lavender, S. A., Leurgans, S. E., Fathallah, F. A., Ferguson, S. A., Allread, W. G., and Rajulu, S. L. (1995). Biomechanical risk factors for occupationally related low back disorders. *Ergonomics*, 38(2):762–768.
- Marras, W. S. and Davis, K. G. (1998). Spine loading during asymmetric lifting using one versus two hands. *Ergonomics*, 41(6):817–34.
- Marras, W. S., Davis, K. G., and Jorgensen, M. (2002). Spine loading as a function of gender. *Spine*, 27(22):2514–2520.
- Marras, W. S., Davis, K. G., and Jorgensen, M. (2003). Gender influences on spine loads during complex lifting. *Spine J*, 3(2):93–9.
- Marras, W. S. and Granata, K. P. (1997). The development of an emg-assisted model to assess spine loading during whole-body free-dynamic lifting. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 7(4):259–268.

- Marras, W. S., Granata, K. P., Davis, K. G., Allread, W. G., and Jorgensen, M. J. (1999). Effects of box features on spine loading during warehouse order selecting. *Ergonomics*, 42(7):980–96.
- Marras, W. S., Lavender, S. A., Ferguson, S. A., Splittstoesser, R. E., Yang, G., and Schabo, P. (2010). Instrumentation for measuring dynamic spinal load moment exposures in the workplace. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 20(1):1–9.
- McGill, S. M. (1991). Electromyographic activity of the abdominal and low back musculature during the generation of isometric and dynamic axial trunk torque: implications for lumbar mechanics. *J Orthop Res*, 9(1):91–103.
- McGill, S. M. (1996). A revised anatomical model of the abdominal musculature for torso flexion efforts. *Journal of Biomechanics*, 29(7):973–7.
- McGill, S. M. and Brown, S. (1992). Creep response of the lumbar spine to prolonged full flexion. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 7(1):43–46.
- Meattini, R., Palli, G., and Melchiorri, C. (2017). Experimental evaluation of a semg-based control for elbow wearable assistive devices during load lifting tasks. In *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, pages 140–145.
- Millard, M., Sreenivasa, M., and Mombaur, K. (2017). Predicting the motions and forces of wearable robotic systems using optimal control. *Frontiers in Robotics and AI*, 4:41.
- Miller, L. E., Zimmermann, A. K., and Herbert, W. G. (2016). Clinical effectiveness and safety of powered exoskeleton-assisted walking in patients with spinal cord injury: systematic review with meta-analysis. *Medical devices (Auckland, N.Z.)*, 9:455–466.
- Muramatsu, Y., Kobayashi, H., Sato, Y., Jiaou, H., and Hashimoto, T. (2011). Quantitative performance analysis of exoskeleton augmenting devices—muscle suit—for manual worker. *International Journal of Automation Technology*, 5(4):559–567.
- Muramatsu, Y., Umehara, H., and Kobayashi, H. (2013). Improvement and quantitative performance estimation of the back support muscle suit. In *2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pages 2844–2849.
- Netter, F. H. (2011). *Atlas of Human anatomy*. Saunders Elsevier, 5th edition.
- Nolan, D., O’Sullivan, K., Newton, C., Singh, G., and Smith, B. E. (2019). Are there differences in lifting technique between those with and without low back pain? a systematic review. *Scandinavian Journal of Pain*.
- Norman, R., Wells, R., Neumann, P., Frank, J., Shannon, H., and Kerr, M. (1998). A comparison of peak vs cumulative physical work exposure risk factors for the reporting of low back pain in the automotive industry. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 13(8):561–573.

- Näf, M. B., De Rijke, L., Guerrero, C. R., Millard, M., Vanderborght, B., and Lefebber, D. (2017). Towards low back support with a passive biomimetic exo-spine. In *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, pages 1165–1170.
- Näf, M. B., Junius, K., Rossini, M., Rodriguez-Guerrero, C., Vanderborght, B., and Lefebber, D. (2019). Misalignment compensation for full human-exoskeleton kinematic compatibility: State of the art and evaluation. *Applied Mechanics Reviews*, 70(5).
- Näf, M. B., Koopman, A. S., Baltrusch, S. J., Rodriguez-Guerrero, C., Vanderborght, B., and Lefebber, D. (2018). Passive back support exoskeleton improves range of motion using flexible beams. *Frontiers in Robotics and AI*, 5(72).
- Osti, O. L., Vernon-Roberts, B., and Fraser, R. D. (1990). 1990 volvo award in experimental studies. annulus tears and intervertebral disc degeneration. an experimental study using an animal model. *Spine*, 15(8):762–768.
- Pataky, T. C., Robinson, M. A., and Vanrenterghem, J. (2013). Vector field statistical analysis of kinematic and force trajectories. *Journal of Biomechanics*, 46(14):2394–401.
- Picchiotti, M. T., Weston, E. B., Knapik, G. G., Dufour, J. S., and Marras, W. S. (2019). Impact of two postural assist exoskeletons on biomechanical loading of the lumbar spine. *Applied Ergonomics*, 75:1–7.
- Plamondon, A., Delisle, A., Larue, C., Brouillette, D., McFadden, D., Desjardins, P., and Lariviere, C. (2007). Evaluation of a hybrid system for three-dimensional measurement of trunk posture in motion. *Applied Ergonomics*, 38(6):697–712.
- Plamondon, A., Gagnon, M., and Desjardins, P. (1996). Validation of two 3-d segment models to calculate the net reaction forces and moments at the l5/s1 joint in lifting. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 11(2):101–110.
- Plamondon, A., Lariviere, C., Denis, D., Mecheri, H., and Natasia, I. (2017). Difference between male and female workers lifting the same relative load when palletizing boxes. *Applied Ergonomics*, 60:93–102.
- Pons, J. L. (2008). *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Potvin, J. R., Norman, R. W., and McGill, S. M. (1996). Mechanically corrected emg for the continuous estimation of erector spinae muscle loading during repetitive lifting. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 74:119–132.
- Pratt, J. E., Krupp, B. T., Morse, C. J., and Collins, S. H. (2004). The roboknee: an exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, volume 3, pages 2430–2435 Vol.3.

