

APPENDIX

NUMERICAL DATA OF CHAPTER 5

This appendix presents most of the results of the experiment described in Chapter 5. In Chapter 5, the results were presented in graphical format. What follows is the same data but presented in tables.

A.1 Performance

Table A-1
Mean completion times in seconds
per session

Session	M	SD	n
1	73	20	8
2	57	6	8
3	58	8	8
4	45	6	8
5	46	4	8
6	42	6	8

Table A-2
Completion times in seconds on the
second day for each condition

Condition	M	SD	n
DepSep	44	10	6
IndComb	46	4	6
IndNo	44	4	6
IndSep	43	1	6

Table A-3
Mean combined clutch times as
percentage of the completion time
on the second day

Condition	M	SD	n
DepSep	14	18	6
IndComb	1	1	6
IndNo	0	0	6
IndSep	1	1	6

APPENDIX

A.2 Workload

The data of the workload variables distance and rotation is based on the results of the second day.

A.2.1 Distance

Table A-4
Distance of non-dominant hand Frog
in centimeters for each condition

Condition	M	SD	n
DepSep	3741	1391	6
IndComb	5045	1340	6
IndNo	5964	867	6
IndSep	3994	290	6

Table A-5
Distance of dominant hand Frog in
centimeters for each condition

Condition	M	SD	n
DepSep	3773	342	6
IndComb	5247	609	6
IndNo	5462	1278	6
IndSep	4081	385	6

Table A-6
Combined distance in centimeters
for each condition

Condition	M	SD	n
DepSep	7514	1512	6
IndComb	10291	1890	6
IndNo	11425	2025	6
IndSep	8075	455	6

Table A-7
Percentage of non-dominant hand
distance for each condition

Condition	M	SD	n
DepSep	66	15	6
IndComb	15	16	6
IndNo	12	14	6
IndSep	37	7	6

A.2.2 Rotation

Table A-8
Rotation of non-dominant hand Frog in radians for each condition

Condition	M	SD	n
DepSep	49	18	6
IndComb	52	11	6
IndNo	51	8	6
IndSep	52	12	6

Table A-9
Rotation of dominant hand Frog in radians for each condition

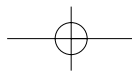
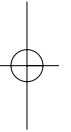
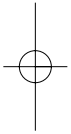
Condition	M	SD	n
DepSep	24	7	6
IndComb	28	5	6
IndNo	23	4	6
IndSep	23	8	6

Table A-10
Combined rotation in radians for each condition

Condition	M	SD	n
DepSep	73	20	6
IndComb	81	12	6
IndNo	74	8	6
IndSep	76	8	6

Table A-11
Percentage of non-dominant hand rotation for each condition

Condition	M	SD	n
DepSep	67	10	6
IndComb	65	7	6
IndNo	68	6	6
IndSep	69	12	6



REFERENCES

- Apple Computer Inc. (1993). *Macintosh Human Interface Guidelines*, Reading, MA: Addison Wesley. (Also on-line, available WWW: <http://devworld.apple.com/techpubs/mac/HIGuidelines/HIGuidelines-2.html>).
- Baber, C. (1997). *Beyond the Desktop*. San Diego, CA: Academic Press.
- Baecker, R. M. & Buxton, W. (1987). *Readings in Human-Computer Interaction: A Multidisciplinary Approach* (pp. 357-365). Los Altos, CA: Kaufman.
- Balakrishnan, R. & Hinckley, K. (1999). *The Roles of Visual and Kinesthetic Feedback in Two-Handed Input Performance*. Manuscript submitted for publication.
- Bier, E. A. (1986). Skitters and Jacks: interactive 3D positioning tools. *Proceedings of the 1986 Workshop on Interactive 3D graphics*, 183-196.
- Bier, E. A., Stone, M. C., Pier, K., Buxton, W. & DeRose, T. D. (1993). Toolglass and Magic Lenses: The See-Through Interface. *Proceedings of SIGGRAPH 93, Computer Graphics Annual Conference Series*, 73-80.
- Brookshire Conner, D., Snibbe, S. S., Hemdon, K. P., Robbins, D. C., Zeleznik, R. C. & Dam, A. van (1992). Three-Dimensional Widgets. *Proceedings 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics*, 183-188.
- Buxton, W. (1983). Lexical and Pragmatic Considerations of Input Structures. *Computer Graphics 17*, 31-37.
- Buxton, W. & Myers, B. (1986). A study in two-handed input. *Proceedings of CHI '86*, 321-326.
- Buxton, W. (1990). A three state model of graphical input. In Diaper et al. (Eds.), *Human-Computer Interaction - INTERACT '90*, (pp. 449-456). Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Buxton, W. & Fitzmaurice, G. W. (1998). HMD's, Caves & Chameleon: A Human-Centric Analysis of Interaction in Virtual Space. *Computer Graphics, The SIGGRAPH Quarterly*, 32(4), 64-68.
- Card, S. K., Mackinlay, J. D. & Robertson G. G. (1991). A Morphological Analysis of Input Devices. *ACM Transactions on Information Systems* 9(2), 99-122.
- Chatty, S. (1994). Extending a Graphical Toolkit for Two-Handed Interaction. *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology UIST '94*, 195-204.
- Chen, M., Mountford, S. J. & Sellen, A. (1988). A Study in Interactive 3-D Rotation Using 2-D Control Devices. *Proceedings of SIGGRAPH '88*, 121-129.
- Chung, J. C. (1992). A comparison of Head-tracked and Non-head-tracked Steering Modes in the Targeting of Radio Therapy Treatment Beams. *Proceedings 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics*, 193-196.
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J. & DeFanti, T. A. (1993). Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH '93)*, 135-142.
- Dijk, C. G. C. van (1994). Interactive modeling of transfinite sketched design curves (Doctoral dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1994), ISBN 90-407-1037-6.

