

Het voordeel van orthogonaal besturen van graafmachines

M de Neve, P Vink, H Kanis, F Krause, J Verlinden

Bestuurders van graafmachines hebben klachten over de huidige wijze van besturen. Bij de huidige graafmachines wordt door de machinist een cirkelbeweging van de graafarm aangestuurd. Wanneer in de toekomst graafmachines met computers worden uitgerust, is het mogelijk nieuwe besturingssystemen te introduceren. In dit artikel wordt een nieuw besturingssysteem getest: het orthogonaal besturen. Deze besturing houdt in dat met de joysticks rechte lijnen in de hoog-laag, voor-achterwaartse en zijwaartse richting worden aangestuurd. Zeven rechtshandige proefpersonen werden in een simulatie-omgeving herhaald getest middels vier opdrachten. Bij het orthogonaal besturen neemt het aantal bewegingen af en alle zeven proefpersonen blijken de voorkeur te geven aan dit orthogonale besturingssysteem. Of dit op een echte graafmachine inderdaad zo is, moet nog blijken.

Inleiding

Meer dan een vijfde van de bestuurders van graafmachines is niet tevreden over de besturing (Kuijt-Evers e.a., 2003). Daarbij gaat het over klachten als gebruiksgemak van de joystick en de positie van de joystick in de cabine. Dit is een reden om hier naar verbetering te zoeken. Tien jaar geleden werden graafmachines vooral bestuurd door mechanische handels (Looze e.a., 2000; zie fig. 1 links op pag. 10). Inmiddels is een groot deel van de graafmachines voorzien van joysticks (Krause, 2003; zie fig. 1 rechts

op pag. 10). Dit lijkt een verbetering, omdat bijvoorbeeld de extreme gewrichtsstanden verminderen. Ondanks die verbetering zijn er nog klachten. In dit artikel wordt een mogelijkheid onderzocht waarmee de besturing nog verder kan verbeteren.

Bij de huidige machines sturen de joysticks de cilinders van een graafmachine aan. Dat wil zeggen dat een beweging met een joystick ervoor zorgt dat de graafarm zo wordt bewogen dat de graafbak een cirkelvormige beweging volgt (zie fig. 2 links). Wanneer een veld horizontaal geëgaliseerd moet worden, een taak die nogal eens voorkomt bij graafwerkzaamheden, betekent dit dat twee cirkelvormige bewegingen zo gecombineerd moeten worden dat een rechte lijn ontstaat (zie fig. 3). In de regel zijn machinisten daartoe in staat. In de meeste graafmachines zorgt een grotere verplaatsing van de joystick in een bepaalde richting ervoor dat de graafbak in die richting sneller beweegt. Er zijn ook andere besturingsvormen, waarbij bijvoorbeeld de positie wordt bestuurd: beweging naar voren zorgt voor verplaatsing naar rato. Daarnaast is er soms sprake van 'force feedback'. Dit wil zeggen, dat wanneer de graafbak weerstand voelt, deze wordt teruggekoppeld via de joystick. De laatste vormen komen (nog) minder vaak voor.

Ir Mike de Neve is industrieel ontwerper aan de TU-Delft, afdeling Industrieel Ontwerp waar zijn collega's ir H. Kanis en ir J. Verlinden ook werken. Prof. Peter Vink is aan de TU-Delft verbonden als hoogleraar en werkt, evenals Drs. Frank Krause bij TNO Arbeid, team Ergonomische Innovatie, in Hoofddorp*

