

# Pijnbestrijding met meet- en regeltechniek

*De 'blackbox' van een onbegrepen aandoening*

*'Bij doorvragen bleek dat medici de dynamiek achter reflexen in het lichaam niet goed begrijpen'*



Rode gezwollen ledematen die warm of koud aanvoelen, een dof gevoel, niet goed kunnen bewegen en vooral pijn. Dat zijn de symptomen van posttraumatische dystrofie (PD).

In het onderzoeksverband TREND werken allerlei wetenschappers samen om de 'black box' van deze onbegrepen aandoening te openen. Zo benaderen werktuigbouwkundigen van de TU Delft de neurologisch oorzaak van de ziekte vanuit de meet- en regeltechniek.

Ze ontwikkelden drie testopstellingen waarmee ze bij individuele PD patiënten kunnen

vaststellen wat ze mankeren in het centrale zenuwstelsel. In samenwerking met de

Amerikaanse neuroloog David Bashor hebben de Delftenaren voor het eerst een Biologisch

Neuraal Netwerk model met 2300 neuronen gekoppeld aan een spier-skeletmodel. Door in

het model een specifieke verbinding tussen twee typen neuronen te blokkeren, konden de

motorische symptomen van de PD patiënten worden gesimuleerd. Samen met medici uit

vijf academische ziekenhuizen zijn ze nu op zoek naar de onderliggende oorzaak van het

ziektebeeld, dat ook andere symptomen als pijn, huidafwijkingen, maag-darm klachten,

kan verklaren.

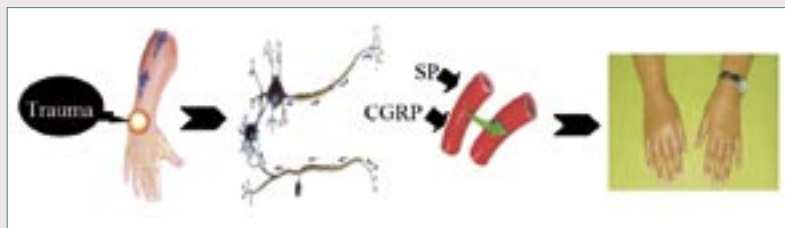


Een patiënt met Post-Traumatische Dystrofie krijgt in het Leids Universitair Medische Centrum via infuus medicijnen toegediend om de pijnlijke effecten van de verkramping enigszins te verlichten.

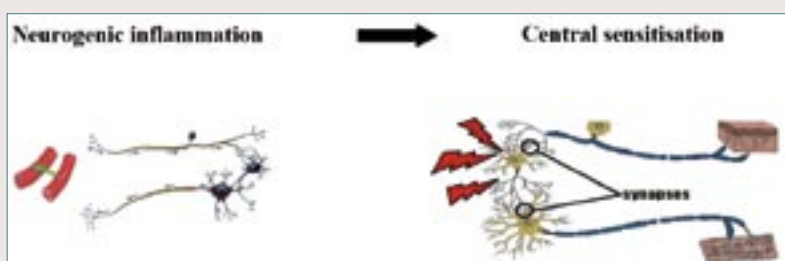
MAARTEN VAN DER SANDEN



Als gevolg van Post-Traumatische Dystrofie kan dystonie (verkramping) ontstaan, waardoor de handen en voeten in een typische klauwstand komen te staan. Dit kan leiden tot ernstige invaliditeit.



Een van de hypothesen omtrent het ontstaan van Post-Traumatische Dystrofie is dat het trauma leidt tot een 'defensieve' actie van bepaalde zenuwvezels, die neuropeptiden (door het lichaam aangemaakte natuurlijke drugs) in de huid afscheiden. Deze neuropeptiden leiden tot ontstekingsreacties, met oedeemvorming en huidverkleuringen tot gevolg.