REFERENCES

- Djajadiningrat, J. P., Overbeeke, C. J. & Smets, G. J. F. (1997). The importance of the number of degrees of freedom for rotation of objects, *Behaviour & Information Technology* 16(2), 337-347.
- Djajadiningrat, J. P. (1998). *Cubby, What You See Is Where You Act* (Doctoral dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1998), ISBN 90-9011724-5.
- Djajadiningrat, J. P. & Gribnau, M. W. (1998). Desktop VR using QuickDraw 3D, Part 1. *MacTech* 14(7), 32-43.
- Engelbart, D. C. & English, W. K. (1968). A Research Center for Augmenting Human Intellect. *AFIPS Conference Proceedings of the 1968 Fall Joint Computer Conference* 33, 395-410. (Also on-line, available WWW: <http://www.histech.rwth-aachen.de/www/quellen/engelbart/ResearchCenter1968.html>)
- Douglas, S. A. & Mithal, A. K. (1997). *The Ergonomics of Computer Input Devices*, London: Springer.
- Feiss D. (Director) (1997). *Cow and Chicken*. Atlanta: Cartoon Network.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381-391.
- Foley, J. D. & Dam, A. van (1982). *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*, Reading, MA: Addison-Wesley.
- Foley, J. D., Wallace, V. L. & Chan, P. (1984). The Human Factors of Computer Graphics Interaction Techniques. *IEEE Computer Graphics and Applications* 4(11), 13-47.
- Galyean, T. A. & Hughes, J. F. (1991). Sculpting: An Interactive Volumetric Modeling Technique. *Computer Graphics* 25(4), 267-274.
- Gibbs, C. B. (1962). Controller design: Interactions of controlling limbs, time-lags and gains in positional and velocity systems. *Ergonomics* 5(2), 385-402.
- Goldman, R. N. (1991). Recovering the data from the transformation matrix. In Arvo, J. (Ed.), *Graphic Gems II* (pp. 324-331). San Diego, CA: Academic Press.
- Green, M., Liang, J. & Shaw, C. (1995). Interactive 3D Geometrical Modelers for Virtual Reality and Design. *International Conference on Virtual Systems and Multimedia '95*, 29-36.
- Gribnau, M. W. & Pasman, G. (1996). TIME: Three-Dimensional Input, Modification and Evaluation. *CHI '96 Conference Companion* (CHI 96 Conference Proceedings), 400-401.
- Gribnau, M. W. & Hennessey, J. M. (1998). Comparing Single- and Two-handed 3D Input for a 3D Object Assembly Task. *CHI 98 Summary* (CHI 98 Conference Proceedings), 233-234.
- Gribnau, M. W., Verstijnen, I. M. & Hennessey, J. M. (1998). Three Dimensional Object Orientation Using the Non-Dominant Hand, *Proceedings of the 4th International Conference on Design and Decision Support Systems*, [CD-ROM].
- Gribnau, M. W. & Djajadiningrat, J. P. (1998). Desktop VR using QuickDraw 3D, Part 2. *MacTech* 14(8), 26-34.
- Gribnau, M. W. & Hennessey, J. M. (1999). Designers are two-handed (Bimanual, 3D interaction techniques for computer supported conceptual modeling). Submitted to the 4th Asian Design Conference.