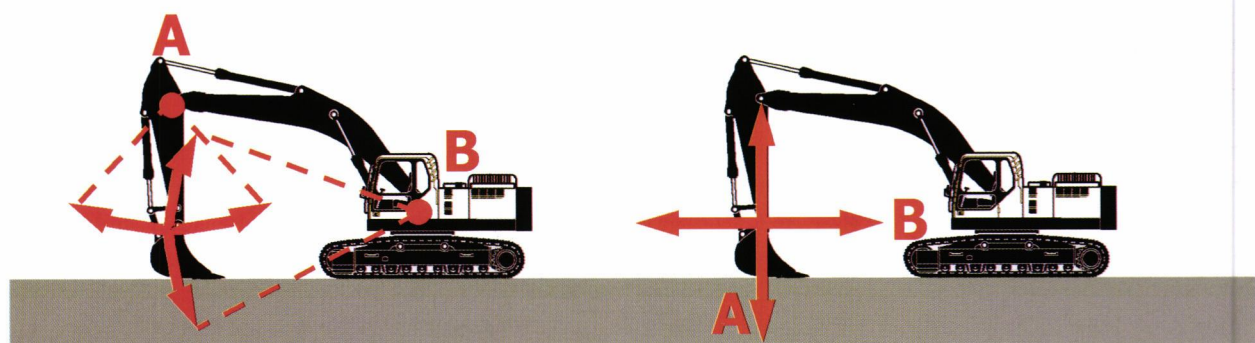
*correspondentieadres:
Mike de Neve, Molslaan 206 2611 CZ Delft,
e-mail: Mike@Neve.nl*



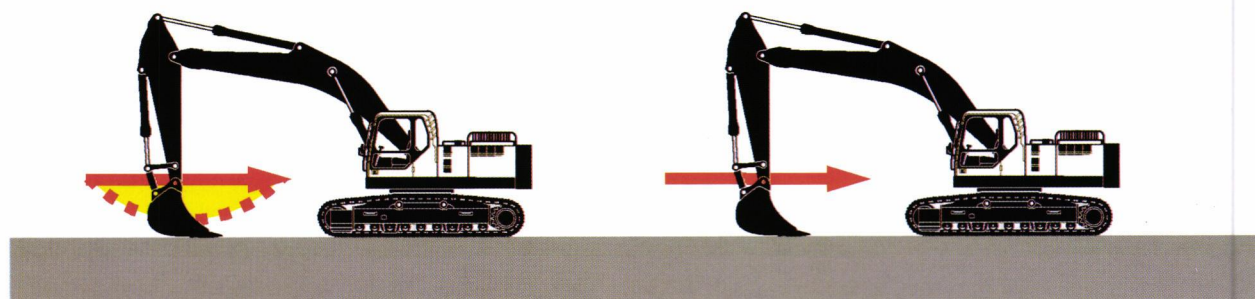
Figuur 1. De besturing met handels (links) is een jaar of tien geleden vervangen door de joystickbesturing (rechts)

Wallersteiner e.a. (1993) beschrijft een orthogonale besturing voor boomstamladers. Dit houdt in dat met de joystick een artefact wordt bestuurd dat in rechte lijnen wordt bewogen. Het zijn drie lijnen loodrecht op elkaar. De beweging van bijvoorbeeld een graafbak van links naar rechts wordt bestuurd door de joystick van links naar rechts te verplaatsen. De verticale lijn kan met de andere joystick bestuurd worden. Het veronderstelde voordeel van deze besturing is dat het eenvoudiger is aan te leren, omdat het een logische koppeling met de joystick is en omdat wij eerder denken in een drie-assig rechtlijnig stelsel dan in krommingen. Bij het besturen van cylinders lijkt de taak complexer omdat de banen van de graafbak moeilijker voor te stellen zijn en de joystick beweging indirect is gekoppeld aan de uiteindelijk gewenste beweging.

In het voorstel van Wallerstein sturen twee joysticks elk in de voor-achterwaartse richting één van deze twee richtingen aan (zie fig 2 rechts). Wallersteiner e.a. (1993) geeft aan dat dit orthogonale besturingsconcept sneller zou worden aangeleerd. In zijn artikel wordt naast het sneller aanleren ook verondersteld dat orthogonaal bedienen minder bewegingen vergt dan traditioneel, omdat er minder 'bijgestuurd' hoeft te worden. Daardoor zou het werk ook sneller uitgevoerd kunnen worden of minder inspanning nodig zijn bij gelijkblijvende prestaties. Bijvoorbeeld bij het horizontaal egaliseren is de combinatie van bewegingen zoals bij de traditionele besturing niet nodig.



