

Stilstaan bij lopen

Werkgroep 3

A. Heck & A. Holleman

AMSTEL Instituut/Bonhoeffer College, Castricum

Inleiding

De softwareomgeving Coach maakt het mogelijk om op digitale videoclips metingen te verrichten. De filmpjes kunnen hierbij ook door de leerlingen zelf met een webcam opgenomen zijn. Videometen breidt het aantal te onderzoeken verschijnselen uit. Zo hebben wij de mogelijkheid van het onderzoeken van de loopbeweging aangegrepen bij het project “Stilstaan bij lopen”.

U en ik hebben zo rond onze eerste verjaardag leren lopen onder de trotse aandacht van ouders, opa's en oma's. Maar daarna is lopen de gewoonste zaak van de wereld, de meeste mensen denken er niet meer over na. Toch is lopen een hoogst interessant en gevarieerd verschijnsel. Vaak kun je immers mensen herkennen aan hun manier van lopen: iedereen loopt dus op zijn eigen wijze. Soms kun je aan de loopbeweging zien hoe iemand zich voelt: opgewekt, terneergeslagen, gehaast etc. Meisjes lopen vaak anders dan jongens. Dikke mensen lopen anders dan dunne mensen. En zo is er meer te bedenken.

Wanneer je met wandelsnelheid loopt, en je wilt versnellen, dan ga je op een bepaald moment als vanzelf van wandelen over in een looppas. Waarin verschilt gewoon lopen van de looppas? Waarom ga je overigens niet gewoon sneller wandelen in plaats van in de looppas? Het blijkt dat mensen van ongeveer dezelfde lengte bij dezelfde snelheid overgaan van wandelen naar de looppas. Hoe komt dat? Maar snelwandelaars kunnen wel snel wandelen. Zij maken daarbij tamelijk onnatuurlijke bewegingen. Waarin verschilt de snelwandeling van de gewone wandelbeweging? Is de loopbeweging van een sprinter anders dan die van een lange-afstandloper? Wat zijn de verschillen? Op aarde kun je gewoon lopen. Op de maan is gewoon lopen praktisch onmogelijk, zoals de televisiebeelden van de maanreizigers hebben laten zien. Vanwaar dit verschil? Het zal ongetwijfeld met de veel lagere zwaartekracht van de maan te maken hebben. Maar hoe?

Op het Bonhoeffercollege in Castricum hebben leerlingen van 5 VWO in een praktische opdracht aan de hand van eigen videobeelden een onderzoekje gedaan naar hun eigen loopbeweging en deze beweging vergeleken met de beweging van

iemand anders. De videobeelden werden met een webcam opgenomen in het natuurkundelokaal.

In de masterclass, onlangs georganiseerd door het AMSTEL instituut, hebben leerlingen uit verschillende delen van het land een enthousiast begin gemaakt van een werkstuk over lopen. Hierbij maken zij gebruik van allerlei videofilmjes die opgenomen zijn op de loopband in de fitnessruimte van de Universiteit van Amsterdam.

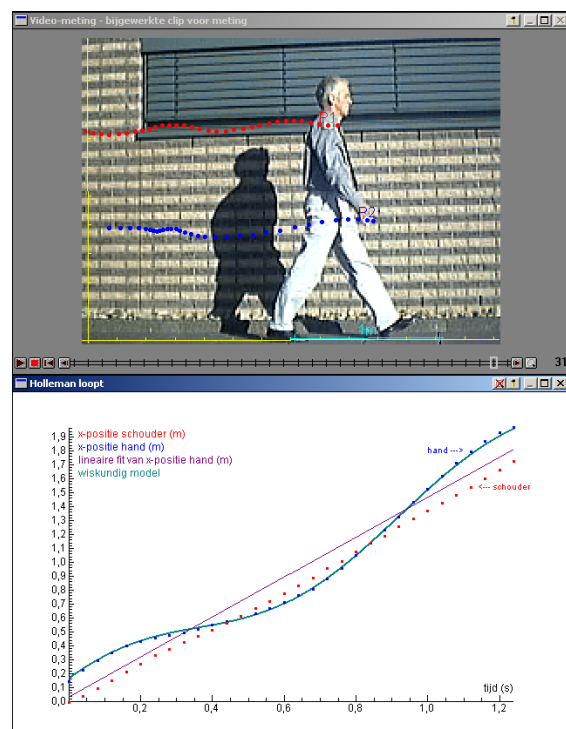
Analyse van de loopbeweging

In de inleiding zijn allerlei variaties van de loopbeweging opgesomd. Maar voordat je naar de verschillen gaat kijken is het verstandig om eerst kenmerken van de “algemene” loopbeweging te zoeken.