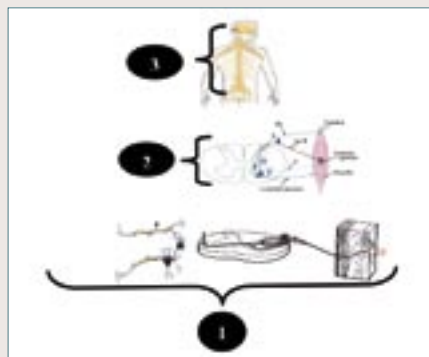


Naast de ontstekingsreacties in de huid leidt Post-Traumatische Dystrofie ook tot veranderingen in het Centrale Zenuwstelsel: Centrale Sensitisatie. Als gevolg hiervan ontstaan waarschijnlijk de heftige pijnreacties en motorische stoornissen.

Deze handen tonen verschillende verschijningsvormen van dystonie bij PD patiënten. Vaak zijn meerdere extremiteiten aangeaan, zoals zowel links als rechts armen en benen.



Dystonie en oedeemvorming in het been.



De werkelijke oorzaak van PD is niet duidelijk en waarschijnlijk zijn er meer oorzaken. Symptomen bij PD patiënten wijzen op de betrokkenheid van zowel perifere als centrale mechanismen. Lokale ontstekingsreacties ontstaan door ontregelde huidzenuwen (1). Motorische afwijkingen in de reflexbanen wijzen op de betrokkenheid van het ruggenmerg (2). Ook in de hersenactiviteit worden afwijkingen gevonden tussen patiënten en gezonde proefpersonen (3).

Mensen met posttraumatische dystrofie hebben veel pijn, vooral in hun handen en voeten. 'Deze vorm van dystrofie ontstaat door een abnormale reactie van het lichaam op bijvoorbeeld een verstuing of een snijwondje (posttraumatisch)', zegt dr. Frank Huygen, anesthesioloog en hoofd van het Pijncentrum van het Erasmus Medisch Centrum in Rotterdam. 'Door deze overreactie raakt het weefsel van de hand of de voet beschadigd met als gevolg pijn, dof gevoel, verkleuring en zwelling.' Verder kan volgens Huygen door het constante pijnsignaal van bijvoorbeeld de hand naar het ruggenmerg, het ruggenmerg overgevoelig raken. Dan gaat het ruggenmerg zelf de pijnsignalen doorgeven ongeacht het signaal van de hand. Door deze overgevoeligheid van het ruggenmerg kan ook in andere delen van het lichaam dystrofie ontstaan. Naast pijn spelen allerlei bewegingsproblemen een rol bij PD: een gevoel van zwakte in de hand en arm of het verkrampen van bijvoorbeeld de hand tot een klauwstand, dystonie genaamd. Ook ongecontroleerd trillen en trekbewegingen zijn mogelijk.

Volgens de Nederlandse Vereniging van Posttraumatische Dystrofie Patiënten krijgen jaarlijks 8.000 mensen deze aandoening en zijn er ten minste 20.000 chronische PD-patiënten. De meeste patiënten ontwikkelen het ziektebeeld als gevolg van een letsel.

In de literatuur worden overigens wel 72 verschillende aandoeningen genoemd die dezelfde symptomen laten zien. Dat is de reden dat het medisch wordt geduid als een syndroom. Het complex aan symptomen staat sinds enige tijd bekend als Complex Regionaal Pijnsyndroom (CRPS).

**Cytokines** 'De ziekte is ernstig invaliderend' zegt Huygen, 'en er is geen concrete behandeling voor handen omdat PD nog niet goed begrepen wordt. Tijd dus om dit syndroom grondig te onderzoeken'

Huygen promoveerde in 2004 aan het Erasmus Medisch Centrum op onderzoek naar de rol van cytokines (signaalstoffen in het lichaam) en de ontsteking van het weefsel van de handen voeten als gevolg van PD. Hij toonde aan dat patiënten te veel signaalvloeistof interleukine-6 en Tumor Necrose Factor  $\alpha$  aanmaken, terwijl dat niet meer nodig is. Interleukines zijn normaal gesproken stoffen die door het lichaam worden aangemaakt om een ontsteking tegen te gaan of juist aan te wakkeren. Maar in het geval van CRPS is het productiesysteem 'op hol geslagen' waardoor juist een ontsteking ontstaat.

