

# Video posturography near the limit of stability

## Citation for published version (APA):

El-Kahky, A. M. (1998). *Video posturography near the limit of stability*. Universiteit Maastricht. <https://doi.org/10.26481/dis.19981216ae>

## Document status and date:

Published: 01/01/1998

## DOI:

[10.26481/dis.19981216ae](https://doi.org/10.26481/dis.19981216ae)

## Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

## Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

## 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.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.umlib.nl/taverne-license](http://www.umlib.nl/taverne-license)

## Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[repository@maastrichtuniversity.nl](mailto:repository@maastrichtuniversity.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# Summary

---

The aim of this study was to develop and evaluate a technique for analysis of movement strategies and for quantification of the contributions of three sensory systems towards balance control. An introduction to postural control and quantitative methods for evaluation of the postural control system is given in chapter 1. Upright stance has an enormous significance for the human being, because it frees the hands for productive activity and improves visual orientation. Upright stance and balance in general is regulated by neuromuscular control centres in the brain that depend upon redundant information provided by vestibular, visual and somatosensory input. In the context of balance control, these three sensory systems provide the following information. The vestibular system senses absolute head acceleration and spatial orientation. The visual system detects motion and orientation of the image of the visual surround projected on the retina. The somatosensory system primarily senses the motions of the lower extremities as well as the force exerted by the feet on the support surface. Therefore, body orientation is detected in three different frames of references. Vestibular input is partly referenced to gravity, visual input is referenced to the visual surround and somatosensory input is referenced to an earth based support surface. Absolute orientation to the earth vertical is therefore derived from the vestibular system only, whereas the other senses provide relative orientation references. A balance system abnormality may occur in the three sensory systems mentioned above, in the motor system involved in executing the appropriate musculoskeletal responses and in the associated neuro-muscular and sensory integration centres in the brain. The complexity of the balance system makes localization of any dysequilibrium problem difficult, even if other causes of instability can be ruled out. Therefore, loss of balance control has intensively been studied through quantification of vestibulo-spinal reflexes. Quantification of vestibulo-spinal reflexes is done by measuring either EMG activity of the postural muscles or more often by measuring body sway. Dynamic posturography was introduced about fifteen years ago where sway referenced platforms were applied to reduce or mislead the somatosensory input in a sophisticated and computer controlled way in combination with a sway referenced visual surround. The ultimate goal was isolation of one or more sensory input systems. Dynamic posturography system has become the standard of posturography world-wide, despite some essential drawbacks that has to be considered as a functional test of balance with limited diagnostic capabilities. In chapter 2, two of the basic problems with dynamic posturography are addressed and evaluated by studying postural control in 11 healthy subjects. The first problem concerns the fundamental limitation of the force platform as a measuring device applied in posturography. An alternative technique based upon infrared (IR)-video tracking of five markers fixed to the head, shoulder, hip, knee and ankle was developed to calculate the position of the body centre of gravity (COG); this technique is compared with techniques using a force platform or a single body fixed angular rate sensor. The fundamental question is put forward whether force transducers mounted in platforms are adequate sensors to detect COG position specially when applied in dynamic conditions (vigorous moving subjects or platforms). The second problem concerns the poor reproducibility and low specificity of dynamic posturography: test performance is related to the functional status of the subjects balance system, and the subject's motivation and

interpretation of the test-instruction. "Good" patients appear to perform better than "bad" normal subjects and most subjects show a steady improvement during successive testing (habituation and adaptation). To cope with this problem a technique is introduced to quantify postural control near the limit of stability to force the subject to an optimal performance. We hypothesise that in this way every subject is tested according to the individual abilities and that reproducibility might improve when compared to more static, non individualised or less challenging test conditions.

*Measurement technique.* The output of the three detection systems and a video-recording of the actual body movements were compared in six different body and/or platform movement conditions. The force transducers detect the centre of pressure of the feet, which induces considerable systematic errors in the calculation of the actual body sway at physiological movement frequencies above 0.2 Hz. We conclude that, the value of dynamic posturography using force platforms should be considered in line with the limited accuracy of this method to detect the COG position under dynamic conditions. Application of one single angular rate sensor neither provides an accurate detection of the COG position nor velocity. In contrast, despite some theoretical limitations related to the biomechanical models to be used, we conclude that the video tracking method produced the most accurate and reliable estimate of the COG movement, specially in case of substantial body movements at frequencies above 0.2 Hz.