Lopen is een gecompliceerde beweging. Afhankelijk van de snelheid waarmee je loopt zwaaien je armen, beweeg je je schouders, wordt bij elke pas je romp een stukje opgetild, de slingerbeweging van linker- en rechterbeen ervoor dat je vooruitgaat, maken onder- en bovenbeen ieder een aparte zwaai, bewegen je heupen op een bepaalde manier en hebben je voeten ook nog een belangrijke functie. Er is dus heel wat te analyseren! We bekijken even apart de arm- en beenbeweging.

1. De armbeweging

Als eerste onderzoeken we de zwaai-beweging van de armen bij gewoon wandelen. Deze zwaai-beweging lijkt op een slingerbeweging: we verwachten daarom een sinusoïde t.o.v het schoudergewricht. Hierbij gebruiken we een filmpje dat we op een zonnige middag hebben opgenomen.



U ziet in het grafiekenvenster de gemeten x-positie van de hand en van de schouder t.o.v. het gekozen assenstelsel. De schouderposities liggen zo op het blote oog op een rechte lijn. De x-positie van de hand modelleren we wiskundig als een combinatie van een rechte lijn en een sinusoïde, d.m.v. de formule $x(t) = at + b\sin(ct + d) + e$, met a , b , c , d en e nog te bepalen parameters. Hiervoor wordt de optie "functiefit" van Coach gebruikt: eerst een lineaire functiefit van de gemeten data en dan een sinusfit van de verschilgrafiek van metingen en lineaire benadering. In dit voorbeeld blijkt de periode 1.1 seconde te wezen. Dit getal ligt dicht bij de natuurlijke periode van de arm, die in een model van een aangedreven harmonische slinger (Holt et al., 1990) gegeven wordt door de formule

$$\text{periode} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{2mgd}}$$

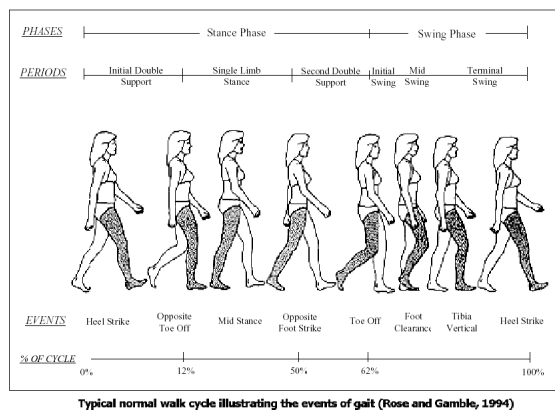
Hierbij is I het traagheidsmoment van de arm (incl. de hand) is, g de gravitatieconstante, m de massa van de arm en d de afstand van het zwaartepunt van de arm tot de schouder. Wie dit te ver vindt gaan voor VWO leerlingen kan ze wel laten nagaan dat de periode in ieder geval niet gegeven wordt door

$$\text{periode} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

waarbij l de lengte van de arm voorstelt, en de leerlingen om een verklaring hiervoor vragen.

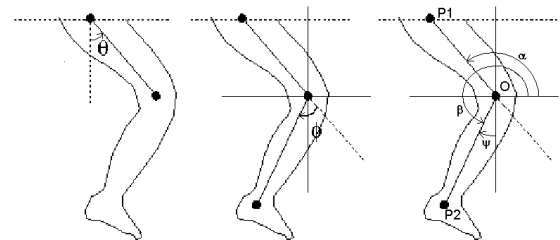
2. De beenbeweging

Bij de beweging van het been kun je verschillende stadia onderscheiden, zoals in de onderstaande figuur is aangegeven.

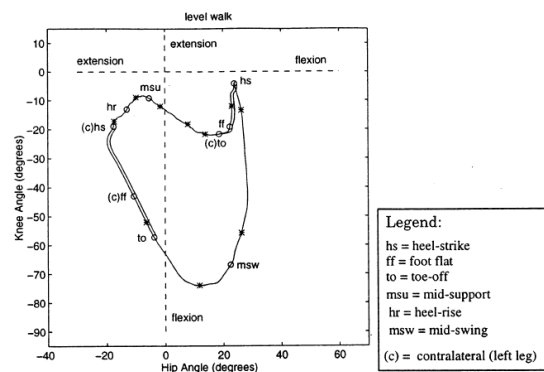


In een loopcyclus heb je bij gewoon lopen twee fasen waarin beide voeten contact hebben met de grond. Er zijn ook twee fasen waarin een van beide benen naar voren zwaait. Het komt niet voor dat beide voeten tegelijkertijd los zijn van de grond. Bij andere vormen van lopen kan dat anders zijn. Op een videoclip kun je heel goed stapgrootheden (zoals staplengte, stapfrequentie en gangsnelheid) en staptijdfactoren (bijvoorbeeld de tijdsduur van de stand- en zwaai fase van een been) bepalen.