- Groen, J. & Werkhoven, P. J. (1998). Visuomotor Adaptation to Virtual Hand Position in Interactive Virtual Environments. *Presence*, 7(5), 429-446.
- Guiard, Y. (1987). Asymmetric Division of Labor in Human Skilled Bimanual Action: The Kinematic Chain as a Model. *Journal of Motor Behavior*, 19(4), 486-517.
- Hammerton, M. & Tickner, A. H. (1966). An investigation into the comparative suitability of forearm, hand, and thumb controls in acquisition tasks. *Ergonomics* 9(2), 125-130.
- Hand, C. (1997). A Survey of 3D Interaction Techniques. *Computer Graphics forum* 16(5), 269-281.
- Henry, T. R., Hudson, S. E., Yeatts, A. K., Myers, B. A. & Feiner, S. (1991) A Nose Gesture Interface Device: Extending Virtual Realities. *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 65-68. Reprinted in 1992. *Presence* 1(2).
- Hennessey, J. M. (1994). Exploring Computer Enhancements for Conceptualizing. In Tzonis A. & White, T. (Eds.), *Automation Based Creative Design, Research and Perspectives* (pp. 349-362). Amsterdam: Elsevier Science.
- Hennessey, J. M., Gribnau, M. W., Stuyver, R. (1995). Two-handed modeling of three-dimensional computerized objects with the help of specialized input devices. *HCI'95 Adjunct Proceedings*, 13-16.
- Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J. C. & Kassell, N. F. (1994a). A Survey of Design Issues in Spatial Input. *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology UIST'94*, 213-222.
- Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J. C. & Kassell, N. F. (1994b). Passive real-world props for neurosurgical visualization. *ACM CHI'94 Conference on Human Factors in Computing Systems*, 452-458.
- Hinckley, K., Tullio, J., Pausch, R., Proffitt, D. & Kassell, N. (1997). Usability Analysis of 3D Rotation Techniques. *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology UIST'97*, 1-10.
- Hinckley, K., Pausch, R. & Proffitt, D. (1997). Attention and Visual Feedback: The Bimanual Frame of Reference. *Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics*, 121-126.
- Hinckley, K., Pausch, R., Proffitt, D., Patten, J. & Kassell, N. (1997). Cooperative Bimanual Action. *Proceedings of the CHI'97*, 27-34.
- Jacob, J. K., Leggett, J. J., Myers, B. A. & Pausch, R. (1993). Interaction styles and input/output devices. *Behaviour & Information Technology*, 12(2), 69-79.
- Jacob, I. & Oliver, J. (1995). Evaluation of Techniques for Specifying 3D Rotations with a 2D Input Device. *Proceedings of the HCI'95 Conference*, 73-76.
- Kabbash, P., Buxton, W. & Sellen, A. (1994). Two-Handed Input in a Compound Task. *ACM CHI'94 Conference on Human Factors in Computing Systems*, 417-423.
- Kabbash, P., MacKenzie, I. S. & Buxton, W. (1993). Human Performance Using Computer Input Devices in the Preferred and Non-Preferred Hands. *Proceedings of InterCHI '93*, 474-481.
- Kurtenbach, G., Fitzmaurice, G., Baudel, T. & Buxton, W. (1997). The Design of a GUI Paradigm based on Tablets, Two-hands, and Transparency. *Proceedings of the CHI'97*, 35-42.