- Robert-Lachaine, X., Mecheri, H., Larue, C., and Plamondon, A. (2017). Validation of inertial measurement units with an optoelectronic system for whole-body motion analysis. *Med Biol Eng Comput*, 55(4):609–619.
- Roetenberg, D., Luinge, H. J., and Slycke, P. (2013). Xsens mvn: 6DOF Human motion tracking using miniature inertial sensors. Xsens Technologies B.V. pages 1–5.
- Ronsse, R., Lenzi, T., Vitiello, N., Koopman, B., van Asseldonk, E., De Rossi, S. M. M., van den Kieboom, J., van der Kooij, H., Carrozza, M. C., and IJspeert, A. J. (2011). Oscillator-based assistance of cyclical movements: model-based and model-free approaches. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 49(10):1173–1185.
- Rosen, J., Brand, M., Fuchs, M. B., and Arcan, M. (2001). A myosignal-based powered exoskeleton system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 31(3):210–222.
- Rouhani, H., Favre, J., Crevoisier, X., and Aminian, K. (2010). Ambulatory assessment of 3d ground reaction force using plantar pressure distribution. *Gait Posture*, 32(3):311–6.
- Ruiz Garate, V., Parri, A., Yan, T., Munih, M., Molino Lova, R., Vitiello, N., and Ronsse, R. (2017). Experimental validation of motor primitive-based control for leg exoskeletons during continuous multi-locomotion tasks. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 11:15.
- Saccares, L., Brygo, A., Sarakoglou, I., and Tsagarakis, N. G. (2017). A novel human effort estimation method for knee assistive exoskeletons. In *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, pages 1266–1272.
- Schepers, H. M., Koopman, H. F. J. M., and Veltink, P. H. (2007). Ambulatory assessment of ankle and foot dynamics. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 54:895–902.
- Schiele, A. (2009). Ergonomics of exoskeletons: Subjective performance metrics. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 480–485.
- Schiele, A. and van der Helm, F. C. T. (2006). Kinematic design to improve ergonomics in human machine interaction. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 14(4):456–469.
- Schoenfisch, A. L., Lipscomb, H. J., Pompeii, L. A., Myers, D. J., and Dement, J. M. (2013). Musculoskeletal injuries among hospital patient care staff before and after implementation of patient lift and transfer equipment. *Scand J Work Environ Health*, 39(1):27–36.
- Schorsch, J. F., Keemink, A. Q. L., Stienen, A. H. A., van der Helm, F. C. T., and Abbink, D. A. (2014). A novel self-aligning mechanism to decouple force and torques for a planar exoskeleton joint. *Mechanical Sciences*, 5(2):29–35.
- Seidler, A., Bergmann, A., Jäger, M., Ellegast, R., Ditchen, D., Elsner, G., Grifka, J., Haerting, J., Hofmann, F., Linhardt, O., Luttmann, A., Michaelis, M., Petereit-Haack, G., Schumann, B., and Bolm-Audorff, U. (2009). Cumulative occupational lumbar load