Om een beter inzicht te krijgen in de bewegingen die dijbeen en scheenbeen ten opzichte van elkaar maken tijdens een schrede wordt in bewegingswetenschappen een heup-knie-cyclogram gebruikt. Dit is een grafiek waarin de kniehoek is uitgezet tegen de heuphoek. In de figuur hieronder is de heuphoek aangegeven met θ , de kniehoek met ϕ . Bij videometen met Coach zijn deze hoeken als volgt te bepalen: plaats in elk beeldje van de videoclip de oorsprong O van het assenstelsel op de knie. Meet dan per beeldje 2 punten, nl. P1 (de heup) en P2 (de enkel). Van deze meetpunten registreert de software behalve de Cartesische coördinaten ook de poolcoördinaten. Dus zijn de hoeken α en β steeds bekend. Via een betrekkelijk eenvoudige formule kunnen heup- en kniehoek dan berekend worden.

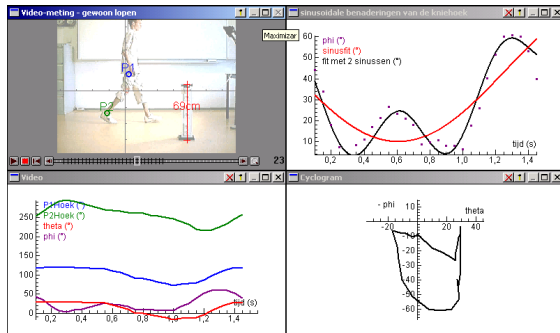


In de volgende figuur is een cyclogram van gewoon lopen op een vlakke ondergrond afgebeeld dat afkomstig is uit de vakliteratuur (Goswami, 1998). De heuphoek varieert hier tussen -20° en 30° , de kniehoek tussen -75° en -3° . In dit cyclogram is duidelijk te zien dat het been op het moment van hielcontact vrijwel gestrekt is. Dan neemt de kniehoek snel toe tot het contact over de volle lengte van de voet, het been strekt zich weer tot het midden van de standfase bereikt is, waarna het been zich opnieuw buigt en weer strekt tot het volgende hielcontact.

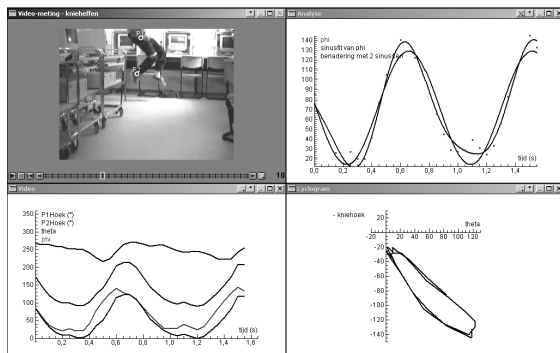
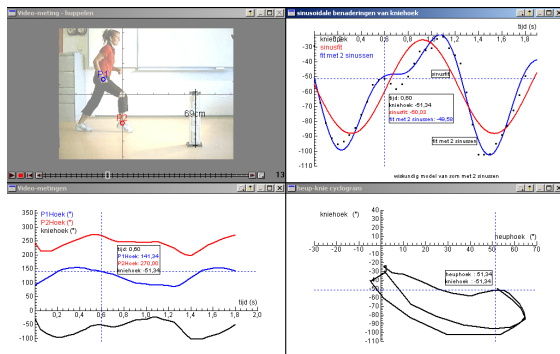


Resultaten in de klas

Is zo'n mooi cyclogram ook te verkrijgen door leerlingen met een webcam (waarbij natuurlijk wel een computer nodig is) en Coach? Het antwoord is te zien in de onderstaande schermafdruk die gemaakt is bij de praktische opdracht door leerlingen van het Bonhoeffercollege. Linksboven een beeld van de videofilm waarin Jordi gewoon loopt, opgenomen in het natuurkundelokaal. Rechtsonder staat het bijbehorende cyclogram. Een mooi resultaat, nietwaar?