*Quantification of postural control near the limit of stability.* 11 healthy subjects stood with eyes open on a motor driven platform that rotated around the ankle axis pseudo-randomly. COG position and velocity were real time monitored by means of the video system. During each test the amplitude of the platform movement was maximised automatically as long as the body movement was in accordance with pre-set COG velocity and COG position limits. Four physically active subjects tolerated higher platform amplitudes than three moderately active subjects; the remaining four relatively inactive subjects tolerated only small platform movements. The test score thus correlated well with the subjects own judgement of balance capabilities in daily life in contrast with the findings of the routine stabilometry that showed normal and not-significantly different postural control in all 11 subjects. Reproducibility of the test scores was within 18%. In chapter 3, the new technique is applied in 97 healthy subjects to explore the perturbation effect upon postural control of sway referencing the supporting platform, of sway referencing the visual surround, of closing the eyes, of vibration of the Achilles tendon and chilling the foot soles. Posture control -on average- was maximally affected by closure of the eyes (decrease of performance with about 37%) and by vibration of the Achilles tendons (about 21%). The other perturbation techniques applied were less effective. The combination of vibration and a sway referencing platform was the most effective technique used to disturb the proprioceptive input. The effect of chilling the foot soles (5 minutes) was not very effective; longer cooling was badly appreciated. Combination of perturbation techniques was often more effective but was not merely a linear summation of the effect induced by the techniques applied separately. Combination of closure of the eyes with a sway referenced platform and vibration was the most effective perturbation technique of postural control (56%). The data suggested that vision contributes

*maximum* 37%, proprioception *minimum* 26% and labyrinths *maximum* 44% to postural control in healthy subjects, and that depending on the available sensory information and acquired postural control strategies, weighting factors of the sensory inputs may vary within these margins. However, individual data suggested that the contribution of the sensory inputs toward postural control varies considerably between individuals which might limit the clinical relevance of dynamic posturography. In chapter 4 by means of a double blind placebo-controlled study the new posturography technique is applied to evaluate the effect of habituation to the test conditions in 11 healthy subjects (experiment 1) and to explore the effect of specific balance training upon posture control in 56 other healthy subjects (experiment 2). In the first experiment, subjects were tested three times on one day. In the second experiment, 28 subjects were trained on a balancing bar (training group), while 28 subjects performed a pseudo-training (control group). The results show no significant effect of habituation to the test condition or equipment. Training on the balance bar showed a steady improvement with respect to the balancing abilities on the bar from session to session. The subjects in the 'training' and control group reported no clear change of balance control in daily life activities despite the significant improvement of performance on the balance bar. No effect of balance training was observed upon posture control near the limit of stability as quantified by dynamic posturography. The negative test outcome of dynamic posturography correlated well with the absence of any effect of balance training upon daily life activities but does not correlate with the improvement of performance on the balance bar. We concluded that posturography near the limit of stability is not able to quantify the effect of specific balance training that has no impact on postural control in daily life activities. In contrast, in a previous study, we observed that the test scores obtained by posturography near the limit of stability correlated well with the subjects own judgement of balance capabilities (sports) in daily life. It is suggested, that dynamic posturography primarily evaluates motor control and less spatial orientation and is not suited to evaluate specific balance control as a reflection of spatial orientation abilities. In chapter 5 the new technique is applied in four groups of patients suffering from long lasting persistent vertigo (whiplash syndrome (n=25), Ménière's disease (n=28), acute (n=28) or gradual peripheral function loss (n=26)) with various abnormalities detected by standard vestibular examination and a statolith function test. Posture control -on average- was maximally affected by closure of the eyes and by vibration of the Achilles tendons. The other perturbation techniques applied were less effective. The combination of vibration and a sway referencing platform was the most effective technique used to disturb the proprioceptive input. No consistent typical pattern was observed that could classify the patients with respect to the history or outcome of the standard vestibular examination: the individual data indicated that the contribution of the sensory inputs toward postural control varies considerably between patients and clearly limits the clinical relevance of this type of dynamic posturography. Postural control near the limit of stability was significantly decreased in the majority of chronic whiplash patients with vertigo or balance disorders, as well as patients suffering from Ménière's disease or known with a central compensated peripheral vestibular function loss. About ninety three percent of the