- and lumbar disc disease—results of a german multi-center case-control study (epilift). *BMC Musculoskelet Disord.*, 7:10–48.
- Seidler, A., Euler, U., Bolm-Audorff, U., Ellegast, R., Grifka, J., Haerting, J., Jäger, M., Michaelis, M., and Kuss, O. (2011). Physical workload and accelerated occurrence of lumbar spine diseases: risk and rate advancement periods in a german multicenter case-control study. *Scand J Work Environ Health.*, 37(1):30–35.
- Solomonow, M. (2012). Neuromuscular manifestations of viscoelastic tissue degradation following high and low risk repetitive lumbar flexion. *Journal of Electromyography and Kinesiology* ., 22(2):155–229.
- Solomonow, M., Baratta, R. V., Zhou, B. H., Burger, E., Zieske, A., and Gedalia, A. (2003). Muscular dysfunction elicited by creep of lumbar viscoelastic tissue. *Journal of Electromyography and Kinesiology* ., 13(4):381–96.
- Stadler, K. S., Altenburger, R., Schmidhauser, E., Scherly, D., Ortiz, J., Toxiri, S., Mateos, L., and Masood, J. (2016). *ROBO-MATE an exoskeleton for industrial use - concept and mechanical design*.
- Staudenmann, D., Kingma, I., Stegeman, D. F., and van Dieën, J. H. (2005). Towards optimal multi-channel emg electrode configurations in muscle force estimation: a high density emg study. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 15(1):1–11.
- Stokes, I. A. F. and Gardner-Morse, M. (1995). Lumbar spine maximum efforts and muscle recruitment patterns predicted by a model with multijoint muscles and joints with stiffness. *Journal of biomechanics*, 28(2):177–186.
- Stokes, I. A. F., Henry, S. M., and Single, R. M. (2003). Surface emg electrodes do not accurately record from lumbar multifidus muscles. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 18(1):9–13.
- Sugar, T., Veneman, J., Hochberg, C., Shourijeh, M. S., Acosta, A., Vazquez-Torres, R., Marinov, B., and Nabeshima, C. (2018). Hip exoskeleton market - review of lift assist wearables.
- SuitX (2018). backx.
- Swain, C. T. V., Pan, F., Owen, P. J., Schmidt, H., and Belavy, D. L. (2019). No consensus on causality of spine postures or physical exposure and low back pain: A systematic review of systematic reviews. *Journal of Biomechanics*, ??(??):??
- Teraguchi, M., Yim, R., Cheung, J. P., and Samartzis, D. (2018). The association of high-intensity zones on MRI and low back pain: a systematic review. *Scoliosis Spinal Disord.*, 17(11):13–22.



- Thiese, M. S., Hegmann, K. T., Wood, E. M., Garg, A., Moore, S. J., Kapellusch, J., Foster, J., and Ott, U. (2014). Prevalence of low back pain by anatomic location and intensity in an occupational population. *BMC musculoskeletal disorders*, 15(1):283.
- Tilley, A. R. (2002). *The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design*. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Toxiri, S., Koopman, A. S., Lazzaroni, M., Ortiz, J., Power, V., de Looze, M. P., O’Sullivan, L., and Caldwell, D. G. (2018). Rationale, implementation and evaluation of assistive strategies for an active back-support exoskeleton. *Frontiers in Robotics and Ai*, 5(53).
- Toxiri, S., Näf, M. B., Lazzaroni, M., Fernandez, J., Sposito, M., Poliero, T., Monica, L., Anastasi, S., Caldwell, D., and Ortiz, J. (2019). Back-support exoskeletons for occupational use: An overview of technological advances and trends. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*.
- Toxiri, S., Ortiz, J., Masood, J., Fernandez, J., Mateos, L. A., and Caldwell, D. G. (2016). A wearable device for reducing spinal loads during lifting tasks: biomechanics and design concepts. In *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE-ROBIO 2015 (Zhuhai)*.
- Toxiri, S., Ortiz, J., Masood, J., Fernández, J., Mateos, L. A., and Caldwell, D. G. (2015). A wearable device for reducing spinal loads during lifting tasks: Biomechanics and design concepts. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pages 2295–2300.
- Tucker, M. R., Olivier, J., Pagel, A., Bleuler, H., Bouri, M., Lambercy, O., Millán, J. R., Riener, R., Vallery, H., and Gassert, R. (2015). Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: a review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 12(1).
- Ulrey, B. L. and Fathallah, F. A. (2013a). Effect of a personal weight transfer device on muscle activities and joint flexions in the stooped posture. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 23(1):195–205.
- Ulrey, B. L. and Fathallah, F. A. (2013b). Subject-specific, whole-body models of the stooped posture with a personal weight transfer device. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 23(1):206–15.
- van Dieën, J. H., Hoozemans, M. J. M., and Toussaint, H. M. (1999a). How to lift a box that is too large to fit between the knees. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 14:685–696.
- van Dieën, J. H., Weinans, H., and Toussaint, H. M. (1999b). Fractures of the lumbar vertebral endplate in the etiology of low back pain: a hypothesis on the causative role of spinal compression in aspecific low back pain. *Med Hypotheses*, 53(3):246–52.
- van Dieën, J. H. (1997). Are recruitment patterns of the trunk musculature compatible with a synergy based on the maximization of endurance? *Journal of Biomechanics*, 30(11-12):1095–100.