REFERENCES

- Langolf, G. D., Chaffin, D. B. & Foulke, J. A. (1976). An Investigation of Fitt's law Using a Wide Range of Movement Amplitudes. *Journal of Motor Behavior*, 8(2), 113-128.
- Leganchuk, A., Zhai, S. & Buxton, W. (1998). Manual and Cognitive Benefits of Two-Handed Input: An Experimental Study. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 5(4), 326-359 (Also on-line, available WWW: <http://www.dgp.toronto.edu/OTP/papers/bill.buxton/ToCHI2H.html>).
- Liang, J. & Green, M. (1993). Geometric Modeling Using Six Degrees of Freedom Input Devices. *3rd International Conference on CAD and Computer Graphics* (Beijing, China, August 23-26), 217-222.
- Liang, J. & Green, M. (1993). Interaction techniques for a highly interactive 3D geometric modeling system. *Proceedings on the second symposium on Solid modeling and applications*, 475-476.
- Liker, J. K., Fleisher, M., Nagamachi, M. & Zonneville, M. S. (1992). Designers and their Machines: CAD Use and Support in the US and Japan. *Communications of the ACM* 35(2), 77-95.
- MacKenzie, C. L. & Iberall, T. (1994). *The Grasping Hand* (G. E. Stemach, & P. A. Vroom, Eds.). Amsterdam: Elsevier Science.
- Mackinlay, J., Card, S. & Robertson (1990). A Semantic Analysis of the Design Space of Input Devices. *Human-Computer Interaction* 5, 145-190.
- Magrab, E. B. (1997). *Integrated Product and Process Design and Development*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Mapes, P. M. & Moshell, M. (1995). A Two-Handed Interface for Object Manipulation in Virtual Environments. *Presence*, 4(4), 403-416.
- Mine, M. (1996). CHIMP: Chapel Hill Immersive Modeling Program [On-line]. Available WWW: http://www.cs.unc.edu/_mine/chimp.html
- Muller, W. (1997). *Vormgeven, ordening en betekenisgeving* [Order and meaning in design (English version in press)]. Utrecht, The Netherlands: Lemma.
- Multigen Inc. (1999) SmartScene. [On-line]. Available WWW: <http://www.multigen.com/products/smarts.htm>
- Nixon, M. A., McCallum, B. C., Fright, W. F. & Price, N. B. (1998). The Effects of Metals and Interfering Fields on Electromagnetic Trackers. *Presence*, 7(2), 204-218.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologica*, 9, 97-113.
- Pasman, W. (1997). Enhancing x-ray baggage inspection by interactive viewpoint selection. (Doctoral dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1998). ISBN 90-9010959-5.
- Poulton, E. C. (1974). *Tracking Skill and Manual Control*. New York: Academic Press.
- Poupyrev, I. & Billinghurst, M. (1996). The Go-Go Interaction Technique: Non-Linear Mapping for Direct Manipulation in VR. *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology UIST '96*, 79-80.
- Redmond-Pyle, D. & Moore, A. (1995). *Graphical User Interface Design and Evaluation; a practical guide*. London: Prentice Hall.

- Roberts, A., Sachs, E. & Stoops, D. (1990). 3-Draw: A Three Dimensional Computer-aided Design Tool. *Proceedings of The 1990 ASME International Computers in Engineering Conference and Exposition*, 299-307.
- Roozenburg, N. F. M. & Eekels, J. (1991). *Produktontwerpen, structuur en methoden*. [Product design, structure and methods]. Utrecht, The Netherlands: Lemma.
- Sachs, E., Roberts, A. & Stoops, D. (1991). 3-Draw: A Tool for Designing 3D Shapes. *IEEE Computer Graphics & Applications* 11, 18-26.
- Schneiderman, B (1987). *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Shaw, C. & Green, M. (1994). Two-Handed Polygonal Surface Design. *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology UIST'94*, 205-212.
- Shimizu, Y., Kojima, T., Tano, M. & Matsuda, S. (1991). *Models & Prototypes, Clay, Plaster, Styrofoam, Paper*. Tokyo: Graphic-sha Publishing.
- Shoemake, K.. ARCBALL: A User Interface for Specifying Three-Dimensional Orientation Using a Mouse [On-line]. Available FTP: Hostname: ftp.cis.upenn.edu Directory: pub/graphics/arcball File: arcballpaper.sea.hqx
- Stappers, P. J. & Hennessey, J. M. (1999). Computer Supported Tools for the Conceptualization Phase. *Proceedings 4th International Design Thinking Research Symposium on Design Representation*, II.177-II.188.
- Stoackley, R., Conway, M. J. & Pausch, R. (1995). Virtual Reality on a WIM: Interactive Worlds in Miniature. *CHI '95 Conference Proceedings*, 265-272.
- Tangelder, J. W. H. (1998). Automated Fabrication of Shape Models of Free-form Objects with a Sculpturing Robot (Doctoral dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1998). ISBN 90-9011783-0.
- Tangelder, J. W. H., Vergeest, J. S. M. & Overmars, M. H. (1998). Interference-free NC machining using spatial planning and Minkowski operations. *Computer Aided Design*, 30(4), 277-286.
- Tendick, F., Jennings, R. W., Tharp, G. & Starck, L. (1993). Sensing and manipulation problems in endoscopic surgery: experiment, analysis and observation. *Presence* 2(1), 66-81.
- Todor, J. I. & Doane, T. (1978). Handedness and hemispheric asymmetry in the control of movements. *Journal of Motor Behavior*, 10, 239-261.
- Tovey, M. (1986). Thinking styles and modelling systems. *Design Studies* 7(1), 19-30.
- Tovey, M. (1989). Drawing and CAD in industrial design. *Design Studies* 10(1), 24-39.
- Tovey, M. (1992). Intuitive and objective processes in automotive design. *Design Studies* 13(1), 23-41.
- Vaart, A. J. M. van der (1995). *Arm movements in operating rotary controls*. Delft, The Netherlands: Delft University Press.
- Verstijnen, I. M., Stuyver, R., Hennessey, J. M., Leeuwen, C. C. van & Hamel, R. (1996). Considerations for Electronic Idea-Creation Tools. *CHI '96 Conference Companion*, 197-198