Huygen: 'Uit het vocht van de blaren die ik op de huid van patiënten trok op de plek van de ontsteking, hebben we de overvloedige aanwezigheid van interleukine-6 en Tumor Necrose Factor  $\alpha$  kunnen aantonen.' De blaren trok Huygen door lokaal de huid vacuüm te trekken waardoor er een blaas ontstond. 'Dit wetende, hebben we verder gekeken naar een eventuele behandeling met het zogenoemde anti-TNF (Tumor Necrose Factor)', zegt Huygen. Deze stof, die bijvoorbeeld ook helpt tegen reumatische aandoeningen, blijkt te werken. Er is een duidelijke vermindering van de ontsteking te zien. Nu zijn we bezig om in een grote clinical trial te kijken of we deze patiënten kunnen helpen.'

**Delftse inbreng** Hoewel het onderzoek van Huygen en anderen veel betekent voor een eventuele behandeling van patiënten, is er nog veel kennis nodig om (eventueel) te komen tot preventie van CRPS. De onderzoeksactiviteiten van een multidisciplinair Nederlands team moet een en ander nu verder ontsluiten en oplossen. In het team werken mensen van de TU Delft, Leids Universitair Medisch Centrum, Erasmus MC, VU Medisch Centrum, Academisch Ziekenhuis Maastricht, Universiteit Utrecht en bedrijven als Noldus IT en FCS Control Systems samen. Als naam voor het nieuwe onderzoeksconsortium is gekozen voor TREND (Trauma Related Neuronal Dysfunction).

Bij TREND werkt iedereen vanuit zijn eigen discipline aan het probleem. In Leiden is men bijvoorbeeld op zoek naar de genen die bij deze aandoening zijn betrokken. De Technische Universiteit Delft helpt bij de ontwikkeling van nieuwe meetinstrumenten om de symptomen van deze patiënten kwantitatief te kunnen vastleggen. Aan het EMC doet men zoals gezegd onderzoek naar de biochemische werking van de aandoening.

Het TREND-onderzoek aan de TU Delft, onder leiding van prof.dr. Frans van der Helm, is vooral gericht op het ontwikkelen van diagnostische instrumenten. Maar het onderzoek geeft echter ook meer inzicht in het ontstaan van de ziekte en hoe deze te verhelpen is. Men richt zich daarbij vooral op dystonie,

de kramptoestand van de hand of arm. Kennis van meet- en regeltechniek blijkt namelijk uitermate nuttig voor begrip van dystonie.

Van der Helm en zijn groep werken al geruime tijd aan het onderzoek van het menselijk bewegingsapparaat. De groep heeft bijvoorbeeld het Delfts Schouder- en ElleboogModel ontwikkeld. Uit dit model bleek dat de geneeskunde sinds 1900 een verkeerd beeld had van het schoudermechanisme.

[Zie Delft Integraal 91.3]

Van der Helm: 'De schouder, het samenstel van bovenarm, schouderblad en sleutelbeen, kan complexe bewegingen uitvoeren met behulp van een groot aantal spieren. Door de hoge mate van complexiteit van dit gewricht hebben we pas sinds kort enig inzicht in de werking van het schoudergewricht. Deze kennis komt ons goed van pas bij de verbetering van diagnose en behandeling van schouderklachten en onderzoek naar bijvoorbeeld rolstoelvoortbeweging en het ontwerp van schouderprothesen.'

**Reflexen** Van der Helm en zijn onderzoekers Erwin de Vlugt en Alfred Schouten (die beide vorig jaar zijn gepromoveerd) zijn in het bijzonder geïnteresseerd in reflexen van spieren. Vlugt en Schouten zijn nu als postdocs actief binnen TREND en onderzoeken reflexen in samenhang met PD. Reflexbanen in het menselijk lichaam lopen via het ruggenmerg en worden niet 'doorgeschakeld' naar de hersenen, waar een beweging bewust kan worden gestuurd. Een bekende reflex is het snel terugtrekken van de hand wanneer men de vingers brandt. Het signaal van de te hoge warmte wordt gevoeld via de vinger en direct worden de spieren in de arm aangespannen via het ruggenmerg om de hand terug te trekken om verdere verbranding van de vinger te voorkomen. Reflexbanen maken deel uit van het neuromusculaire systeem van de mens.

