

Stroboscopie en de noodzakelijke aanvulling: videokymografie

H.K. Schutte¹ en J.G. Švec²

¹*Groningen Voice Research Lab. BioMedical Engineering, Faculteit der Medische Wetenschappen, Universiteit van Groningen*

²*Centre for Communication Disorders, Medical Healthcom Ltd, Praag*

Een nieuw ontwikkelde manier om de snelle bewegingen van de stemplooien te visualiseren, door ons videokymografie genoemd, werd uitgewerkt en toegepast op de stemplooien. Het systeem maakt gebruik van een gemodificeerde videocamera die in twee standen kan werken: een high-speed (videokymografiestand) en een standaardstand (50 beeldjes per seconde in de CCIR norm). In de videokymografiestand registreert de camera één horizontale lijn (dwars op de glottis) uit het hele larynxbeeld. De opvolgende lijnbeelden worden direct afgebeeld op een gewone TV-monitor, waarbij dan ieder videoframe van boven naar beneden wordt gemaakt. Het systeem stelt ons in staat om diverse aspecten van de stemplooitruiling te observeren zoals: links-rechts asymmetrieën, het gesloten quotiënt, verplaatsing van de mucosagolven, bewegingspatroon van de bovenrand, en in de sluitingsfase, de onderrand van de stemplooien, etc. De techniek is ook geschikt voor het verwerken en kwantificeren van de geregistreerde trilling.

Inleiding

Stemplooitruilingen bepalen in sterke mate de stemkwaliteit; daarom is de objectieve evaluatie en kwantificatie van de stemplooitruilingen erg belangrijk. Laryngoscopisch onderzoek van de stemplooien wordt o.a. gedaan om het trillingspatroon van de stemplooien te onderzoeken. Stroboscopie is daarbij een hulpmiddel om de voor het oog te snel bewegende stemplooien toch te kunnen zien bewegen. Het principe berust op een optische truc, die reeds meer dan 100 jaar geleden werd uitgevonden. Hoewel stroboscopie bij het stemonderzoek steeds meer wordt toegepast in de KNO-Foniatische praktijk, zijn er bij de stem situaties te vinden waar het stroboscopische principe te kort schiet. In dit artikel zal eerst een korte beschrijving van stroboscopie worden gegeven, waarna meer uitvoerig de recent uitgevonden aanvulling- videokymografie zal worden beschreven.

Correspondentieadres: Prof.dr. H.K. Schutte, Groningen Voice Research Lab., DG Biomedical Engineering, Bloemsingel 10, 9712 KZ Groningen. Tel/Fax +31 50 363 2688.
E-mail: h.k.schutte@med.rug.nl

Stroboscopie

In principe bestaat een stroboscoop uit een felle lichtbron, die evenwel niet continu licht afgeeft, zoals een gloeilamp, maar zeer korte en felle flitsen. Het moment waarop die flitsen komen wordt van buiten bepaald; de flitsen worden getriggerd op een inkomend signaal. De moderne stroboscopen kunnen met een hoge frequentie flitsen uitzenden. Om te passen bij de grondfrequentie van de stem is een dus range van 80 - 1000 hertz nodig.

De lichtflitsen van een stroboscoop zijn erg kort, in de orde van enkele tientallen microseconden. Het oog werkt veel trager, zodat de korte flitsen als het ware worden uitgesmeerd. Boven een frequentie van ongeveer 15 hertz zien we de flitsen niet meer afzonderlijk, maar lijkt een voorwerp continu belicht te worden. Bij stroboscopie van de stemplooien, ook bij de lage frequenties, zien we de afzonderlijke lichtflitsen niet meer.

Als de trillende stemplooien naar elkaar toe bewegen en weer van elkaar afgaan, om zodoende respectievelijk de glottis te sluiten en te openen, bewegen ze te snel om met het oog te kunnen volgen. De verschillende stadia van een hele trillingscyclus kunnen dan niet worden gevolgd.

De huidige stroboscopie-apparatuur kan op twee manieren worden ingesteld. Beide instellingen bepalen op welk moment de lichtflitsen komen, maar ze leveren een verschillend resultaat.