- van Dieën, J. H. and Kingma, I. (2005). Effects of antagonistic co-contraction on differences between electromyography based and optimization based estimates of spinal forces. *Ergonomics*, 48(4):411–26.
- van Tulder, M. W., Assendelft, W. J., Koes, B. W., and Bouter, L. M. (1997). Spinal radiographic findings and nonspecific low back pain. a systematic review of observational studies. *Spine*, 17(11):13–22.
- van Zandwijk, J. (1998). The dynamics of muscle force development: An experimental and simulation study of the behaviour of human skeletal muscles (phd thesis). *VU University, Amsterdam*.
- Vanderborght, B., Tsagarakis, N. G., Van Ham, R., Thorson, I., and Caldwell, D. G. (2011). Macepa 2.0: compliant actuator used for energy efficient hopping robot chobino1d. *Autonomous Robots*, 31(1):55.
- Veltink, P. H., Liedtke, C., Droog, E., and van der Kooij, H. (2005). Ambulatory measurement of ground reaction forces. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 13:423–427.
- Volksgezondheidszorg.info (2019a). Prevalentie nek- en rugklachten naar leeftijd en geslacht in de huisartsenpraktijk.
- Volksgezondheidszorg.info (2019b). Verwachte stijging aantal mensen met nek- en rugklachten door alleen demografie.
- Volksgezondheidszorg.info (2019c). Zorguitgaven nek- en rugklachten naar sector.
- Wang, Y., Videman, T., and Battie, M. C. (2012). Lumbar vertebral endplate lesions: prevalence, classification, and association with age. *Spine*, 37(17):1432–1440.
- Waters, T. R., Putz-Anderson, V., and Garg, A. (1994). Applications manual for the revised niosh lifting equation. *Cincinnati, OH: Center for Disease Control and Prevention*.
- Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A., and Fine, L. J. (1993). Revised niosh equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics*, 36(7):749–76.
- Wehner, M. (2012). Man to machine, applications in electromyography. In *EMG Methods for Evaluating Muscle and Nerve Function*, pages 416–421. IntechOpen.
- Wehner, M., Rempel, D., and Kazerooni, H. (2009). Lower extremity exoskeleton reduces back forces in lifting. In *ASME 2009 Dynamic Systems and Control Conference*, volume 2, pages 49–56.
- Woittiez, R. D., Huijing, P. A., Boom, H. B., and Rozendal, R. H. (1984). A three-dimensional muscle model: a quantified relation between form and function of skeletal muscles. *J Morphol*, 182:95–113.
- Yan, T., Cempini, M., Oddo, C. M., and Vitiello, N. (2015). Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons. *Rob. Auton. Syst.*, 64:120–136.

- Young, A. J. and Ferris, D. P. (2017). State of the art and future directions for lower limb robotic exoskeletons. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 25(2):171–182.
- Young, A. J., Gannon, H., and Ferris, D. P. (2017). A biomechanical comparison of proportional electromyography control to biological torque control using a powered hip exoskeleton. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 30:5–37.
- Zatsiorsky, V. M. (2002). *Kinetics of human motion*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Zatsiorsky, V. M., Seluyanow, V. N., and Chugunova, L. G. (1990). Methods of determining mass-inertial characteristics of human body segments. In: G. G. chemyi, & S. A. Regirer. *Contemporary problems of biomechanics*, pages 272–291.
- Zhang, H., Kadrolkar, A., and Sup, Frank C., I. (2016). Design and preliminary evaluation of a passive spine exoskeleton. *Journal of Medical Devices*, 10(1).

# Samenvatting

## Biomechanische evaluatie van exoskeletten voor de preventie van lage rugklachten

Tillen is een belangrijke activiteit voor veel mensen, of dat nu is voor bijvoorbeeld het tillen van een kind, een krat bier of dozen in een magazijn. Het is de vraag hoe veilig deze activiteiten zijn voor de rug. In de literatuur bestaat er consensus over een sterke evidentie voor de relatie tussen veelvuldig tillen en het ontwikkelen van lage rugklachten. Het lijkt dan ook waarschijnlijk dat tillen kan leiden tot overbelasting van de wervelkolom. Dit proefschrift richt zich op de ontwikkeling en evaluatie van exoskeletten die als doel hebben rugbelasting te verlagen. Het onderzoek waarop dit proefschrift berust, vond plaats binnen het Europese SPEXOR-project.

Om een exoskelet adequaat aan te sturen, moet de belasting op de lage rug worden gemeten. In de eerste twee Hoofdstukken werd daarom de accuraatheid van een ambulant systeem om de belasting op de lage rug te meten, onderzocht. In **Hoofdstuk 2** werd een ambulant meetsysteem, bestaande uit krachtschoenen en inertieële sensoren, gebruikt om handkrachten tijdens het tillen te schatten. De fouten in de schattingen waren laag (10-15 N RMSD), waarbij ongeveer 30% van de fout was toe te schrijven aan het gebruik van het ambulante meetsysteem. In **Hoofdstuk 3** werden de geschatte handkrachten gebruikt in de berekening van het L5-S1 flexie/extensie moment volgens een 'top-down' benadering tijdens symmetrisch tillen. In deze studie werd de grondreactiekracht niet gemeten met ambulante krachtschoenen, maar met behulp van krachtenplatformen die vaak in een laboratoriumopstelling worden gebruikt. Daarnaast werd in deze studie ook onderzocht wat het minimale aantal inertieële sensoren is, dat nodig is voor een accurate schatting van het L5-S1 flexie/extensie moment. Tenslotte werd onderzocht wat de invloed was van het negeren van de horizontale component van de grondreactiekracht. Dit alles was nodig om de praktische bruikbaarheid