De spieren zelf bevatten de zogenoemde proprio-receptoren. Deze sensoren in de spier geven informatie door aan het centrale zenuwstelsel over de stand van de spieren, maar ook over de contractiesnelheid, de snelheid waarmee de spieren samentrekken en de spierkracht waarmee dat gebeurt. Daardoor kun je nauwkeuriger bewegen en bijvoorbeeld een boormachine op zijn plaats houden, ondanks de versturende krachten van de draaiende boor. Wanneer je de boor bewust zou willen corrigeren, zou je altijd te laat zijn. Doordat het lichaam gebruik maakt van de onbewuste, snelle reflexen kunnen mensen de verstoringen weggelen.

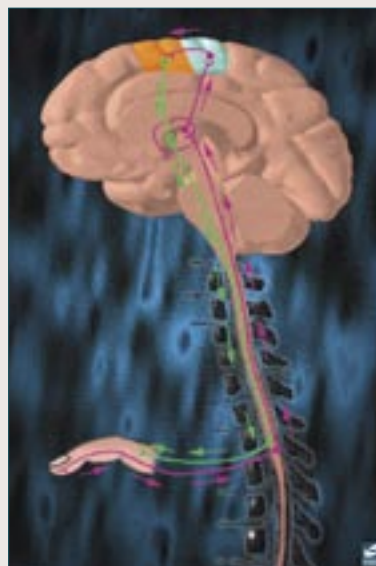
'Alle invloeden samen vormen een zeer interessant regeltechnisch systeem', zegt Van der Helm. 'Je zou als ik uitga van mijn eigen praktijk, de werktuigbouwkunde, bijvoorbeeld ook geen robot ontwikkelen zonder terugkoppeling met sensoren en een regelaar. Ook in een robot zijn er 'reflexbanen' die feedback geven over de bewegingen en met name over de verstoringen van deze bewegingen. Het technisch model de robot, kan dus uiteindelijk ook weer dienen als testcase voor de menselijke situatie.'

**Demping** Afgezien van de werking van de reflexbanen, worden veel verstoringen op de hand ook opgevangen door de stijfheid van het bot en het weefsel. Van der Helm: 'Dit kun je meer zien als de intrinsieke waarden, de dynamische mechanische eigenschappen, van de hand en de arm. Het gaat dan om parameters als de massa van de arm, de demping door het weefsel en de stijfheid van de spieren. De manier waarop de reflexen gemoduleerd worden, hangt voor een deel van deze set van parameters af.'

In een wetenschappelijk artikel voor het *Journal of Neuroscience Methods* toont Van der Helm verder aan dat ook zaken als frequentie van de verstoringen een rol spelen in de manier waarop reflexen worden aangepast om de verstoringen zo veel mogelijk te neutraliseren. In het artikel spreken de Delftse onderzoekers over verstoringen met een (relatief) hoge frequentie en met een (relatief) lage frequentie.

De onderzoekers hebben bij reflexbewegingen dus te maken met drie factoren: de aard van de verstoringen van de arm (zoals de frequentie), de intrinsieke eigenschappen (zoals de massa, de stijfheid en de demping van de spieren) van de hand en de arm, en de werking van de reflexbanen.

Van der Helm: 'Dat betekent dus dat we het hebben over regelen en meten op meerdere niveaus. Dat is op zich niet iets nieuws voor meet- en regeltechniek op zich, maar wel als we deze kennis gebruiken om te achterhalen hoe dystonie



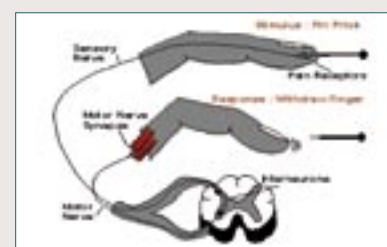
Ook de temperatuurregulatie door het centrale zenuwstelsel is aangedaan bij PD patiënten. In het Erasmus Medisch Centrum Rotterdam wordt met de huidtemperatuur (een symptoom) objectief gemeten met infrarood-camera's.