patients could be classified with use of the postural control test, specially when the responses on the conditions with a sway referenced vision, and eyes closed (with and without the sway referenced platform) were taken into account. However, based upon their postural control no discrimination could be made between the four different patient groups. In chapter 6 movement strategies in healthy subjects and dizzy patients (Whiplash and patients with diseases associated with labyrinthine deficits) are investigated by measuring head and body movements in detail with use of the video techniques applied in the new posturography technique. All healthy subjects had on average a similar body sway velocity. Normal subjects seem to be able to control their body sway by relatively slow movements of the limbs, trunk and head, whereas patients need more vigorous movements. All dizzy patients showed significantly more vigorous body movements to maintain the same body sway velocity than healthy subjects, but we observed no significant differences in movement strategy when comparing healthy subjects with dizzy patients. Also, head angular velocities were larger in patients than in healthy subjects pointing to a worse head stabilisation or an active role of head movements in balance control. No indication was found that under the current dynamic conditions a clear ankle or hip strategy is used: the body movements are very complex and all segments are involved in balance control. We therefore suggest to modify the nomenclature of movement strategy to some extent. We suggest to discriminate between a static and a dynamic strategy. In case of a relatively static condition, the COG can be kept within the cone of stability by a static slow strategy which is predominantly achieved by rotation around the ankle (the well known ankle strategy) which does not allow fast corrections but is energy conservative. In contrast, on a soft surface, on a small base of support, on a moving surface, under more challenging conditions, subjects tend to control the COG by using the principle of action and reaction: fast movement of body parts in one direction result in a opposite movement of the body as a whole. This dynamic strategy is reflected in an increase of angular velocities of the ankle, knee, hip and head but is not limited to the "hip strategy". In chapter 7, several aspects of postural control near the limit of stability are discussed in terms of clinical relevance and the new method is critically evaluated. It became more and more evident that postural control strongly depends on the precise context in which it is studied, and that extrapolation of results from one condition to another seldom hold. As a full 6D detection of movements is now technically possible with video-techniques or equivalents, we promote to study in the near future posture in six dimensions accordingly and not only in 4D as has been done mostly. A major conclusion from our study is that with concern to postural control, both movement strategy as well as the use of sensory inputs varies widely from individual to individual and that no typical patterns can be observed in healthy subjects or the patients examined through this work. The current interpretation of all test results point to a limited usefulness of the dynamic posturography below but also near the limit of stability for clinical application. We suggest that it might be better to study the sensory contribution to balance control by creating stimulus conditions which hardly require motor abilities: return from dynamic posturography to stabilometry with emphasis on perception of spatial orientation.



# Samenvatting

---



Het in dit proefschrift beschreven onderzoek beoogt een methode te ontwikkelen en te evalueren voor analyse van de bewegingsstrategieën van het houdingsevenwicht en kwantificatie van de bijdragen van de zintuiglijke informatie aan de houdingscontrole. Hoofdstuk I vormt een inleiding tot diverse aspecten van het klinisch onderzoek van de houdingscontrole. Aangegeven wordt dat het rechtop staan en de houdingsbalans geregeld worden door neuro-musculaire centra in de hersenen op grond van redundante informatie vanuit het vestibulair, visueel en somatosensorisch systeem. Het vestibulair systeem zorgt voor informatie inzake de versnellingen van het hoofd en de absolute stand van het hoofd ten opzichte van de zwaartekracht vector. Het visuele systeem detecteert primair de bewegingen en de oriëntatie van het op het netvlies geprojecteerde beeld. Het somatosensorisch systeem detecteert de stand en de bewegingen van alle lichaamsdelen en de kracht die het lichaam uitoefent op de omgeving (meestal de voeten op de ondergrond). In dit kader gaan we niet in op het feit dat ook andere zintuigsystemen via ruimtelijke oriëntatie invloed op het houdingsevenwicht kunnen uitoefenen (bijv. oriëntatie op geluid). De oriëntatie van het lichaam in de ruimte wordt derhalve voornamelijk in drie referentiekaders bepaald. Het vestibulair systeem detecteert de oriëntatie ten opzichte van de zwaartekracht vector, het visuele systeem detecteert de oriëntatie ten opzichte van de visuele omgeving en het somatosensorische systeem detecteert de oriëntatie ten opzichte van het contactoppervlak van het lichaam met de omgeving. Een functiestoornis in een der drie betrokken zintuigsystemen, in het motorisch apparaat, in de motorische of sensorische integratie centra in de hersenen, kunnen allen leiden tot stoornissen van de houdingscontrole. De complexiteit van het evenwichtsstelsel is zodanig groot dat een lokalisatie van het functieverlies moeilijk is, zelfs indien andere niet vestibulaire oorzaken van de evenwichtsproblemen kunnen worden uitgesloten.