Figuur 2 Links de traditionele aansturing: de beweging van de joystick bewerkstelligt een rotatie van het betreffende onderdeel. Rechts de orthogonale besturing: door tussenkomst van een computer beweegt de graafmachine over horizontale en verticale lijnen.



Figuur 3 Bij een egaliseerwerkzaamheden moet een horizontale lijn gevolgd worden. Bij de traditionele bediening moet de cirkelboog gecorrigeerd worden (links). Bij de orthogonale bediening (rechts) kan direct een rechte lijn worden aangestuurd.

Om de veronderstelling te toetsen dat orthogonaal besturen beter is, is een pilotstudie verricht. In deze studie hebben deelnemers met zowel een traditioneel aangestuurde als met een orthogonaal aangestuurde 'graafmachine' dezelfde taken uitgevoerd. De onderzoeksvragen voor deze studie zijn:

1. is orthogonaal besturen sneller aan te leren dan traditionele besturing?
2. is het aantal joystickbewegingen minder bij orthogonale besturing vergeleken met traditionele besturing?
3. zorgt orthogonale besturing voor efficiëntere taakuitvoering dan traditionele besturing?

Methode

Om de onderzoeksvragen te beantwoorden is een experiment uitgevoerd met zeven rechtshandige deelnemers. Zij werden eerst geïnformeerd over de besturing van de graafmachine. Vervolgens mochten zij vijf minuten oefenen met een besturingssysteem. Daarna is een serie van vier opdrachten uitgevoerd. Na een pauze werd deze serie opdrachten herhaald en na een tweede pauze waarin enkele vragen werden gesteld werd de serie voor de tweede keer herhaald. Voor het andere besturingssysteem werd dezelfde procedure een dag later herhaald, beginnend bij het informeren. Drie deelnemers begonnen met orthogonale besturing, de overige deelnemers zijn begonnen met traditionele besturing.

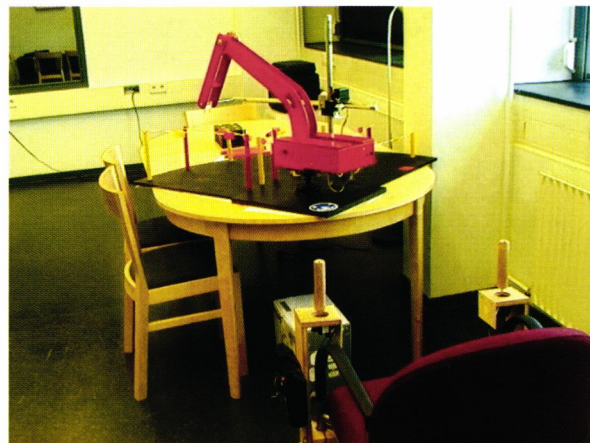
Omdat het tellen van het aantal bewegingen zeer tijdrovend bleek te zijn en het project in beperkte tijd afgerond moest worden, is van vier deelnemers het aantal bewegingen geteld; twee van de vier deelnemers begonnen met de orthogonale besturing, de andere twee met traditionele besturing. Overigens zijn de vier deelnemers willekeurig gekozen uit de oorspronkelijke zeven.

Van alle deelnemers is de snelheid geregistreerd en is nagegaan of deze snelheden significant verschillend waren (t-toets voor gepaard vergelijken, $p < 0,05$).