Patiënten met PD hebben waarschijnlijk een genetische aanleg voor het ontstaan van de ziekte, waardoor soms een heel klein trauma, zoals een wondje aan de hand, leidt tot een kettingreactie van ontregelde perifere en centrale mechanismen. Een van de typerende symptomen is de heftige pijn, die komt door overgevoelige reacties in het ruggenmerg: centrale sensitatie.



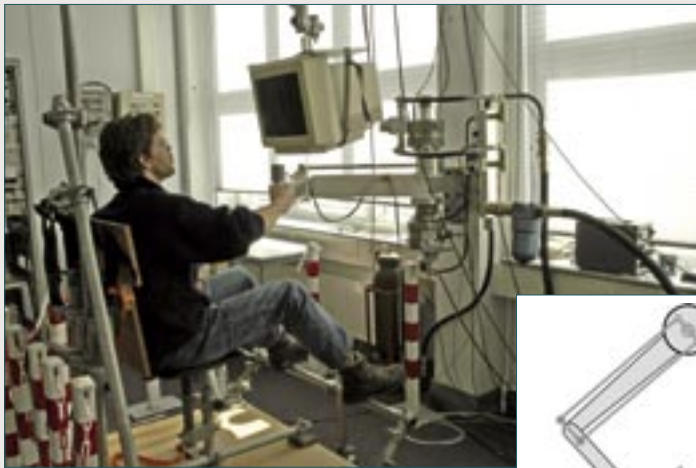
In het Erasmus Medische Centrum wordt bij PD-patiënten met vacuüm blaren getrokken, zodat er vocht aan worden onttrokken. Het blaarvocht wordt bij het Utrechts Medisch Centrum gescreend op honderden verschillende eiwitten die een biomarker zouden kunnen zijn die eenduidig de aanwezigheid van PD zouden kunnen vaststellen.

Motorische symptomen zoals dystonie (verkramping) ontstaan door afwijkingen in de reflexbanen in het ruggenmerg. Door de keten van sensor (spierspoelen), regelaar (centrale zenuwstelsel) en actuator (spier) te meten, kunnen Delftse onderzoekers de afwijkingen in de neuronen in het ruggenmerg in kaart brengen.

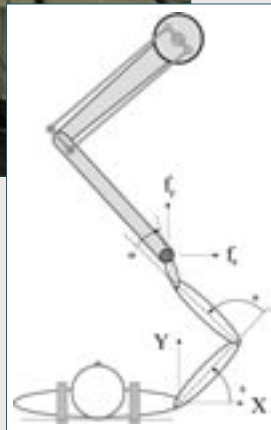


Bij het Schouderlab van de TU Delft zijn zeer krachtige hydraulische manipulatoren ontwikkeld, waarmee ze als enige onderzoeksgroep ter

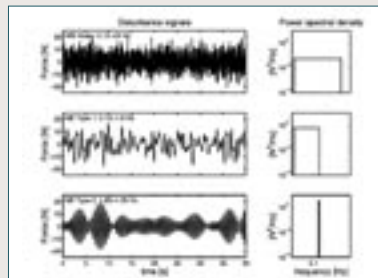
wereld in staat zijn om hoogfrequente krachtverstoringen op te leggen. Hierdoor kan de sterkte van de positie-, snelheids- en krachtterugkoppelbanen worden berekend. Met de 1-vrijheidsgraad manipulator wordt een stang met handvat heen en weer bewogen. Een PD-patiënt wordt gevraagd om het handvat op zijn plaats te houden, terwijl er krachtverstoringen op het handvat worden aangebracht. Dit is een zeer natuurlijke taak ("hou je hand op zijn plaats"). De arm verstijft doordat spieren aanspannen (co-contractie) en door de natuurlijke reflexen. Reflexbanen zijn gesloten terugkoppelbanen, die normaliter dienen om verstoringen van de handpositie tegen te gaan. Er kan alleen nauwkeurig binnen de terugkoppelbaan worden gemeten door verstoringen met een bekend patroon op de arm aan te brengen. De reacties op de verstoringen kunnen gemeten worden door de handkracht, handpositie en elektrische activiteit van de spieren te meten.