Ongeveer 15 jaar geleden werd de zogenaamde dynamische posturografie geïntroduceerd waarbij het steunvlak of de visuele omgeving de lichaamsbewegingen kunnen volgen (feed back: "sway referenced platform" en "sway refenced visual surround") zodat de somatosensorische en visuele input van het houdingscontrolesysteem gemanipuleerd wordt. Met deze zogenaamde Sensorische Organisation Test (SOT) wordt getracht de bijdrage van visuele, somatosensorische en vestibulaire zintuiglijke informatie aan de houdingscontrole te kwantificeren. Deze SOT vormt wereldwijd de standaard voor kwantificatie van de houdingscontrole, ondanks het feit dat vooral het functionele aspect van de houdingscontrole wordt geanalyseerd en de methode maar een beperkte diagnostische waarde heeft.

In hoofdstuk twee worden twee fundamentele problemen bij de dynamische posturografie onderzocht bij een groep van 11 gezonde proefpersonen. Het eerste probleem betreft de beperking van snelheidssensoren, versnellings- of krachtsensoren aangebracht in platforms of op het subject om een nauwkeurige schatting te maken van de daadwerkelijke lichaamsbewegingen. Het met deze technieken verkregen resultaat wordt vergeleken met de resultaten van metingen van lichaamsbewegingen met behulp van een binnen onze vakgroep zelf ontwikkeld infra-rood videocamera systeem dat de lichaamspositie real time meet op grond van de afbeelding van 5 markers aangebracht op de enkel, knie, heup, romp en het hoofd. De resultaten verkregen met de verschillende meettechnieken onder zes verschillende testcondities werden vergeleken.

Met behulp van krachtopnemers wordt primair het punt van maximale druk onder de voeten bepaald, hetgeen bij lage frequenties nauwkeurig overeenkomt met de bewegingen van het massazwaartepunt van het lichaam, maar bij frequenties boven 0.2 Hz niet meer. We concluderen dat de dynamische posturografie die gebruikmaakt van een krachtenplatform, beperkingen kent die direct gerelateerd zijn aan onnauwkeurigheden van deze methodiek bij de bepaling van de positie en positieveranderingen van het lichaamszwaartepunt (COG) onder dynamische omstandigheden. Toepassing van een enkele snelheidssensor vlakbij het massazwaartepunt levert geen nauwkeurige schatting van de positie en bewegingen van het COG. Vastgesteld werd dat vooral tijdens snelle platform of lichaamsbewegingen, de video techniek de lichaamsbewegingen het meest betrouwbaar weergeeft, en de enige techniek is die de absolute oriëntatie van de verschillende lichaamsdelen kan kwantificeren. De beperkingen van deze techniek ligt vooral in de onnauwkeurigheden en onzekerheden in het gehanteerde biomechanisch model waarmee de positie van markers vertaald wordt in positie en oriëntatie van lichaamsdelen en het massazwaartepunt.