Deze eerste instellingsmogelijkheid wordt de *fase-instelling* genoemd, de flits komt dan op het moment dat bijvoorbeeld de stemplooien tegen elkaar aankomen of op het moment van maximale opening in de trillingscyclus. Hoewel de stemplooien dus trillen worden ze zo uitermate kort belicht door de flits van de stroboscoop dat ze lijken stil te staan. Op welk moment de flits komt wordt bepaald door een elektronische schakeling die ingebouwd zit in de stroboscoop en die dus de flits doet ontsteken; deze wordt getriggerd door het stemgeluid. Bij de stroboscopen kan met een pedaal worden gekozen op welk moment in de cyclus de stemplooien gezien kunnen worden.

De tweede instelling is er voor om de stemplooien langzaam te zien bewegen, zodat we het trillingspatroon toch visueel kunnen volgen. Dit wordt de *delta f-instelling* genoemd.

Hierbij wordt een andere truc toegepast. In plaats van de flitsen te laten komen op hetzelfde moment in een trillingscyclus komen nu de flitsen ieder een fractie later in een trillingscyclus. De flitsen worden ook nu weer getriggerd door het stemgeluid, waarbij een elektronische schakeling ervoor zorgt dat de volgende flits iets later komt dan de vorige. De trillende stemplooien worden telkens iets later in een trillingscyclus belicht en met het uitsmeereffect van onze ogen gezien als een continue beweging van de stemplooien. De frequentie waarmee we de stemplooien zien bewegen is afhankelijk van hoeveel later de flits telkens komt. Meestal wordt een frequentie van 1 à 2 hertz ingesteld, wat dus betekent dat, om een volledige trillingscyclus te kunnen zien, een hele tot een halve seconde, respectievelijk, moet worden gekeken. Sommige patiënten kunnen niet lang geluid geven; bij een fonatie van ca 5 seconden ziet men dus maximaal 5 volledige cycli en soms nog minder omdat de apparatuur ook nog enige

tijd nodig heeft om zich op de goede frequentie in te stellen. Het triggeren op het stemgeluid is principieel een zwakke schakel in het gebruik van de stroboscopie.

Triggeren

Stroboscopie staat of valt met het triggeren van de flitsende lichtbron. Bij beide bovenbeschreven instellingen is het juist op tijd komen van de flitsen essentieel. Meestal wordt een uitwendige microfoon gebruikt om uit het stemgeluid de grondfrequentie te destilleren. Dit is moeilijker dan het lijkt; uit het complexe stemsignaal is niet eenvoudig en snel de grondfrequentie af te leiden. Hierdoor kan een foute triggering ontstaan, waardoor het stroboscopisch beeld warrig wordt en niet meer goed geïnterpreteerd kan worden. Ook zal bij onregelmatige trillingen de triggering niet snel genoeg kunnen volgen om een stabiel stroboscopisch beeld te krijgen. Het gebruikelijke vibrato van een getrainde zangstem van ca. 5 hertz kan een goede observatie onmogelijk maken. Althans als het vibrato niet voor de gelegenheid kan worden onderdrukt.

Videostroboscopisch onderzoek

Bij het moderne videostroboscopisch onderzoek wordt een endoscoop gebruikt om de stemplooien te visualiseren met een videocamera om het beeld vast te leggen, (Hirano & Bless, 1993) Een commerciële videocamera is maar in staat 50 (of 60, afhankelijk van het videosysteem) halve beelden per seconde te registreren. De frequentierange van de stemplooien is evenwel veel groter (ca. 70-500 Hz bij mannen en ca. 130-1000 Hz bij vrouwen), daarom is een aanvullende aanpak nodig om informatie te krijgen over het trillingspatroon van de stemplooien. Een stroboscoop wordt dan gebruikt om toch een (illusionair) beeld te krijgen van het trillingspatroon van de stemplooien.

Hoewel stroboscopie het mogelijk maakt om het trillingspatroon te bestuderen, heeft het een ernstige beperking daarin dat het alleen werkt met periodische trillingen. Iedere frequentieverstoring van de trilling verstoort ook het resulterende stroboscopisch beeld, waardoor betrouwbare kwantificatie moeilijk wordt. (Hirano & Bless, 1993; Švec, Schutte et al., 1996). Bovendien kunnen onregelmatige trillingen helemaal niet bestudeerd worden.