Met de nieuwe 2-vrijheidsgraden manipulator kan het handvat in een horizontaal vlak verplaatst worden. Hiermee kunnen tegelijkertijd de spieren rond de schouder, elleboog en pols gemeten worden. Met een geavanceerd model kan per spiergroep de reflexsterkte berekend worden. Met dit apparaat kan de complexe coördinatie tussen gewrichten onderzocht worden, maar ook de reflexsterkten tijdens bewegingen.



Een belangrijk deel van de Delftse onderzoeksmethode is de frequentie van het (kracht)verstoringssignaal. Bij hoogfrequente verstoringen (boven) is het voor de mens minder effectief om reflexen te gebruiken om de verstoringen tegen te gaan. Bij laag-frequente verstoringen (midden) zullen proefpersonen juist wel hun reflexen gebruiken, door de reflexsterkte te vergroten. Heel typerende reacties worden gevonden wanneer de verstoring maar een zeer beperkt aantal frequenties (een bereik van 0,3 Hz) bevat (onder). Dan worden de reflexsterkten geoptimaliseerd, zodat ze alleen in dat kleine frequentiegebiedje effectief zijn. Patiënten met neurologische aandoeningen zoals PD, hersenbloedingen en de Ziekte van Parkinson, zijn veel minder goed in staat om hun reflexen aan te passen. Door deze proeven ontstaat een goed beeld van de aard van hun aandoening.

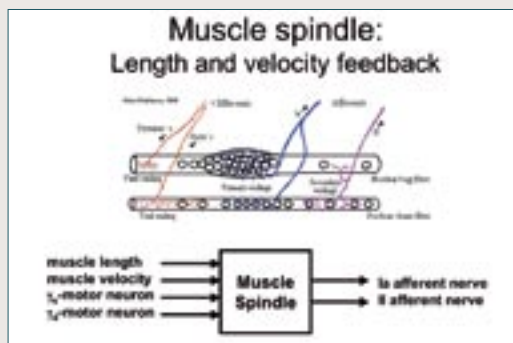


Bij het LUMC in Leiden staat de zogenoemde POIs PERTurbator (POPE) waarmee PD-patiënten worden gemeten. De POPE is een afgeleide van de Delftse meet-opstellingen.

De spierspoel is een vernuftige sensor in de spier, die de spierlengte en de contractiesnelheid meet. De spierspoel is ongeveer 7 millimeter lang, ligt parallel aan de spiervezels

en hecht daar op aan. De spierspoel bestaat uit nuclear bag-vezels, die snelheidsgevoelig zijn, en de nuclear chain-vezels die gevoelig zijn voor de spierlengte. Deze vezels bestaan uit een sensorisch gedeelte in het midden, en zeer kleine spiervezeltjes aan de uiteinden.

De spiervezeltjes in de spierspoel worden apart geactiveerd van de rest van de spier door de  $\gamma$ -motorneuronen. Hierdoor blijft de sensor gevoelig voor een groot bereik van spierlengtes.



als het gevolg van PD ontstaat. Welke neuronen en dus welke spieren worden aangestuurd waardoor de klauwstand van bijvoorbeeld de hand ontstaat?

**Licht** Van der Helm en zijn medewerkers proberen inzicht te krijgen in dit ingewikkelde samenspel van factoren met een meetopstelling waarbij de armbewegingen van proefpersonen (mét of zonder aandoening) gedetailleerd in kaart worden gebracht. De opstelling bestaat uit een hydraulische actuator die een zuiger aandrijft waar een handvat aan vast zit. De proefpersoon zit op een stoel en pakt het handvat beet. Daarbij ligt de onderarm in één horizontale lijn met de bewegingsrichting van de zuiger en het handvat. De kracht die de proefpersoon uitoefent op het handvat wordt gemeten, en door een zeer snel regelcircuit wordt berekend welke positie daarbij hoort. Vervolgens wordt er een willekeurig variërende druk (verstoring) op de zuiger en dus op het handvat gezet, die door de proefpersoon aanvoelen als krachtverstoringen, te vergelijken met een paraplu die je in de wind wil vasthouden.