Het tweede probleem dat in hoofdstuk 2 wordt onderzocht betreft de beperkte reproduceerbaarheid en specificiteit van de SOT. Over het algemeen wordt de score van de subjecten bij de SOT primair bepaald door hun functionele status op het moment van onderzoek; de score wordt echter ook beïnvloed door de motivatie en de instructie van de subjecten. "Goede" patiënten kunnen een beter score hebben dan "slechte" gezonde subjecten. Tevens wordt bij opeenvolgende testen de score vaak steeds beter, wijzend op habituatie of adaptatie en resulterend in een aanzienlijke test-retest variabiliteit. Wij hebben in deze studie getracht dit probleem op te lossen door de houdingscontrole te kwantificeren onder condities waar mensen nog net hun evenwicht kunnen bewaren: ieder subject wordt zo gedwongen tot een optimale prestatie, maximaal gebruikmakend maar ook maximaal afhankelijk van alle beschikbare zintuiglijke informatie. We veronderstelden dat deze benadering zou kunnen leiden tot een meting van primair de individuele capaciteiten en dat de reproduceerbaarheid beter zou kunnen zijn dan onder statische minder uitdagende testcondities, waar aandacht, concentratie, instructie en motivatie een belangrijke rol spelen. Bij 11 gezonde proefpersonen (vier fysiek zeer actieve, drie fysiek matig actieve, vier fysiek inactieve) werd deze techniek toegepast en geëvalueerd. De proefpersonen stonden op een pseudo-random motorisch aangedreven platform (rotatie-as gepositioneerd door de enkelgewrichten). De positie en snelheid van het COG werden continue, vrijwel real-time gemeten met het boven vermelde videosysteem. Bij iedere test werd de amplitude van de destabiliserende, pseudorandom platform beweging vergroot zolang de COG snelheid en positie van de proefpersoon zich binnen vooraf ingestelde veilige grenzen bevonden. De vier fysiek zeer actieve proefpersonen tolereerden een grotere platforminstabiliteit dan de drie minder actieve proefpersonen. De vier fysiek inactieve proefpersonen tolereerden slechts een geringe platforminstabiliteit. De test scores correleerden goed met de inschatting die de proefpersonen zelf van de kwaliteit van hun eigen houdingscontrole onder dagelijkse omstandigheden hadden, in tegenstelling tot de routine stabilometrie die geen significante verschillen in lichaamscontrole

aantoonde (body sway velocity en body sway area). De reproduceerbaarheid van de test scores was beter dan 13.2%.

In hoofdstuk 3 wordt deze nieuwe techniek toegepast en geëvalueerd in 97 gezonde proefpersonen, waarbij tevens het effect van verstoring werd onderzocht op de houdingscontrole door een "sway referenced platform" (SRP) of "sway referenced slide projection" (SRS), het sluiten van de ogen (EC), vibratie van de achillespezen (VIB) en koelen van de voetzolen (COL). De houdingscontrole nam het meeste af door het sluiten van de ogen (-37%) en door vibratie (-21%). De andere technieken waren minder effectief. De combinatie van VIB en SRP was het meest effectief om de proprioceptie te verstoren. Het effect van COL was zeer beperkt, mogelijk door een te korte koeltijd (5 min.). Over het algemeen was het effect van een combinatie van de perturbatietechnieken geringer dan de lineaire sommatie van het effect van de afzonderlijke technieken. Combinatie van EC, SRP en VIB was het meest effectief en leidde tot een gemiddelde reductie van circa 57% in houdingscontrole. De data suggereren dat in de huidige stimulus conditie, visuele oriëntatie maximaal 37%, proprioceptie minimaal 26% en de labyrinten maximaal 44% bijdragen aan de houdingscontrole in gezonde proefpersonen, en dat afhankelijk van de beschikbare zintuiglijke informatie en de aangeleerde bewegingsstrategieën, de weegfactoren van deze zintuiglijke inputs tussen deze grenzen zouden kunnen variëren. Echter, de individuele data geven aan dat de bijdrage van de zintuigen aan de houdingscontrole sterk varieert per individu en geen generalisatie toelaat, wijzend op een beperkte klinische relevantie van deze vorm van dynamische posturografie.