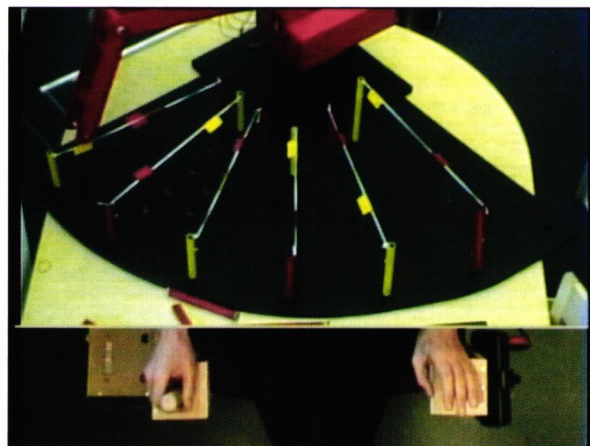
Opstelling

Een schaalmodel van een graafmachine zonder graafbak is gemaakt (1:10). Dit werd aangedreven door elektromotoren (zie fig. 4). De graafmachine werd bediend met joysticks, die aan de leuning van de stoel zijn bevestigd, zoals dit bij sommige graafmachines ook het geval is. De deelnemer is zo gepositioneerd dat goed uitzicht op de 'graafmachine' mogelijk was. De vier taken waren:

- langs rechte horizontale lijnen bewegen (vergelijkbaar met egaliseren);



Figuur 4. Proefopstelling met op de voorgrond de stoel met joystick, op de achtergrond het schaalmodel (1:10) aangedreven met elektromotoren



Figuur 5. Weergave van de camera's op het beeldscherm; boven: overzicht van de opstelling; beneden: de joysticks

- langs schuine lijnen bewegen (vergelijkbaar met talud graven);
- aantikken diverse punten (grondverzet);
- aantikken diverse punten dicht bij elkaar (graven tussen leidingen).

Bij de eerste twee opdrachten zijn de lijnen uitgevoerd met elastiek, zodat afwijkingen in de beweging goed zichtbaar zijn.

Metingen

Er zijn twee camera's opgesteld om het werk registreren. Eén legt de joystickbewegingen vast, de ander de bewegingen van de graafmachine. Beide beelden zijn op een monitor tegelijkertijd weergegeven (zie fig. 5). Het aantal bewegingen is in twee bewegingsrichtingen van de joystick geregistreerd. Een beweging is een op het scherm zichtbare beweging naar links, rechts, naar voren of naar achteren. Het aantal bewegingen werd vanaf de video-opnames na het experi-

ment geteld. Dit is gebeurd bij de twee bewegingsrichtingen. De snelheid van handelen is geregistreerd door de tijd per taak vast te leggen.

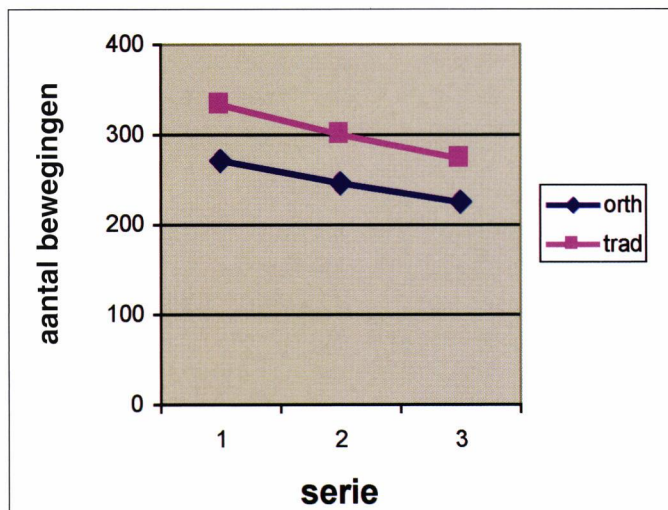
Achteraf zijn vragen gesteld over snelheid, gemak van leren en voorkeur aan de deelnemers.