van het ambulante meetsysteem te optimaliseren door de benodigde hoeveelheid sensoren te minimaliseren. De resultaten lieten zien dat met slechts zes sensoren (bekken, romp, bovenarmen en onderarmen) en met alleen de verticale component van de grondreactiekracht, de fout in de schatting van het L5-S1 flexie/extensie moment onder de 18 Nm bleef. De L5-S1 moment schattingen zouden verder verbeterd kunnen worden door de schoudertranslatie beter te meten. Het feit dat de horizontale component van de grondreactiekracht weggelaten kon worden, maakt het mogelijk om in de toekomst gebruik te maken van sensoren in schoeisel in plaats van de dure en zware krachtschoenen die in **Hoofdstuk 2** werden gebruikt. Deze sensoren zijn namelijk niet in staat om accuraat de horizontale component van de grondreactiekracht te meten.

In de **Hoofdstukken 4-7**, werd gefocust op passieve exoskeletten die zijn ontwikkeld om de rugbelasting te verminderen en zo het risico op lage rugklachten te verkleinen. In **Hoofdstuk 4** werd het effect op de rugbelasting onderzocht bij gebruik van een commercieel beschikbaar exoskelet bij statisch vooroverbuigen op vijf verschillende handhoogtes. Twee versies (LOW-HIGH) van hetzelfde exoskelet, verschillend in de moment-hoek relatie, werden getest. L5-S1 momenten gegenereerd door de proefpersoon werden substantieel verlaagd (15-20% voor de meest effectieve versie) bij alle handhoogtes. Significante reducties (11-57%) in rugspieractiviteit werden gevonden in de conditie met het exoskelet vergeleken met de conditie zonder exoskelet. Echter, EMG-reducties varieerden sterk tussen proefpersonen en waren niet voor alle hoogtes significant. Met het exoskelet was er een kleine toename van lumbale buiging, wat ertoe leidde dat een aantal proefpersonen het flexie-relaxatie fenomeen lieten zien, het fenomeen dat de rugspieren bij maximale flexie niet meer actief zijn omdat passieve structuren de benodigde momenten leveren. Dit voorkwam verdere afname in rugspieractiviteit en leidde zelfs tot een toename in buikspieractiviteit bij de lage handhoogtes. In **Hoofdstuk 5** werd hetzelfde exoskelet gebruikt als in **Hoofdstuk 4** maar nu tijdens het tillen van een gewicht van 10 kg van enkel- en kniehoogte van twee verschillende horizontale afstanden. In dit experiment werden ook de compressiekrachten op het L5-S1 gewricht berekend. De piek van de L5-S1 compressiekracht was verlaagd met ongeveer 5-10% bij het tillen van lasten die verder van het lichaam af lagen vanaf enkel- en kniehoogte. Met het exoskelet pasten proefpersonen hun tiltechniek aan. Dit resulteerde in een 17% lagere piek van de romp hoeksnelheid en 5° toename in lumbale flexie, voornamelijk bij tillen van enkel hoogte. In **Hoofdstuk 6** wordt een nieuw

passief rompexoskelet, ontwikkeld binnen het SPEXOR-project, beschreven. Het exoskelet bevat een aantal nieuwe elementen zoals buigbare carbonstaven langs de rug, glijders en mechanismen om fouten in de uitlijning met gewrichten in het lichaam te compenseren. Deze elementen zijn bedoeld om de bruikbaarheid van het exoskelet te verbeteren. Zowel de biomechanische als de functionele aspecten van het exoskelet werden onderzocht. Vergeleken met exoskeletten met een rigide rompstructuur, zorgde het huidige exoskelet met de buigbare staven voor een toename van 25% in de bewegingsvrijheid van de romp in het sagittale vlak. Vragenlijsten lieten zien dat proefpersonen het exoskelet als minder hinderend ervaren in bijna alle functionele taken in vergelijking met het exoskelet dat getest werd in de **Hoofdstukken 4 & 5**. In **Hoofdstuk 7** werd het nieuwe rompexoskelet, net als het exoskelet beschreven in **Hoofdstukken 4 & 5**, biomechanisch getest tijdens statisch buigen en tillen met verschillende tiltechnieken. Tijdens statisch buigen namen de compressiekrachten af met 13-21% bij gebruik van het exoskelet, afhankelijk van de handhoogte. Een ander positief effect als gevolg van het gebruik van het exoskelet was de afname in lumbale piek flexie. Tijdens het tillen werd een gemiddelde afname van 14% in piek compressiekrachten gevonden. De tiltechniek had geen invloed op de mate van ondersteuning van het exoskelet zodat de afname in compressiekrachten vergelijkbaar was tussen de verschillende technieken.