In de grafiek rechtsboven is nog te zien dat de grafiek van de kniehoek ϕ als functie van de tijd goed benaderd kan worden met een functiefit van de som van twee sinusoiden. Net als bij de functiefit van de armbeweging is dit gedaan door de gemeten grafiek eerst te benaderen met een sinusoiden en dan het verschil tussen de gemeten grafiek en de sinusfit opnieuw met een sinusoiden te benaderen. Zoals we in de inleiding al opmerkten hadden de leerlingen als taak om hun eigen loopbeweging te vergelijken met die van een klasgenoot. Dit deden ze aan de hand van een cyclogram en voorwaarde was dat iedereen een afwijkende loopbeweging maakte: de een liep achteruit, de ander huppelde en weer een ander trok de knieën hoog op. Wij wisten zelf ook niet op voorhand of dit wel geschikte meetresultaten zou opleveren. Hieronder ziet u twee schermafdrukken van achtereenvolgens huppelen en knieheffen.



Of het nu om gewoon lopen, huppelen, joggen, achteruit lopen, met een boek op je hoofd lopen, met hoog opgetrokken knieën voortbewegen of op

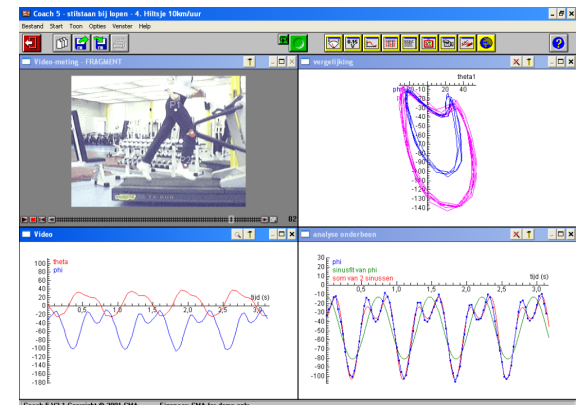
je tenen lopen betreft, het levert allemaal bruikbare cyclogrammen op. En wij zijn niet de enigen die aangenaam verrast zijn; de leerlingen Dries en Edwin delen kennelijk onze mening want zij geven als commentaar op de opdracht: “Het is leuk om te zien dat je benen toch eigenlijk een mooie wiskundige ronde afleggen, de klap als men de voet op de grond zet en dergelijke”.

Resultaten in de masterclass

Tijdens de masterclass op 8 november is gebruik gemaakt van de faciliteiten van de fitnessruimte van de UvA. De lopende band, waarbij zowel de snelheid als de helling instelbaar is, bleek een ideaal hulpmiddel. Er is geëxperimenteerd met lopen met verschillende snelheden en bij verschillende hellingen. Er is ook achteruit gelopen, kniegeheven, trampoline gesprongen en gefietst. De leerlingen hebben het videomateriaal op CD-rom mee naar huis gekregen.

1. Rennen op een loopband

Ter illustratie bekijken we de resultaten van opnamen van Hiltje waarop zij hard liep met een snelheid van 10 km/uur en met een snelheid van 15 km/uur. Bij beide snelheden zijn er enkele loopcycli gemeten. De resultaten zijn te zien in de volgende schermafdruk.



Linksboven is Hiltje aan het rennen. Op de knie zit een marker: hierop plaatsen we bij videometen in elk beeldje de oorsprong van het assenstelsel. Op de heup en op de enkel zijn de meetpunten P1 en P2 te herkennen. In de grafiek linksonder zijn heuphoek en kniehoek afgezet tegen de tijd. Rechtsboven twee cyclogrammen: de een bij 10 km/uur, de ander bij 15 km/uur. Welke hoort bij welke snelheid? Dit kun je zelf beredeneren.

2. Stapfrequentie versus gangsnelheid

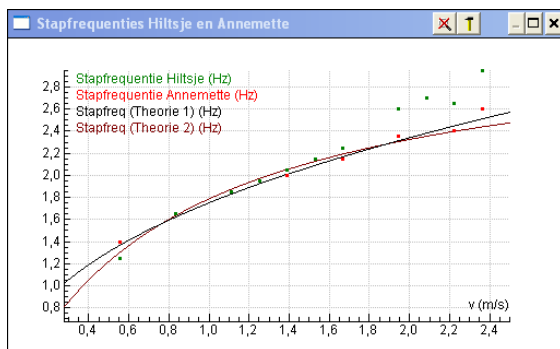
Als je over een loopband met instelbare loopsnelheden beschikt, dan is een onderzoek naar het verband tussen gangsnelheid v en stapfrequentie f goed te doen. Een empirisch verband is