In het verleden zijn pogingen ondernomen om een laryngoscopische methode te vinden die niet beperkt is tot periodieke trillingen. Larynx-fotokymografie werd beschreven door Gall en Hanson (1973) en later door Gross (1985).

Deze methode maakt het mogelijk om het trillingspatroon van de stemplooien te beoordelen aan de hand van afbeeldingen die met een speciale camera werden opgenomen. Het systeem geeft echter geen onmiddellijke terugkoppeling over de trillingen omdat de foto's eerst ontwikkeld moesten worden. Bovendien heeft de technische realisatie van een dergelijk systeem niet geleid tot een commercieel verkrijgbaar systeem.

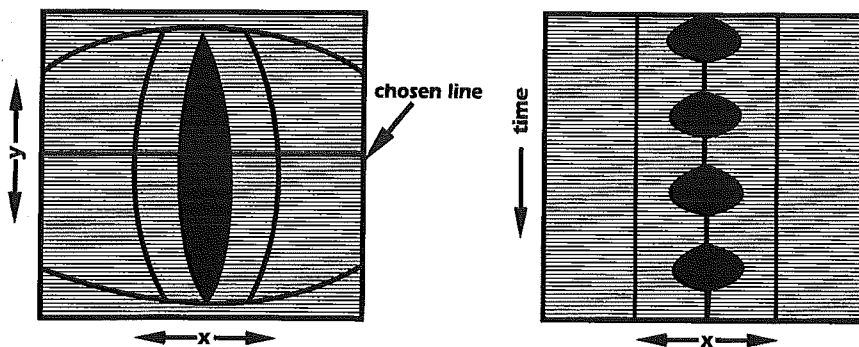
Ultra-high-speed filmopnamen, zoals als eerste werd toegepast in de Bell Labora-

tories in eind dertiger jaren (Farnsworth, 1940) werd door veel wetenschappers gebruikt in verschillende studies over het patroon van de stemplooitruillingen. Zie voor een overzicht Hirano (1981). Recent werd deze fotografische aanpak vervangen door digitale high-speed image systemen, dat thans een krachtige methode is om stemploobewegingen te beoordelen, (Honda, Kiritani et al., 1987; Kiritani, Imagawa et al., 1988; Hess & Gross, 1993; Kiritani, Hirose et al., 1993; Hertegård & Lindestad, 1994; Kiritani, Niimi et al., 1995). Deze systemen zijn echter tijdrovend in de uitwerking van de gegevens en bovendien schrikbarend duur, zodat ze maar op enkele laboratoria gebruikt kunnen worden.

Videokymografie: een nieuw high-speed beeldtechniek.

Recent werd in het Groningen Voice Research Lab., in samenwerking met Lambert Instruments BV. een nieuwe benadering met een speciaal CCD video systeem ontwikkeld. In de ene stand werkt het systeem als een normale commerciële videocamera, 50 beelden per seconde registrerend. De tweede mode maakt het mogelijk om beelden met een frequentie van bijna 8000 per seconde te registreren en ze zichtbaar te maken op een gewone TV monitor.

Het principe van videokymografie is als volgt: Ieder standaardvideobeeld (frame) bestaat uit 625 horizontale lijnen volgens conventies, (PAL-systeem). Bij videokymografie wordt de informatie van een enkele lijn geregistreerd. (figuur 1 links). Hierdoor wordt het mogelijk veel meer "lijnplaatjes" per seconde te registreren, wat natuurlijk ten koste gaat van een volledige afbeelding. Dit resulteert in een opnamefrequentie van deze lijn van 7812,5 Hz, wat hoog genoeg is om de hele frequentierange van de stemplooiën te bestuderen. De elkaar opvolgende lijnplaatjes worden real-time zodanig weergegeven op een gewone TV-monitor dat de tijdsdimensie in verticale richting is weergegeven (figuur 1, rechts).



Figuur 1. De twee modes van het video systeem. Links de normale mode zoals die gebruikt wordt voor het totaal beeld van de stemplooiën. Het hele beeld zoals geregistreerd door de camera is samengesteld uit horizontale lijnen. In de high-speed imaging mode, maakt het systeem het mogelijk om een enkel lijn te selecteren om daar het trillen van de stemplooiën te registreren. Het resulterende line beeld is rechts afgebeeld. De verticale as is nu een tijdas.