In **Hoofdstukken 8 & 9** werd de focus verlegd naar het gebruik van actieve rompexoskeletten om de rugbelasting te verminderen. **Hoofdstuk 8** richtte zich op de vraag hoe een actief exoskelet dient te worden aangestuurd. Een analyse van de biomechanica van het tillen leidde tot twee sleutelfactoren die grotendeels de rugbelasting bepalen: de flexie van de romp en de eventueel getilde massa. Voor beide factoren werd een sturingsstrategie voor het exoskelet ontworpen. De eerste sturingsstrategie was gebaseerd op de houding, waarbij het door het exoskelet geleverde moment werd aangepast op basis van de inclinatie van de romp. De inclinatie van de romp is direct gerelateerd aan het moment op de rug als gevolg van de zwaartekracht die op de romp werkt. De tweede sturingsstrategie was gebaseerd op de handkrachten die nodig zijn om een last te tillen. Dit werd gedetecteerd middels EMG van de onderarmspiieren. Een derde sturingsstrategie bestaande uit een combinatie van de vorige twee sturingsstrategieën werd ook onderzocht. De resultaten lieten zien dat de sturingsstrategieën werkten zoals bedoeld. Met andere woorden, het geleverde moment werd aangepast op basis van de inclinatie van de romp en op basis van de EMG-activiteit van de onderarmen.

Daarnaast liet het experiment een afname zien in rugspieractiviteit van ongeveer 30% door het gebruik van het exoskelet, onafhankelijk van de gebruikte sturingsstrategie. In **Hoofdstuk 9** werd een meer uitgebreide analyse op de data van het experiment uit **Hoofdstuk 8** uitgevoerd. Tijdreeksen van de L5-S1 compressiekrachten werden geanalyseerd om te onderzoeken welke van de sturingsstrategieën het meest effectief was in het verminderen van de rugbelasting en of dit afhankelijk was van de gebruikte tiltechniek. Piek compressiekrachten waren substantieel verlaagd als gevolg van het exoskelet. Echter, deze afname was voor ongeveer  $\frac{1}{3}$  toe te schrijven aan een afname van 25% in tilsnelheid. Hoewel subtiele verschillen in de tijdreeksen van de compressiekrachten tussen de drie verschillende sturingsstrategieën gevonden werden, was er geen verschil in de piek compressiekrachten tussen deze strategieën. Voor een deel kwam dit door een beperking in de motoren die het moment van het exoskelet leveren. Hierdoor was het niet mogelijk om vast te stellen welke van de drie sturingsstrategieën het meest effectief was. Ondanks deze limitaties verlaagde het exoskelet zowel de piek en cumulatieve compressiekracht met ongeveer 18%.

Samenvattend, het eerste doel van dit proefschrift was het ontwikkelen van een meetsysteem dat geschikt is om accuraat, in real time en ambulant het L5-S1 moment te meten. De conclusie was dat de krachtzolen verder ontwikkeld moeten worden om het meetsysteem in de toekomst geschikt te maken voor gebruik met een exoskelet. Het hoofddoel van dit proefschrift was om een biomechanische evaluatie uit te voeren van verschillende passieve en actieve rompexoskeletten. De **Hoofdstukken 4-9** van dit proefschrift laten veelbelovende resultaten zien met betrekking tot het verlagen van de rugeblasting door het gebruik van exoskeletten tijdens statisch buigen en tillen. Echter, substantiële aanpassingen van de huidige exoskeletten zijn nodig om de bruikbaarheid en gebruiksvriendelijkheid te verbeteren. Zo zouden bijvoorbeeld het gewicht en de afmeting (vooral van de exoskeletten die in **Hoofdstukken 6-9** zijn getest) geoptimaliseerd moeten worden, en zouden de exoskeletten meer ondersteuning moeten bieden. Daarnaast laat dit proefschrift het belang zien van een uitgebreide biomechanische analyse. Evaluaties van exoskeletten die alleen gebaseerd zijn op spieractiviteit kunnen leiden tot verkeerde interpretaties. Het passieve SPEXOR-exoskelet verhielp sommige van de problemen met bestaande exoskeletten met slimme innovaties. Echter, verdere verbeteringen zijn nodig om exoskeletten geaccepteerd te krijgen in het werkveld.

## Dankwoord

Na 4 jaar en een beetje is het dan zover. Wie had er aan het begin van de rit bedacht dat de wereld er nu zo uit zou zien? Door Covid-19 geen openbare verdediging, maar een verdediging via de livestream. Hoe lekker is dat, met je benen omhoog de Koninginnenrit van de Tour de France (lees: mijn verdediging) aanschouwen? Zo zie je maar weer, de Tour wacht op niemand! Ondanks deze gekke tijden ben ik blij dat ik mijn promotietraject nu kan afronden en met frisse benen kan beginnen aan mijn nieuwe baan als data-analist bij de Sociale Verzekeringsbank.