In hoofdstuk 4 wordt de nieuwe methodiek beproefd om na te gaan of er verschillen bestaan in houdingscontrole na evenwichtstraining: in een dubbelblind placebo gecontroleerde studie volgden 28 proefpersonen een pseudo-training waar geen effect op de houdingscontrole kon worden verwacht, terwijl 28 proefpersonen de specifieke training op een evenwichtsbalk volgden. Veranderingen in de houdingscontrole werd gemeten met de nieuwe posturografie methode, werden geëvalueerd aan de hand van de prestaties op de evenwichtsbalk zelf, en werden door de proefpersonen zelf geëvalueerd aan de hand van de ervaringen bij normale dagelijkse activiteiten. Om het effect van mogelijke habituatie aan de test condities te bepalen werd de houdingscontrole bij 11 gezonde proefpersonen in drie meet sessies bepaald, met tussenpozen van 1 week. Er kon geen significant habituatie effect worden aangetoond. De specifieke training op de evenwichtsbalk toonde een gestage verbetering van de houdingscontrole op de evenwichtsbalk na iedere trainingssessie. Geen der proefpersonen (controle noch training groep) ervoer een verbetering van de houdingscontrole bij de normale dagelijkse activiteiten. Er werd evenmin enig effect gevonden van training op de houdingscontrole gemeten met dynamische posturografie "near the limit of stability". We concluderen dat de nieuwe posturografie methode niet in staat is het effect van een evenwichtstraining te meten, die geen effect heeft op de houdingscontrole bij reguliere dagelijkse activiteiten. In tegenstelling hiermee, werd in hoofdstuk 3 aangetoond dat de mate van houdingscontrole, gemeten met de nieuwe posturografiemethode, wel correspondeert met het eigen oordeel van de proefpersonen over de kwaliteit van de evenwichtsfunctie onder dagelijkse omstandigheden. Wij interpreteren deze bevindingen als dat dynamische posturografie veeleer primair de

motorische vaardigheden toetst dan het ruimtelijk oriëntatie vermogen noodzakelijk voor een goede houdingscontrole.

In hoofdstuk 5 wordt de nieuwe techniek geëvalueerd bij vier groepen patiënten met langdurige draaiduizeligheid: vijftientig Whiplash patiënten, 28 patiënten lijdend aan de ziekte van Meniere, 28 patiënten met persisterende duizeligheid na een eenmalige acuut opgetreden vertigo aanval en 26 patiënten met persisterende duizeligheid bij een langzaam toenemend vestibulair functieverlies. Bij deze patiënten toonde het vestibulair onderzoek afwijkingen bij de calorisatie, het draaistoelonderzoek en de ocular counterrolling geïnduceerd door lateroflexie. De houdingscontrole nam het meeste af door het sluiten van de ogen en door vibratie van de achillespezen. De andere technieken waren minder effectief. De combinatie van VIB en SRP was het meest effectief om de propriocepsis te verstoren. Bij geen enkele patiënten groep werd een consistent specifiek patroon gevonden dat de patiënten naar klachten of het resultaat van het vestibulair onderzoek kon classificeren. De individuele data geven aan dat net als bij gezonde proefpersonen, de bijdrage van de zintuigen aan de houdingscontrole sterk varieert per individu en geen generalisatie toelaat, wijzend op een beperkte klinische relevantie van deze vorm van dynamische posturografie. Echter, bij alle vier patiënten groepen bleek de houdingscontrole wel significant slechter dan bij gezonde proefpersonen, zowel met als zonder zintuiglijke perturbatie. Discriminant analyse toonde dat gebaseerd op de het resultaat van de test condities SRS, EC, SRS+SRP en EC+SRP, 92% van de patiënten als afwijkend van normaal konden worden geclassificeerd, terwijl alle gezonde proefpersonen als normaal geclassificeerd werden. De discriminantanalyse toonde echter dat de patiënten niet betrouwbaar geclassificeerd konden worden naar de vier onderscheiden patiënten populaties.