Materiaal en methoden

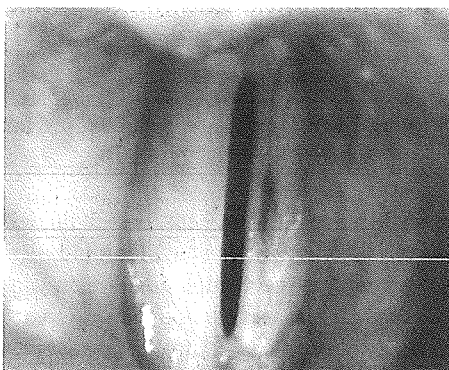
Twee mannelijke proefpersonen produceerden verschillende typen fonaties (normaal, geknepen, hees, ed). Voor het onderzoek van de stemplooi-trillingen werd een von Stuckrad 90 graden starre endoscoop gebruikt (R. Wolf, Knittlingen, Duitsland) met een zoom-objectief adapter (RIWO). Beelden werden verkregen met een gemodificeerde zwart-wit CCD-camera (Lambert Instruments BV) en opgenomen op een SONY B-max Video Cassette Recorder (type SL-C9ES). Een Brüel and Kjør Stroboscope (type 4914) werd gebruikt voor het stroboscopisch deel van het onderzoek. Continu licht werd verkregen van een AUTO-TCP-Lichtprojektor 5108 (Wolf) om de stemplooiën te belichten bij het opnemen in de videokymografie stand.

Videokymografische beelden

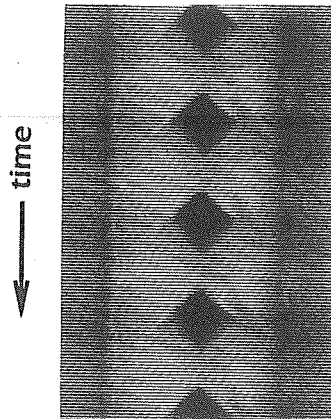
Figuur 2 toont een stroboscopische afbeelding van mannelijke stemplooiën. Een bloedvat is zichtbaar op de rechter stemplooi, wat erg nuttig bleek te zijn voor het lokaliseren van de positie van de camera in de videokymografie- (lijn) stand. De lijn afgebeeld in figuur 2 geeft de plaats aan van de actieve lijn die gebruikt wordt in de videokymografie-stand; het resultaat zien we in figuur 3.

De open en gesloten fase tijdens een glottiscyclus zijn duidelijk waar te nemen. Slijmvliesgolven zoals die zich verplaatsen over het bovenoppervlak van de stemplooiën kunnen goed worden gezien en ook de verplaatsingen van de bovenrand en – in de sluitingsfase –, de onderrand van de stemplooiën. Figuur 4 illustreert in detail de belangrijkste fenomenen zoals die gezien kunnen worden op de stemplooiën.

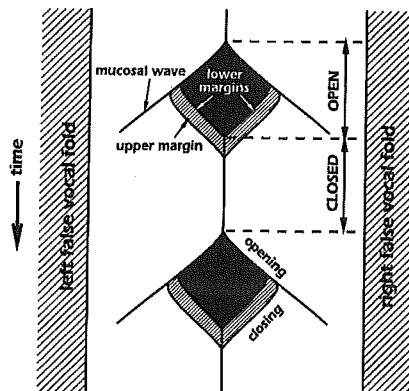
Figuur 5 toont het trillingspatroon van dezelfde stemplooiën tijdens een ander fonatietype. De actieve lijn lag nu op de verdikking van het bloedvat op de rechter stemplooi (duidelijk te zien in figuur 2). Een licht links-rechts asymmetrie is aanwezig tij-



Figuur 2. Een stroboscopische beeld van stemplooiën van een man bij normale video stand van de videocamera. Let op het bloedvat met verdikking in het midden op de rechter stemplooi. De dunne horizontale lijn geeft de positie aan van de lijn die gebruikt wordt voor videokymografie, afgebeeld in figuur 3.