Aan de proefpersonen wordt vervolgens gevraagd om het handvat zoveel mogelijk in de uitgangspositie te houden, dus stil te houden. De proefpersonen spannen dan al hun spieren aan om de arm te verstijven (co-contractie), maar zullen ook onbewust hun reflexen gaan gebruiken, waardoor de beweging van het handvat wordt tegengewerkt. De kracht die de proefpersonen hiervoor uit moeten oefenen en de positie van het handvat worden continu vastgelegd, evenals de uitgeoefende druk vanuit de actuator. In een ander experiment wordt aan de deelnemers juist gevraagd om hun arm ontspannen te houden en mee te laten gaan met de opgelegde verstoringen.

Dit hele systeem is te modelleren als een massa-veersysteem met demping, waarbij de reflexen werken als een soort veren en dempers met een tijdsvertraging als gevolg van het transport van de signalen langs de zenuwen. Dit model is zeer goed te analyseren vanuit de inzichten van de meet- en regeltechniek. Het hier beschreven meetproces wordt verder aangevuld met het maken van EMG's (elektromyografie) van proefpersonen tijdens het stilhouden van het handvat. Hiermee wordt de (elektrische) spieractiviteit bij verschillende belastingen in kaart gebracht.

Door al deze gegevens, die bovendien zijn verkregen bij verschillende verstoringfrequenties, te combineren en te analyseren met methodes uit de meet- en regeltechniek, kan Van der Helm de invloed van de verschillende reflexbanen en die van de intrinsieke eigenschappen van de arm van elkaar scheiden en in kaart brengen. Ook de invloed van de proprio-receptoren kan er mee worden verduidelijkt. De Delftse groep werktuigbouwers is de eerste in de wereld die in staat is om kwantitatieve gegevens te meten van zowel de positie-, snelheids- als krachtterugkoppelbanen van de armreflex. Omdat de sterkte van de reflexen door de interneuronen (tussenschakelstations) in het centrale zenuwstelsel wordt geregeld, wordt bovendien inzicht verkregen in het functioneren van het centrale zenuwstelsel. In nauwe samenwerking met de afdelingen Neurologie en Revalidatie van het Leids Universitair Medisch Centrum wordt er ook onderzoek gedaan naar patiënten met neurologische afwijkingen, zoals hersenbloedingen en de ziekte van Parkinson.

**ARMANDA** Met de kennis die Van der Helm met dergelijk onderzoek heeft opgedaan, is hij onder meer in staat te bepalen welke spierbewegingen er binnen een bepaalde reflexbaan worden gestimuleerd en welke geremd. Het blijkt bijvoorbeeld aan de hand van metingen aan verstoringen van de beweging dat er bij dystonie als gevolg van PD overregulatie in de reflexbaan van de spier plaatsvindt. De reflexsterkte bepaalt de mate van spieractivatie als gevolg van een verstoring, b.v. plotselinge rek van een spier. Een grote reflexsterkte leidt tot een heftige reactie, een kleine reflexsterkte leidt nauwelijks tot spieractivatie. De reflexsterkte wordt bepaald door signalen uit de hersenen, die interneuronen in het ruggenmerg ongevoeliger maken. Als deze signalen uit de hersenen wegvallen, worden de interneuronen overgevoelig en ontstaan er heftige reflexen, waardoor de spier verkrampd raakt en helemaal niet meer beweegt.

Recent heeft de groep van Van der Helm een nieuw, uitgebreid en verbeterd meetapparaat (ARMANDA) in gebruik genomen dat zelf is ontworpen. Daarmee is de groep nog beter in staat om de reflexbanen te onderzoeken. ARMANDA is bijvoorbeeld geschikt om complexere bewegingen van de schouder, elleboog en pols tegelijkertijd te simuleren en te analyseren. Erwin de Vlugt heeft in zijn proefschrift aangetoond dat met geavanceerde wiskundige methoden het mogelijk is om de reflexen van de mono-articulair schouder-, elleboog

en polsspieren, maar ook van de bi-articulaire spieren die over de schouder-elleboog en elleboog-pols lopen van elkaar te onderscheiden. Dit biedt veel inzicht in de onderlinge coördinatie van spieren. Met ARMANDA kunnen in de toekomst ook de reflexen tijdens bewegingen gemeten worden, waarvan je kunt leren hoe snel mensen kunnen omschakelen van houding naar beweging. Het is bijvoorbeeld bekend dat mensen met Parkinson daar veel moeite mee hebben.