In hoofdstuk 6 worden de bewegingsstrategieën geanalyseerd die gebruikt worden voor een goed houdingsevenwicht. Daartoe werden bij zowel gezonde proefpersonen, als bij Whiplash patiënten en patiënten met ziekten passend bij een labyrintair functieverlies hoofd- en lichaamsbewegingen in detail gemeten en geanalyseerd. De gezonde proefpersonen en patiënten bleken gemiddeld allen vergelijkbare snelheden van het massazwaartepunt te hebben, hetgeen op grond van het feed back karakter van de toegepaste methodiek te verwachten was. Echter de gezonde proefpersonen bleken in staat te zijn de positie en snelheid van het COG te controleren door middel van relatief langzame bewegingen van het hoofd, de romp en de ledematen, terwijl de patiënten veel snellere bewegingen van de lichaamsdelen nodig hadden voor controle van het COG. Tevens bleken de hoeksnelheden van het hoofd bij patiënten veel hoger te zijn dan bij de gezonde proefpersonen, hetgeen op een slechtere hoofdstabilisatie of op een actiever rol van hoofdbewegingen bij de houdingscontrole van patiënten wijst.

Behoudens dit verschil in hoofdbewegingen, bleek er echter geen verschil in bewegingsstrategie te bestaan tussen patiënten en gezonde proefpersonen, ongeacht de test conditie: er was geen dominantie van een typische heup-, enkel of andere strategie te zien. De lichaamsbewegingen bleken veel complexer te zijn. We stellen daarom voor in plaats van de veel gebezigde termen "heup- of enkelstrategie" door de termen statische en dynamische strategie te vervangen. Onder relatief statische omstandigheden kan het COG binnen de stabiliteitgrenzen gehouden worden door een

statische strategie waarbij vooral rotatie rond het enkelgewricht plaatsvindt (equivalent aan de "enkelstrategie"). Deze techniek is niet in staat tot snelle houdingscorrecties, maar is energetisch voordelig. Onder dynamische meer complexere omstandigheden, bij een instabiele ondergrond of een klein steunvlak, controleert de mens de positie en snelheid van het COG door middel van het principe van actie en reactie: snelle bewegingen van lichaamsdelen in een richting leiden tot een verplaatsing van het hele lichaam (en het COG) in tegenovergestelde richting. Deze dynamische techniek is snel, maar vergt naast energie ook een relatief grote mate van motorische vaardigheid. Bij deze strategie neemt de snelheid van hoofd, romp en ledematen toe.

In hoofdstuk 7, wordt in een algemene discussie, de in dit proefschrift geïntroduceerde nieuwe techniek kritisch geëvalueerd. Lopende ons onderzoek werden we ons meer en meer bewust van het feit dat de houdingscontrole een fenomeen is dat sterk afhangt van de precieze stimulus condities, en daarmee de context waaronder het evenwicht bewaard moet worden. Daarmee is extrapolatie van de interpretatie van de in deze studie verkregen gegevens naar die verkregen met stabilometrie of dynamische posturografie "in relatieve rust" maar zeer beperkt mogelijk. De in deze studie gebruikte 4D techniek heeft ons inziens te veel beperkingen om voldoende inzicht te geven in de houdingscontrole. Met de inmiddels beschikbare video-technieken en andere technologische ontwikkelingen is een 6D analyse mogelijk waarbij niet alleen de voor-achterwaartse maar ook de zijwaartse lichaamsbewegingen in relatie tot de houdingscontrole zouden kunnen worden bestudeerd.

Op grond van al het bovenstaande komen we tot de conclusie dat de hier gepresenteerde methodiek de houdingscontrole en de invloed van de verschillende zintuigsystemen op de houdingscontrole reproduceerbaar kwantificeert. Een belangrijke conclusie van deze studie is echter wel dat zowel de bewegingsstrategieën toegepast bij de houdingscontrole als de afhankelijkheid van de houdingscontrole van de verschillende zintuigsystemen sterk varieert per individu en dat er over het algemeen geen systematische en typerende verschillen lijken te zijn tussen gezonde mensen en de hier onderzochte patiënten groepen. De conclusie lijkt gerechtvaardigd dat dynamische posturografie, "below" maar ook "near the limit of stability" vooralsnog maar een beperkte klinische relevantie lijkt te hebben. Omdat juist bij dynamische posturografie ook het motorisch controle apparaat een dominante rol speelt bij de mate van houdingscontrole, en een objectiveren van de zintuiglijke bijdrage bemoeilijkt, zal onze research zich in de toekomst primair richten op de bijdrage van de verschillende zintuigsystemen op het ruimtelijk oriëntatie vermogen noodzakelijk voor de houdingscontrole.