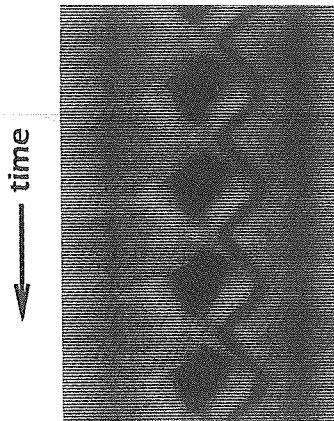
Figuur 3. Stemplootrillingen, geregistreerd met de videokymografiestand van de camera (de totale tijd die weer gegeven wordt is 18,4 ms). De openingsbeweging van de glottis wordt gevolgd door het verlopen van de slijmvliesgolven naar buiten en kan duidelijk worden gezien, zowel als de faseverschillen tussen de bovenste en onderste rand tijdens de sluitingsbeweging. Zie de schematische afbeelding in figuur 4.



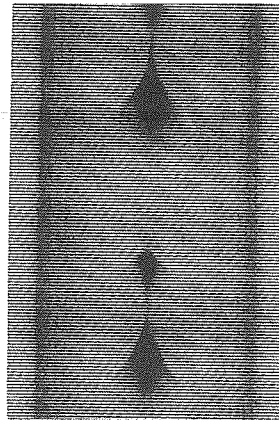
Figuur 4. Schematische voorstelling van de stemplootrillingen zoals bij videokymografie kan worden gezien. Dit zijn de open en gesloten fase in een trillingscyclus, verplaatsingen van de boven- en onderranden en het verloop van de mucosagolven.

dens deze fonatie. Ook is de beweging van het bloedvat duidelijk zichtbaar en toont een lichte faseverschuiving in relatie tot de stemplooirand.

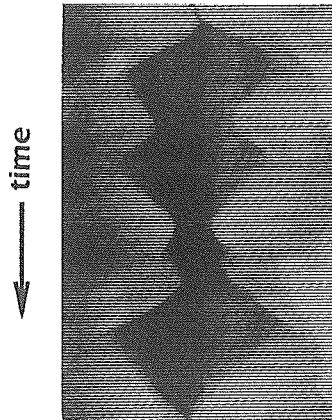
Figuren 6 en 7 tonen onregelmatige stemplootrillingen van een andere proefpersoon. Figuur 6 geeft een tijdsegment van een fonatie in het vocal fry (pulse) register. Twee verschillende open patronen in een complexe glottiscyclus zijn zichtbaar hier, dat betekent dat er een subharmonische toon tijdens deze fonatie ontstaat. (Svec, Schutte et al., 1996). Figuur 7 illustreert onregelmatige trillingspatronen tijdens zwak geadduceerde stemplooiën.



Figuur 5. De stemplootrilling in videokymografie (4,5 glottiscycli binnen de tijd van 18,4 ms). De actieve lijn ligt in het midden van de stemplooiën ter hoogte van de verdikking van het bloedvat (zie figuur 2.) een lichte asymmetrie in het trillingspatroon kan worden vastgesteld, en ook een faseverschuiving (vertraagd) in de beweging van het bloedvat ten opzichte van de rand.



Figuur 6. Stemplootrillingen van een andere proefpersoon tijdens vocal fry (pulse) fonatie (totale tijd 18,4 ms). Let op de dubbele openingsmomenten tijdens een glottiscyclus.



Figuur 7. Onregelmatige trillingen bij zwak geadduceerde mannelijke stemplooiën (totale tijd 18,4 ms).

Conclusie

De beschreven techniek stelt ons in staat verscheidene belangrijke eigenschappen van de trillende stemplooiën te registreren. Enkele van de meest belangrijke observeerbare parameters zijn frequentie, amplitude van de stemplootrillingen, links-rechts asymmetrieën, open en gesloten fasen van de glottiscyclus, tijdsduurmetingen van deze fa-

sen kunnen worden gebruikt voor de berekening van het open en closed quotient (Hirano & Bless, 1993; Gall & Hanson, 1973; Hirano, 1981) en de verplaatsing van de mucosagolven. Deze parameters zijn geschikt voor extractie en automatische evaluatie van de stemplooitrillingen. In de standaardstand kan met het systeem routine stroboscopisch onderzoek worden gedaan. De directe weergave van de tijdsdimensie op het scherm in de videokymografiestand maakt het eenvoudiger om de stemplooitrillingen te evalueren. De videocamera geeft duidelijke beelden van zelfs onregelmatige trillingen van de stemplooien, waar stroboscopische observaties onmogelijk zijn. De combinatie van een relatief eenvoudige methode voor het verkrijgen van informatie over belangrijke parameters van de stemplooitrillingen, samen met een technologische benadering die niet duur hoeft uit te vallen, maakt dit tot een veelbelovende techniek voor zowel stemresearch als in de klinische praktijk. Het systeem met de gemodificeerde camera kan ook worden toegepast op andere terreinen van trillingsonderzoek, bijvoorbeeld: akoestische studies van muziekinstrumenten of technisch trillingsonderzoek.