$$f = cv^b,$$

waarbij c een constante is en $b \approx 0.58$ bij normale gangsnelheden van volwassenen (Bertram & Ruina, 2001). Een ander mogelijk verband is

$$f = \frac{v}{av+b}$$

Dit stoelt op de gedachte dat een persoon die ontspannen loopt automatisch zijn of haar stapgrootte aanpast aan een gegeven snelheid volgens een lineair verband. In onderstaande schermafbeelding zie je de resultaten voor Hiltje en Annemette, die bij verschillende voorgeschreven gangsnelheden het aantal stappen gedurende 20 seconden lopen opgemeten hebben. Je kunt in de grafieken ook goed zien wanneer de wiskundige modellen niet meer adequaat zijn.



3. Hoe snel kun je lopen?

Bij hoge snelheid kun je niet meer lopen, maar moet je gaan rennen, d.w.z. moet je een zweeffase introduceren. Grote vraag is wanneer dit gebeurt. Met een simpel model van lopen ('omgekeerde slinger') kun je al goede schattingen hiervan maken: we veronderstellen dat het standbeen lengte l heeft en altijd gestrekt gehouden wordt (bij snelwandelen is dit zelfs vereist). We verwaarlozen het gewicht van de benen en doen net of alle massa in de heup gedacht kan worden. Als het standbeen rechtop staat dan is de versnelling naar beneden gericht en gelijk aan v^2/l . Het lichaam kan vervolgens niet naar beneden gaan met een grotere versnelling dan de gravitatieconstante (waarom eigenlijk?). Met ander woorden: $v^2/l \leq g$. Het Froude getal wordt gedefinieerd als

$$\text{Froude getal} = \frac{v^2}{gl}$$

Als het Froude getal kleiner of gelijk aan 1 is kun je nog steeds lopen. Bij een Froude getal groter dan 1 moet je gaan rennen. Tenminste als je geen snelwandelaar bent. Dan kun je een snelheid van 4 m/s halen. Weet u ook hoe? Zie (Trowbridge, 1982) voor een gedetailleerd wiskundig model voor (snel)wandelen. In praktijk ga je al over op rennen

bij een Froude getal van 0.5. Dit alles betekent dat de maximale loopsnelheid van een volwassene met een beenlengte van 90 cm in theorie op aarde ongeveer gelijk aan 3 m/s en dat deze persoon normaliter bij een snelheid van 2 m/s al overgaat op rennen. Reken op deze manier ook eens de maximale loopsnelheid voor deze persoon op de maan uit. Klopt dit met de televisiebeelden van lopende mannen op de maan?

Conclusie

Ons doel was om leerlingen te laten

- werken met echte data verzameld uit een videoclip en hierop wis- en natuurkundige modellen toe te laten passen;
- ervaren dat een grafiek meer is dan een mooi plaatje alleen, maar juist veel informatie kan verschaffen over het fenomeen dat ze bestuderen;
- oefenen met en verbeteren van ICT-vaardigheden, in het bijzonder vaardigheden in het maken van een videoclip en het doen van metingen hierop;
- omgaan met reeds verworven kennis van wis- en natuurkunde in praktisch werk;
- kennismaken met hedendaags wetenschappelijk onderzoek, inclusief de gangbare terminologie en onderzoeksmethoden.

Dit is goed uit de verf gekomen. U kunt meer over onze ervaringen in de klas lezen in (Heck, 2002).

Tot slot

Het onderwerp 'stilstaan bij lopen' maakt deel uit van het aanbod in het ICT-lab/WerkstukLab. We verwijzen voor informatie en lesmateriaal naar de website www.science.uva.nl/profielwerkstukken. Maar ook aan leraren wordt gedacht: u kunt in uw agenda noteren 7 februari 2003 of 3 april 2003 als datum voor de mastercourse over wis- en natuurkunde van menselijke gang.

Literatuur

- Bertram, J., Ruina, A. (2001). Multiple walking speed-frequency relations are predicted by constrained optimization. *J. theor. Biol.* **209**, 445-453.
- Goswami, A. (1998). A new gait parameterization technique by means of cyclogram moments: Application to human slope walking. *Gait & Posture* **8**(1), 15-36.
- Heck, A. (2002). Stilstaan bij lopen. *Nieuwe Wiskrant* **22**(1), 44-50.
- Holt, K.G., Hamill, J., Andres, T.O. (1990). The force-driven harmonic oscillator as a model for human locomotion. *Human Movement Science* **9**, 55-68.
- Trowbridge, E.A. (1982). Walking or running? When does lifting occur. *Math. Spectrum* **15**, 77-81.