Resultaten

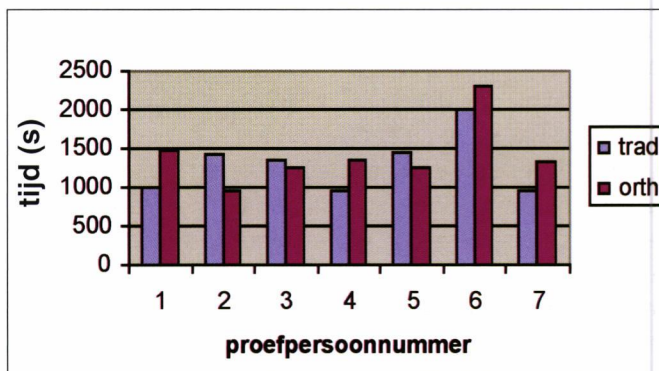
In figuur 6 is te zien dat het aantal bewegingen afneemt naarmate deelnemers meer series hebben geoefend. Wanneer we aannemen dat deze afname een indicatie voor het leren is, wordt bij beide methodes dus geleerd. Op basis van deze cijfers kan niet worden geconcludeerd tot een aantoonbaar verschil in leersnelheid: bij traditionele besturing bedraagt het gemiddelde aantal bewegingen bij de derde serie 81.4% van dat bij de eerste serie; voor de orthogonale besturing is dit percentage vrijwel gelijk: 82.1%. De variatie is zo groot dat diverse statistische toetsen geen verschil aantonen.

In figuur 6 is ook te zien dat het aantal bewegingen bij orthogonaal bedienen lager ligt dan traditionele besturing. Dit blijft zo na drie series. Vooral bij het taludgraven en het egaliseren blijkt het verschil groot te zijn. Twee ervaren machinisten zijn ook gevraagd de activiteit uit te voeren met de orthogonale besturing om na te gaan of beginners afwijken. De ervaren machinisten hadden een vergelijkbaar aantal bewegingen.

Figuur 6. Gemiddeld aantal bewegingen van vier proefpersonen van drie opdrachten die na elkaar zijn uitgevoerd.



Figuur 7. De geregistreerde tijd (in seconden) voor de zeven proefpersonen, voor de orthogonale bediening en de traditionele bediening.



In figuur 7 is te zien dat de benodigde tijd gemiddeld iets minder is bij orthogonale besturing. Dit verschil is echter niet significant. Drie van de zeven deelnemers tonen een tegenovergesteld beeld. Uit de observaties blijkt dat de deelnemers, die met de orthogonaal besturing zijn begonnen en daaraan gewend waren, geïrriteerd raakten bij het traditioneel besturen en de taken slordig uitvoerden. Dit lijkt zeker het aantal bewegingen en de tijd te hebben beïnvloed. Conclusies zijn dus uit deze data moeilijk te trekken.

Alle zeven deelnemers gaven aan dat de orthogonale besturing hun voorkeur heeft bij het totale opdrachtenpakket. Wanneer per opdracht wordt nagevraagd welke besturing de voorkeur heeft, komt een meer genuanceerd beeld naar boven. Men had voorkeur voor orthogonale besturing, maar drie deelnemers gaven aan dat voor de laatste twee opdrachten (aantikken), het besturingssysteem niet uitmaakte. Eén deelnemer gaf aan dat de laatste opdracht beter ging met het traditionele systeem.

De beantwoording van de drie onderzoeksvragen kan op basis van deze pilotstudy slechts indicatief gegeven worden, dit vanwege beperkingen in de studie. Ondanks deze indicatieve aard is de studie van belang, omdat er weinig onderzoek gedaan is dat de gestelde vragen kan helpen beantwoorden (Oliver, 2001). Op basis van deze studie lijkt het erop dat orthogonale besturing minder joystickbewegingen van de machinist vergt. Ook blijkt dat de voorkeur van de onervaren deelnemers uitgaat naar de orthogonale besturing met name voor taken als egaliseren en taludgraven. Dat irritatie bij de traditionele bediening is opgetreden nadat de orthogonale bediening is gebruikt, kan betekenen dat de eerste bediening makkelijker is geweest.