Acknowledgment

De methode werd in de loop van 1995 uitgewerkt in het Groningen Voice Research Lab. door Jan Švec, waarbij de grootmoedige steun van Lambert Instruments (Leutingwolde) voor de technische realisatie in dank wordt vermeld.

Summary

A recently developed technique for high-speed visualisation, called videokymography, was developed and applied to the vocal fold vibrations. The system uses a modified video camera able to work in two modes: high-speed (nearly 8000 images/s) and standard (50 images/s in CCIR norm). In the high-speed mode, the camera selects one active horizontal line (transverse to the glottis) from the whole laryngeal image. The successive line images are presented in real time on a commercial TV monitor, filling each video frame from top to bottom. The system makes it possible to observe left-right asymmetries, open quotient, propagation of mucosal waves, movement of the upper and, in the closing phase, the lower margins of the vocal folds, etc. The technique is suitable for further processing and quantification of recorded vibration.

Literatuur

- Farnsworth, D. W. (1940). High-Speed Motion Pictures of the Human Vocal Cords. *Bell Laboratories Record*, 18, 203-208.
- Gall, V. & Hanson, J. (1973). Bestimmung physikalischer Parameter der Stimmlippenschwingungen mit Hilfe der Larynxphotokymographie. *Folia Phoniatrica*, 25, 450-459.

- Gross, M. (1985). Larynxfotokymographie. *Sprache-Stimme-Gehör*, 9, 112-113.
- Hertegård, S. & Lindestad, P.-Å. (1994). Vocal fold vibrations studied during phonation with high-speed video imaging. *Karolinska Institute, Huddinge University Hospital Phoniatic and Logopedic Progress Report*, 9, 33-40.
- Hess, M. M. & Gross, M. (1993). High speed, light intensified digital imaging of vocal fold vibrations in high optical resolution via indirect microlaryngoscopy. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology (St Louis)*, 102, 502-507.
- Hirano, M. (1981). *Clinical Examination of the Voice*. (5 ed.) Berlin: Springer-Verlag.
- Hirano, M. & Bless, D.M. (1993). *Videostroboscopic examination of the larynx*. San Diego, California: Singular Publishing Group.
- Honda, K., Kiritani, S., Imagawa, H., & Hirose, H. (1987). High-speed digital recording of Vocal Fold Vibration using a Solid-state Image sensor. In: T. Baer, C. Sasaki, K. S. Harris, T. Baer, & C. Sasaki (Eds.), *Laryngeal Function in Phonation and Respiration* (pp. 485-491). San Diego, CA: College-Hill Press.
- Kiritani, S., Hirose, H., & Imagawa, H. (1993). High-speed digital image recording system for observing vocal cord vibration. *Annual Bulletin Research Institute of Logopedics and Phoniatrics University of Tokyo*, No.27, 79-87.
- Kiritani, S., Imagawa, H., & Hirose, H. (1988). High-Speed Digital Image Recording for the Observation of Vocal Cord Vibration. In O.Fujimura (Ed.), *Vocal Physiology: Voice Production, Mechanisms and Functions* (pp. 261-269). New York: Raven Press Ltd.
- Kiritani, S., Niimi, S., Imagawa, H., & Hirose, H. (1995). Vocal fold vibrations associated with involuntary voice changes in certain pathological cases. In O.Fujimura & M. Hirano (Eds.), *Vocal fold physiology: voice quality control* (pp. 269-281). San Diego, California: Singular Publishing Group.
- Švec, J. G., Schutte, H. K., & Miller, D. G. (1996). A subharmonic vibratory pattern in normal vocal folds. *Journal of Speech and Hearing Research*, 39, 135-143.