REFERENCES

- Verstijnen, I. M. (1997). Sketches of Creative Discovery, A Psychological Inquiry into the Role of Imagery and Sketching in Creative Discovery (Doctoral dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1997). *Dissertation Abstracts International DAI-C 58/03*, p. 1138.
- Wallace, V. L. (1976). The Semantics of Graphic Input Devices. *Proceedings of SIGGRAPH/SIGPLAN Symposium on Graphical Languages*, 61-65.
- Ware, C., Arthur, K. & Booth, K. S. (1993). Fish tank virtual reality. *INTERCHI '93 Conference Proceedings*, 37-42.
- Ware, C. (1990). Using Hand Position for Virtual Object Placement. *The Visual Computer* 6, 245-253.
- Westin, S. H. (1998). Computer-Aided Industrial Design. *Computer Graphics* 32(1) 49-52.
- Zeid, I. (1991). *CAD/CAM Theory and Practice*. New York : McGraw-Hill.
- Zelevnik, R. C., Forsberg, A. S. & Strauss, P. S. (1997). Two Pointer Input For 3D Interaction. *Proceedings 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics*, 115-120.
- Zhai, S. (1995). Human Performance in Six Degree of Freedom Input Control (Doctoral dissertation, University of Toronto, Toronto, Canada, 1995). (Also on-line, available WWW: http://vered.rose.toronto.edu/people/shumin_dir/papers/PhD_Thesis/top_page.html).
- Zhai, S., Buxton, W. & Milgram, P. (1994). The "Silk Cursor": Investigating Transparency for 3D Target Acquisition. *ACM CHI '94 Conference on Human Factors in Computing Systems*, 459-464.
- Zhai, S., Milgram, P. & Buxton, W. (1996). The Influence of Muscle Groups on Performance of Multiple Degree-of-Freedom Input. *Proceedings of the CHI 96*, 308-31.

SUMMARY

TWO-HANDED INTERACTION IN COMPUTER SUPPORTED 3D CONCEPTUAL MODELLING

The goal of this project was to identify, create and evaluate improvements to computer systems that support the designer in geometric modeling during the conceptual phase of design. When current computer aided design (CAD) systems are evaluated, it can be seen that the majority of systems are suited for use in the later phases of the design process. It was established that computerized modeling in the conceptual phase of the design process poses entirely different requirements on computer systems than the tasks in the later phases of the design process. For example, in conceptual modeling, precision is not as important as the quick generation, comparison and evaluation of concepts is. Since there is an obvious mismatch of goals, it is difficult to use tools created for the later phases of the design process for conceptual design.

Current CAD systems often have the same setup with a mouse, a keyboard and a monitor. It was with this setup and the associated interfaces that a number of problems were identified. All interactions with the computer take place through the keyboard and mouse. When a mouse is used for the modeling of 3D objects, the designer is presented with one interaction device that registers movements in two dimensions. However, when the designer is using the traditional tools for the modeling of physical models, both hands can be used and moved freely for optimal control over the forming of the design. In CAD applications, several solutions can be found to overcome the difficulties of using a 2D mouse for the manipulation of 3D models. Nonetheless, all the solutions introduce a barrier between the designer and the task of creating a 3D model. For instance, when the designer needs to position an object in a certain location and orientation, this has to be accomplished (in present CAD systems) in a series of successive movements and rotations. In addition, most CAD systems are operated with one hand only. Typical use of the second hand is limited to the pressing of keys on the keyboard. The traditional modeling tools in the

workshop however, allow both hands to be used in unison with the advantage that the designer can position and manipulate at the same time. With conventional CAD systems, it is as if the object is clamped in a vice for the duration of the manipulation and the designer needs to switch between positioning the model and manipulating it.

In this research, it has been studied how spatial interaction (with input devices that can be moved freely) and two-handed manipulation can be used to make computer systems better suited for geometric modeling in conceptual design. Neither spatial interaction nor two-handed manipulation is commonly used for interacting with computer applications. However, previous research has established their potential for creating efficient computer interfaces that are easy to operate. Since these forms of interaction had been applied only in a few experimental systems and in even fewer commercial applications, there was no system available for experimentation. Therefore, a considerable amount of work was invested during this research in the creation of interaction devices and modeling software to develop and test interface designs.