*De kopgroep.* De kopgroep bestaande uit Jaap van Dieën, Michiel de Looze en Idsart Kingma trokken al vroeg in de aanval. Zij wezen mij de weg en besloten of we links of rechts gingen. **Jaap**, gekenmerkt door zijn overzicht, wist altijd hoeveel voorsprong de kopgroep had en of er versnelt of getemporiseerd moest worden. Daarnaast is hij razendsnel in de afwerking. Manuscripten werden in een korte, maar hevige krachtsexplosie van commentaar voorzien. Na de koers was jij altijd in voor een babbel met de daarbij behorende herstelshake (lees: bier). Jaap traint veel, heel erg veel, dik boven de 40 uur in de week. Maar wat mij het meeste in jou aanspreekt is je koersinstelling. Als kopman van een grote ploeg (afdelingshoofd) ben je toch in staat om de koers soms los te laten en te genieten van de andere dingen in het leven. Jaap, bedankt voor al je harde werk in de kopgroep, zonder jouw richtingsgevoel waren we nog lang niet op de Champs-Élysées geweest. **Michiel**, als ervaren koerskapitein toch een plek in de kopgroep. Met ervaring in exoskeletten en Europese projecten was jij een belangrijke schakel. Nog voordat de koers ook maar begonnen was, had jij ons al gewezen op de lastige knelpunten en steile beklimmingen in het parcours. Dankzij jou waren we op de belangrijke momenten scherp. Daarnaast hield jij altijd in de gaten of we niet te veel in koerstermen praatten en of de buitenwereld ons koersverslag wel kon volgen. **Idsart**, de echte motor van de kopgroep. De man die het meeste werk verzette en niet



te beroerd is om iemand anders uit de wind te houden. Dagelijks begeleider was in jouw geval vrij letterlijk, of dat nu was via Skype of op de VU, je maakte tijd. Daarnaast was je altijd benieuwd naar de data en mijn geleverde trainingsarbeid. Samen hebben we heel wat MATLAB-figuren bekeken en gelukkig konden we samen vrijwel altijd een goede interpretatie geven aan de gevonden resultaten. Je hebt je verantwoordelijk gevoeld voor de voortgang van mijn promotie in het grotere SPEXOR-project en daardoor is dit zeker geen gestolen overwinning. Dankzij jouw inzet hebben we relatief eenvoudig 5 overwinningen (eerste auteursartikelen) weten binnen te slepen. Manoeuvreren in een nerveus peloton was voor jouw geen enkel probleem, behendig bewoog jij je door het peloton en suste je onderweg nog wat kleine akkefietjes. Bedankt voor al je hulp, dankzij jou was dit een fietstocht met de wind in de rug.

*Het peloton.* Leren fietsen heb ik mogen doen op de **afdeling Bewegingswetenschappen**. Hier leerde ik alle vaardigheden die ik later nodig bleek te hebben bij het succesvol afronden van mijn PhD. Na bijna 10 jaar verlaat ik nu deze fijne ploeg. Bedankt voor de prettige en open werksfeer.

Speciaal wil ik **Maarten, Knoek** en **Dinant** bedanken voor het vormen van mijn wetenschappelijke ik. Ik heb veel van jullie mogen leren en kijk met een zeer goed gevoel terug op mijn minor en researchmastertijd. Hopelijk spreken we elkaar nog eens langs de ijsbaan, op een zeilboot of zomaar. **Koen** met je Franse achternaam, ik heb jou leren kennen tijdens mijn miniproject als onderdeel van de minor BWSB. Geen fietser maar een gekke turner aan de rekstok die ik moest modelleren. Zonder jou als kapitein waren we niet ver gekomen. Gelukkig gold hetzelfde voor jou als we gingen varen op de boot van Knoek of op je eigen boot waar de rollen omgedraaid waren en ik toch eigenlijk altijd de kapitein was (niet verder vertellen aan Knoek).

**Mede-promovendi**, samen fietsen in een peloton scheidt een band. Wanneer er iemand lek reed, was er altijd wel iemand anders met een pomp en een plakker. Ondanks dat ik alleen maar wat aflopers heb gehad en nooit echt lek heb gereden, gaf mij dit toch een onbezorgd en fijn gevoel. Samen reden we hetzelfde parcours en hielden we elkaar uit de wind. Ook al kon ik niet altijd bij de ravitaillering (lunch) en bij iedere tweedaagse (PhD-weekend) zijn, ik heb het contact met jullie als prettig ervaren.