**Gat met klinici** Reflexen worden behoorlijk ingewikkeld gereguleerd in het menselijk lichaam. Van der Helm: ‘En zelfs artsen hebben weinig kijk op wat er nu eigenlijk precies gebeurt wanneer de reflexen ontsporen. Ze kijken vooral naar de symptomen zonder zich af te vragen wat er nu werkelijk gebeurt. Ik ben tijdens een aantal bijeenkomsten met medici maar gewoon eens gaan doorvragen en toen bleek dat zij ook niet weten hoe een aantal reflexen in het menselijk lichaam werkt. Dat kun je alleen onderzoeken door gebruik te maken van regeltechnische methoden en inzichten.’

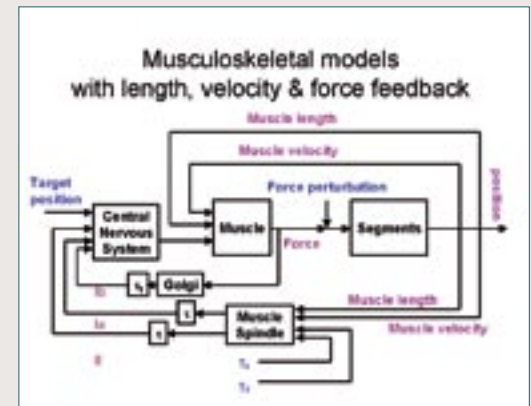
Het onderzoek van de TU Delft binnen het TREND-project is daarom van essentieel belang om het gat tussen klinische en regeltechnische kennis te dichten. Pas als men goed door heeft wat een reflexbaan precies is en doet, is het mogelijk om daar ook gericht een behandeling voor te starten. Maar dit is nog niet voldoende voor genezing van de PD-patiënt. Het inzicht van alle TREND-onderzoekers samen, meet- en regeltechniek, biochemie, genetica en anderen zal uiteindelijk bijdragen aan een adequate behandeling van PD en mogelijk preventie van PD. Het einde dus aan een syndroom.

Voor nadere informatie over dit onderwerp kunt u contact opnemen met prof. dr. Frans van der Helm, tel. (015) 278 5616, e-mail [f.c.t.vanderhelm@wbmt.tudelft.nl](mailto:f.c.t.vanderhelm@wbmt.tudelft.nl) of met dr. Alfred Schouten, tel. (015) 278 5247, e-mail [a.c.schouten@wbmt.tudelft.nl](mailto:a.c.schouten@wbmt.tudelft.nl) of met Erwin de Vlugt, tel. (015) 278 5247, e-mail [e.devlugt@wbmt.tudelft.nl](mailto:e.devlugt@wbmt.tudelft.nl)

Het zogenoemde Golgi peesorgaan bevindt zich in de overgang van spiervezels naar de pees, en bestaat uit zenuwvezels die door de peesvezels zijn gevlochten. Wanneer de spanning in de pees groter wordt, worden de zenuwvezels plat gedrukt en ontstaat er een signaal. Hierdoor meet het Golgi peesorgaan nauwkeurig (tot op enkele milli-Newton) de kracht in de spier, deze data gaat direct naar het centrale zenuwstelsel.



In dit schema zijn de terugkoppelbanen in het neuromusculaire systeem te zien. Door de hoekverandering van het gewricht worden de spieren opgerekt. Door de eigen veer-dempeigenschappen van de spieren worden krachten gegenereerd die de aangebrachte verstoringen tegengaan. De spier die wordt verlengd wordt via de



reflexbanen geactiveerd, waardoor de verlenging wordt tegengegaan. Dit lijkt op een veer met een tijdvertraging. Door de tijdvertragingen in de berekening mee te nemen en de spieractivatie te meten, kan de spier-visco-elasticiteit worden onderscheiden van de reflexieve reacties.