De beperkingen in deze studie zijn:

- onervaren deelnemers

In deze studie is merendeels gebruik gemaakt van deelnemers die niet met graafmachines werken. Het voordeel is dat zij nog niet belast zijn met gewinning met één van beide systemen. Het nadeel is dat zij geen machinist zijn en de proef kort is. In feite zou een nader onderzoek met machinisten in een echte graafmachine, die langere tijd met beide systemen hebben gewerkt noodzakelijk zijn om meer zekerheid te krijgen over de zeggingskracht van waargenomen verschillen.

- proefopstelling

De proefopstelling is niet vergelijkbaar met echt graafwerk, omdat de deelnemer niet op de graafmachine zit en dus niet meedraait. Overigens geldt dit in het experiment wel voor beide besturingen (orthogonale en traditioneel).

- beperkt aantal deelnemers

Het aantal deelnemers is beperkt. Anderzijds geven alle deelnemers de voorkeur aan de orthogonale besturing.

In de toekomst zullen meer machines met 'drive by wire' worden uitgerust. Net als bij vliegtuigen zullen computers de machine aansturen. Dat betekent dat er meer mogelijkheden zijn om de besturing op de mens af te stemmen. Deze studie toont aan dat orthogonaal besturen voordelen kan hebben. Deze indicatie betekent dat het de moeite loont bij computerisering te denken in besturing in rechte lijnen in plaats van in cirkels.

Conclusie

Deze studie levert de indicatie dat orthogonaal bedienen van graafmachines een verbetering is ten opzichte van de huidige systemen. Bij het taludgraven en egaliseren lijken de voordelen vooral te vinden in het werken met minder bewegingen. Onervaren deelnemers geven de voorkeur aan het orthogonale bedienen. Aanbeveling is om deze wijze van bedienen verder uit te testen op echte machines.

Referenties

- Krause, F.** 2003 Joystick controls and consoles: the implications of joystick use for the design of the joystick console (or control console). In: Krause, F., Bronkhorst, R.E., Looze, M.P. de, (eds). *Comfortable earth moving machinery: knowledge and experiences from the Eurocabin project*. Hoofddorp: TNO Work and Employment, 2003:55-64.
- Kuijt-Evers, L.F.M., Krause, F. en Vink, P.** 2003 Aspects to improve cabin comfort of wheel loaders and excavators according to operators. *Applied Ergonomics* 2003;34(3):265-272.
- Looze, M.P. de, Roetting, M., Vink, P. en Luczak, H.** 2000 Towards comfortable and efficient man-machine interaction in the cabins of vehicles. *Proceedings of the IEA 2000/ HFES 2000 Congress*. July 29 - August 4, 2000, San Diego, California USA (p. 3-340). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomic Society.
- Oliver, M.L.** 2001 Joystick dynamics and the effects of stiffness and speed on upper limb kinematics. Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering) Thesis, University of New Brunswick, National Library of Canada, 2001.
- Wallersteiner, U., Lawrence, P. en Sauders, B.** 1993 A human factors evaluation of two different control systems for log loaders, *Ergonomics* 1993 vol. 26, no. 8 927-934.

Abstract

Operators of earth moving machines face problems with the controls indicating possibilities to improve controls. Traditionally, the joystick steers the cylinders of the machine resulting in curved lines of the shovel. In the future, when 'drive by wire' is introduced in earth moving machines, 'orthogonal steering' is possible as a potential improvement. A joystick using an orthogonal principle steers the shovel in straight lines in forward-backward direction, high-low direction and left-right direction. Seven subjects participated in a repeated design during both steering techniques in a simulated environment. All seven subjects preferred the orthogonal system and the number of movements of the operator are reduced in orthogonal steering. Whether these results will be valid in a real earth moving machine environment has to be studied next.