The constructive phase was followed by an evaluation of bimanual spatial interaction. In two stages, advantages of two-handed spatial interaction were established and preferred interaction techniques were determined. First, a comparison of one- and two-handed operation was conducted. An assembly task was chosen to resemble a common conceptual design task in which different components of a design are rearranged. The results of two experiments showed that bimanual operation was faster than single-handed operation. In addition, the use of two hands did not increase the amount of movement and rotation of the hands. Instead, bimanual operation led to an almost equal division of workload between the two hands. Compared to single-handed operation, bimanual operation thus led to a reduction of the workload of the hand used for one-handed operation.

In the second stage of the evaluation, two aspects of bimanual spatial interaction were compared to determine the influence on performance and workload. The first aspect tested was the selection mechanism that was used to identify objects and subsequently move them. The selection mechanism that was used in the comparison of

one- and two-handed operation, dependent selection, proved useful for the assembly task. However, it was considered less useful for tasks other than assembly such as editing tasks in which one hand is used to hold an object while the other is operating on it. Therefore, an alternative selection mechanism was developed that was called independent selection. With dependent selection, the user operates one cursor to identify objects. The cursor is operated with one hand while the selection of objects, moved with the other hand, depends on the objects dragged with the cursor. With independent selection, two cursors are available so that the user can determine which objects to move with which hand. The experimental results showed that both selection techniques were equally fast and led to the same amount of workload. It was concluded that independent selection was the preferred technique because of its general applicability.

The other aspect investigated in the second stage of the evaluation was the clutch mechanism of the system. With spatial interaction without a clutch mechanism, users need to hold their hands in the air frequently. This can cause fatigue, especially when the system is used for a considerable time. A clutch mechanism can reduce the fatigue problem considerably. It allows users to readjust their posture while working with the system. Clutching has the effect that the manipulation space (the space where users move their hands) is displaced from the display space (the space where users observe the results of their actions). A concern was that this would influence performance negatively because, with the clutch mechanism, interaction would be less direct. However, the results of the experiment showed that performance for the two clutch mechanisms was the same as a situation without a clutch mechanism. Therefore, it was concluded that the clutch mechanism should be part of systems with spatial interaction.

By developing a two-handed system with spatial interaction and evaluating it, it was established that two-handed spatial manipulation does have advantages for computer supported geometric modeling in the conceptual phase of design. Spatial interaction can lead to responsive interfaces for modeling that allow a designer to work directly in 3D. In addition, it was found that it is also easy to learn. In the experiments, subjects quickly adapted to spatial interaction although they had never been operating a computer

TWO-HANDED INTERACTION IN COMPUTER SUPPORTED 3D CONCEPTUAL MODELLING

with a spatial interface before. Two-handed interaction did have advantages for performance and workload over single-handed interaction. In addition, it can give a designer more control over the modeling task at hand. The combination of spatial and two-handed interaction can lead to interfaces with a more direct intuitive way of interaction that fits closer to the capabilities and skills of the designer than the interfaces of current CAD systems.

1999 Maarten W. Gribnau

SAMENVATTING

TWO-HANDED INTERACTION IN COMPUTER SUPPORTED 3D CONCEPTUAL MODELLING

Het doel van dit project was om verbeteringen te conceptualiseren, te creëren en te evalueren voor computer systemen die de ontwerper ondersteunen bij het geometrisch modelleren tijdens de conceptuele fase van het ontwerpen. Als men de huidige gereedschappen voor computer ondersteund ontwerpen (CAD, Computer Aided Design) beschouwt, blijkt dat deze meestal zijn bedoeld om de latere fases van het ontwerpproces te ondersteunen. Computer ondersteuning van de conceptuele fase stelt heel andere eisen aan een systeem. Zo is, tijdens de conceptuele fase, precisie minder belangrijk dan het snel kunnen genereren, vergelijken en evalueren van concepten. Het is daarom moeilijk dezelfde CAD gereedschappen te gebruiken voor het ondersteunen van zowel de vroegere als de latere fases van het ontwerpproces.