**A625**, daar rook het als thuis, of rook het gewoon altijd naar koffie? Wat een goede keus was dat, ons eigen koffiemachientje. Toch knap dat die het zolang heeft volgehouden zonder ook maar een keer te verzaken. Dit heeft meerdere malen een hongerklop voorkomen. **Jennifer**, wat fijn dat jij die koffie altijd zette en op de juiste momenten uitdeelde. In de koers heet dit een waterdrager, maar gelukkig bracht jij koffie. Samen met **Roel** zijn we gelijk van start gegaan in deze kamer en hebben we lief en leed gedeeld. Zoals bijvoorbeeld de bruiloft van Roel waar we samen met **Sabrina**, **Dirk**, **Nick** en taxichauffeur **Lotte** een onvergetelijke avond hebben gehad. Maar ook minder leuke dingen werden openlijk besproken in deze kamer, en dat is toch ook bijzonder.

**Sjoerd**, **Gert** en **Saskia**, met jullie werkte ik samen in het SPEXOR-project en hebben we toch mooi alle metingen zonder valpartijen laten verlopen. Met de ervaring en stuurmanskunsten van Gert kon dat ook niet anders. Saskia, ondanks onze verschillende projecten, hebben we veel en goed samengewerkt met mooie klasseringen als gevolg. Ik vond het leuk om jullie ook buiten het werk te leren kennen tijdens congressen en de teambesprekingen voor het SPEXOR-project. Zo werd er tussen de verschillende etappes in Pisa, Berlijn, Ljubljana, Duderstadt en Dublin wijn gedronken. Ik heb jullie aanwezigheid als prettig ervaren, bedankt daarvoor.

*De mechaniekers.* Zonder goed verzorgd materiaal kom je nergens en dus wil ik ook graag de mechaniekers van de afdeling Bewegingswetenschappen bedanken. **Vincent**, **Hans**, **Siro**, **Leon** en **Frans-Jozef**, wat was ik soms vervelend als mijn ketting eraf lag of mijn balhoofd gesmeerd moest worden. Custom-made clusterhouders werden in no time bedacht en gefabriceerd. Fijn dat jullie altijd mee dachten en dat we samen tot goede oplossingen zijn gekomen. **Siro**, bedankt voor het repareren van de talloze ledjes die kapot gingen, de volgende ochtend lagen ze dan alweer klaar zodat ik nooit een meting hoefde af te zeggen.

*Het publiek.* Zonder **proefpersonen** geen metingen en dus gaat mijn dank uit naar alle **collega's**, **schaatsploeggenoten** en **vrienden** die mij tijdens deze beklimming een duwtje in de rug hebben gegeven. Ploeggenoten, jullie hadden zelf iets anders verwacht van een experiment van een bewegingswetenschapper, want jullie moesten vooral veel stil staan, en oh ja... wat boxen tillen. Dat laatste bleek toch nog wel

zwaar, en dit leverde soms wat gemopper op als jullie de volgende ochtend tijdens de training ietwat stijve hamstrings hadden.

*De soigneurs.* **Papa** en **mama**, gelukkig is mijn promotietraject soepel verlopen en hebben jullie je dus hopelijk niet zo druk hoeven maken. Mama, bedankt dat het voor jou nooit te veel moeite was om kleine benodigdheden zoals alcohol of scheermesjes te halen als ik die nodig had voor mijn experimenten. Ook al hebben jullie een niet al te grote bijdrage hoeven leveren aan mijn promotietraject, toch ben ik jullie erg dankbaar dat jullie altijd voor mij klaar staan. Jullie volgen mij op de voet of dat nu is bij het schaatsen, fietsen, ons nieuwe huis of werkgerelateerd. Jullie wensen mij succes bij de start, proberen de koers zo goed mogelijk te volgen en staan vervolgens ongeacht het resultaat trots bij de finish. Jullie betrokkenheid waardeer ik. **Anitra**, bedankt dat je het parcours alvast verkend hebt in zowel de studie Bewegingswetenschappen als het promoveren. Fijn dat ik als jouw paraninf alvast kon ervaren hoe het er achter de schermen van een verdediging aan toe gaat.

*Hoofdsoigneur en teammanager.* Zonder teammanager ben je natuurlijk nergens, en dus wil ik ook jou, **Yvette**, bedanken. Ik weet dat je het maar onzin vindt zo'n dankwoord, maar toch hoor je er absoluut in! Als teammanager ken je de uitspraak "de Tour win je in bed" niet, jij schopte mij er altijd uit en vroeg dan of het nou al een keer klaar was. Jouw instelling, vertrouwen en aanmoediging heeft zeker geholpen bij het afronden van mijn proefschrift en het binnen no-time vinden van een leuke nieuwe baan. Daar bleef het niet bij, kijk maar eens naar de voorkant van mijn proefschrift die jij hebt ontworpen. We zijn al bijna tien jaar samen en ik geniet van iedere dag of dat nu samen in de auto naar het werk of de koers is, tijdens het klussen in onze nieuwe stulp in Stompatoren of op de fiets als we aan het bordjes sprinten zijn. Gelukkig laat jij mij altijd winnen, toch? Hoe dan ook, met jou heb ik de hoofdprijs toch al binnen.