De huidige CAD systemen hebben vaak dezelfde opzet met een muis, een toetsenbord en een beeldscherm. Er werden een aantal tekortkomingen van deze opzet gevonden. De interactie met deze systemen vindt plaats door gebruik te maken van de muis en het toetsenbord. Wanneer de muis wordt gebruikt om ruimtelijke objecten vorm te geven, kan de ontwerper gebruik maken van één apparaat dat bewegingen in het platte vlak registreert. Met traditionele gereedschappen voor het manipuleren van fysieke modellen kan de ontwerper beide handen gebruiken en deze vrijelijk in de ruimte bewegen zodat de vorm nauwkeurig kan worden aangepast. In CAD programmatuur worden verschillende oplossingen toegepast die ervoor zorgen dat een muis kan worden gebruikt voor het vormgeven in drie dimensies. Toch vormen al die oplossingen een barrière tussen de ontwerper en de ruimtelijke vormgevings-taak. Zo kan de ontwerper met de huidige CAD systemen niet in één vloeiende beweging een voorwerp in een bepaalde stand in de ruimte zetten maar moeten daar verscheidene bewegingen in het platte vlak voor worden gemaakt. Bovendien zijn de huidige CAD systemen voornamelijk bedoeld voor gebruik met één hand. Vaak

kan de andere hand voor niet veel meer worden gebruikt dan voor het indrukken van toetsen op het toetsenbord. Aan de andere kant kan de ontwerper met het gereedschap in de werkplaats beide handen tegelijk gebruiken met als voordeel dat een model tegelijk kan worden gepositioneerd en gemanipuleerd.

In dit werk is onderzocht hoe ruimtelijke bediening (oftewel "spatial interaction" waarbij invoerapparatuur vrijelijk door de ruimte kan worden bewogen) met twee handen kan worden gebruikt om computer systemen beter geschikt te maken voor geometrisch modelleren tijdens de conceptuele fase van het ontwerpen. Zowel ruimtelijke bediening als tweehandige bediening worden nauwelijks toegepast voor interactie met computers ondanks het feit dat voorafgaand onderzoek heeft uitgewezen dat deze vormen van interactie kunnen leiden tot een efficiënte en eenvoudige manier van bediening. Omdat tweehandige ruimtelijke interactie slechts in een beperkt aantal experimentele systemen en in nog minder commerciële systemen wordt toegepast, was er geen systeem beschikbaar om mee te experimenteren. Daarom is een aanzienlijke hoeveelheid tijd geïnvesteerd in het ontwikkelen van invoerapparatuur en programmatuur waarmee verschillende vormen van ruimtelijke interactie met twee handen konden worden ontwikkeld en getest.

De constructieve fase werd gevolgd door een evaluatie van tweehandige ruimtelijke bediening. In twee stappen werden opeenvolgend de voordelen van tweehandige bediening getest en verschillende vormen van tweehandige bediening met elkaar vergeleken. Eerst werd tweehandige bediening vergeleken met eenhandige bediening van dezelfde taak. Daartoe werd een assemblage taak gekozen die geacht werd een gebruikelijke taak in de conceptuele fase van het ontwerpen te representeren. In deze fase worden namelijk regelmatig verschillende ruimtelijke verdelingen van de onderdelen van een ontwerp uitgeprobeerd. Uit de resultaten van twee experimenten werd gevonden dat tweehandige bediening sneller werkt dan eenhandige bediening. Daarnaast werd gevonden dat het gebruik van twee handen niet leidde tot een toename van de hoeveelheid verplaatsing en rotatie van de handen. In plaats daarvan werd een bijna evenredige verdeling van de werklust over de twee handen gevonden. In vergelijking met eenhandige bediening leidt tweehandige bediening dus tot een

afname van de werklust van de hand die gebruikt wordt voor eenhandige bediening.

In de tweede fase van de evaluatie werden twee aspecten van ruimtelijke bediening met twee handen vergeleken om de invloed op de snelheid van bediening en de werklust te bepalen. Het eerste aspect betrof het selectiemechanisme dat bepaalt hoe objecten kunnen worden geselecteerd en vervolgens bewogen kunnen worden. Het selectiemechanisme dat werd gebruikt in de vergelijking tussen één- en tweehandige bediening, afhankelijke selectie (oftewel "dependent selection"), bleek geschikt voor de assemblagetaak. Niettemin werd het minder geschikt geacht voor andere taken zoals het bewerken van een object waarbij één hand wordt gebruikt om het object vast te houden terwijl de andere de eigenlijke bewerking uitvoert. Daartoe werd een ander selectiemechanisme ontwikkeld dat onafhankelijke selectie ("independent selection") werd genoemd. Met afhankelijke selectie kan de gebruiker een cursor toepassen om objecten aan te wijzen. De cursor wordt bestuurd met één hand terwijl de andere hand kan worden gebruikt om een groep van objecten te bewegen die niet worden verplaatst door middel van de cursor. Bij onafhankelijke selectie zijn twee cursors beschikbaar zodat de gebruiker zelf kan bepalen welke objecten met welke hand worden bewogen. De resultaten van het experiment toonden aan dat beide selectiemechanismen tot dezelfde snelheid van bediening en tot dezelfde werklust leidden. De conclusie luidde dat onafhankelijke selectie de voorkeur verdient omdat het breder toepasbaar is.

Het andere aspect dat werd getest in de tweede fase van de evaluatie was het schakelmechanisme ("clutch mechanism") van het systeem. Bij ruimtelijke interactie zonder schakelmechanisme moeten gebruikers vaak bewegingen maken terwijl hun handen niet ondersteund zijn. Dat kan vermoeiend zijn, vooral wanneer het systeem gebruikt wordt voor langere tijd. Een schakelmechanisme kan dat probleem aanzienlijk verminderen. Het zorgt ervoor dat gebruikers hun houding kunnen veranderen terwijl ze met het systeem werken. Schakelen leidt ertoe dat de bewegingsruimte (de ruimte waarin de handen bewegen) kan worden verplaatst ten opzichte van de beeldruimte (de ruimte waarin het resultaat van de handelingen geobserveerd wordt). Een mogelijk nadeel was dat schakelen de snelheid van bediening negatief zou beïnvloeden

omdat het tot een minder directe manier van bediening zou leiden. Echter, de resultaten van het experiment toonden aan dat de snelheid van bediening niet negatief beïnvloed werd door het schakelmechanisme. Daarom werd geconcludeerd dat systemen met ruimtelijke interactie een schakelmechanisme zouden moeten hebben.

Door een tweehandig systeem te ontwikkelen met ruimtelijke interactie, kon worden vastgesteld dat ruimtelijke bediening met twee handen voordelen heeft voor computer ondersteuning van geometrisch modelleren tijdens de conceptuele fase van het ontwerpen. Ruimtelijke interactie kan leiden tot een directe manier van bediening waarmee de ontwerper rechtstreeks in de driedimensionale ruimte kan werken. Bovendien bleek dat het makkelijk is om te leren. In de experimenten bleken proefpersonen snel te wennen aan ruimtelijke interactie hoewel ze nog niet eerder een computer op die manier bediend hadden. Tweehandige bediening bleek voordelen te hebben voor zowel de snelheid van bediening als de werklast ten opzichte van eenhandige bediening. Daarnaast kan het de ontwerper meer controle geven over de modelleertaak. De combinatie van ruimtelijke interactie en tweehandige bediening kan leiden tot intuïtieve bedieningsvormen die beter aansluiten bij de capaciteiten en de talenten van ontwerpers dan de huidige CAD systemen.

1999 Maarten W. Gribnau

CURRICULUM VITAE

English Maarten Wim Gribnau was born on 5 September 1964 in Den Helder, The Netherlands. He obtained his VWO diploma at K.S.G. de Grundel in 1984 in Hengelo and started with the study Electrical Engineering at the Delft University of Technology. In 1992 and 1993 he worked for this faculty as researcher in the DIAC (Delft Intelligent Assembly Cell) project and graduated in 1993. His Master's thesis describes a technique for visualization of contours in three-dimensional data sets. In 1994, he joined the faculty of Industrial Design of the Delft University of Technology as a Ph.D. student and carried out his research on two-handed interaction in computer supported conceptual modeling. This thesis is the result of research in that period. Since January 1, he is employed at the same faculty as Assistant Professor.

Nederlands Maarten Wim Gribnau werd geboren op 5 september 1964 te Den Helder. In 1984 behaalde hij het VWO diploma aan de K.S.G. de Grundel te Hengelo (OV), waarna hij startte met de opleiding Elektrotechniek van de Technische Universiteit Delft. In 1992 en 1993 werkte hij als onderzoeker voor het DIAC (Delft Intelligent Assembly Cell) project van de Technische Universiteit Delft. In 1993, behaalde hij het ingenieursdiploma, met als afstudeeronderwerp een techniek voor het visualiseren van contouren in driedimensionale data. In 1994 is hij begonnen als Assistent In Opleiding bij de vakgroep Vormgeving van de faculteit Industrieel Ontwerpen aan de Technische Universiteit Delft. Dit proefschrift is het resultaat van het onderzoek naar tweehandige interactie met computer systemen voor conceptueel modelleren in die periode. Sinds 1 januari 1999 is hij als Universitair Docent verbonden aan genoemde vakgroep.

