Taktilt display for feedback i kikkhullskirurgi

TTK 4720 - Prosjekt høst 2004

Frode Efteland efteland@stud.ntnu.no

26.11.04

Forord

Denne oppgaven er en prosjektoppgave utført i 5 årstrinn ved Institutt for Teknisk Kybernetikk ved NTNU høsten 2004.

Hensikten med prosjektet er å utvikle en metode for tilbakekobling gjennom følesansen i kikkhullskirurgi. Flere og flere kirurgiske inngrep bruker denne teknikken (også kalt minimal invasiv kirurgi), noe som gir mange fordeler fremfor konvensjonell kirurgi. I en operasjonssituasjon bruker kirurgen hender og fingre som taktil tilbakekobling ved å berøre vev, blodårer, hjerte osv. Ved kikkhullskirurgi mister kirurgen denne berøringssansen fordi tilgangen til arbeidsområdet ofte er små hull i kroppen hvor det ikke er plass til noen fingre. Det langsiktige målet er å gi kirurgen denne følesansen tilbake.

Et taktilt display kan gjenskape en tilnærmet vilkårlig dynamisk overflategeometri. Oppgaven går ut på konstruksjon av et taktilt display basert på et antall dynamisk trykksatte kammer (hulrom) i en silikongummimasse, utvikling av PC-basert styresystem, og eksperimentell uttesting. Oppgaven gjennomføres i samarbeide med St. Olavs Hospital, med post doc Øyvind Stavdahl og stipendiat Maria Ottermo som veiledere.

Prosjektet er en videreføring av masteroppgaven til Tone Rossen Christensen våren 2004 [1] som lagde første generasjon av displayet.

Jeg vil rette en takk til mine veiledere samt faglærer Professor Tor Arne Johansen for en svært interessant oppgave og gode innspill underveis. Spesielt takk til Verksmester Arvid Lervold på mekanisk verksted som laget de fleste delene til det taktile displayet med nydelig håndtverk og stor presisjon.

Frode Efteland, Trondheim, 26.11.2004, NTNU

Innhold

Fo	orord		iii
In	nhol	d	v
Fi	gure	r	ix
Sy	ymbo	olliste	xiii
Sa	ammo	\mathbf{endrag}	xv
Ι	Pr	osjek	crapport xvii
1	Inn	lednin	g 1
2	Bak	grunn	sstoff 3
	2.1	Scenar	io
	2.2	Status	ved oppstart av prosjektet
3	Tak	tilt dis	play og fysiske komponenter 7
	3.1	Syster	alayout
		3.1.1	Komponenter i laboppstilling 8
		3.1.2	Om trykksensorer
		3.1.3	Skjema for digital ut og analog inn
		3.1.4	Programvare brukt i laboppstilling
		3.1.5	Utstyr for måling av overflategeometri
		3.1.6	Innkjøpte komponenter
	3.2	Mekar	isk konstruksjon
		3.2.1	Konstruksjon av støpemal
		3.2.2	Konstruksjon av silikonmodell

		3.2.3	Konstruksjon av trekasse	10
		3.2.4	Konstruksjon av struping	14
	3.3	Støpin	g av silikon	15
		3.3.1	Blandingsforhold silikon	15
		3.3.2	Prosedyre for støping	16
4	Dvi	namikk		19
	4.1	Dynan	nikk og responstider til laboppsett	19
	4.2	Dynan	nikk og responstider for taktilt display	20
	4.3	Total o	dynamikk	20
	4.4	Kalibr	ering av struping	23
5 Programmering i LabVIEW			ering i LabVIEW	25
	5.1	Maskii	nvareadressering	25
	5.2	Første	generasjons LabVIEW-applikasjon	25
	5.3	Om va	lg av programmeringsstruktur	25
	5.4	Andre	generasjons LabVIEW-applikasjon	26
		5.4.1	Forklaring til frontpanelet	28
		5.4.2	Forklaring til blokkdiagrammet	28
		5.4.3	Programhierarki	30
6	\mathbf{Sys}	temide	ntifikasjon	33
	6.1	System	nmodell	33
	6.2	Målese	eriematrise	34
	6.3	Prakti	sk gjennomføring av måleserie	34
		6.3.1	Prosedyre for måleserie i grove trekk	35
		6.3.2	Diskretisering av bilder i Matlab	36
6.4 Eksperimentell analyse ved minste kvadraters metode \ldots .		rimentell analyse ved minste kvadraters metode	37	
		6.4.1	Måledata	37
		6.4.2	Forbehandling av data	37
		6.4.3	Transformasjons matrisen T	39
		6.4.4	Trykkvektoren \hat{p}	40
		6.4.5	Tapsfunksjonen V og avviket e	40
		6.4.6	LS-estimering med begrensninger	42
		6.4.7	Alternativ transformasjons matrise T med vekting	43
	6.5	Result	at av minste-kvadraters metode	43

	7.1	Diskusjon	45			
		7.1.1 Mekanisk konstruksjon	45			
		7.1.2 Dynamikk til taktilt display og LabVIEW-program	46			
		7.1.3 Systemidentifikasjon	46			
	7.2	Konklusjon	49			
	7.3	Anbefaling	49			
D,	fore	ngon	51			
10	elera		91			
II	Α	ppendiks	53			
\mathbf{A}	Sigr	altabell for digital ut og analog inn	55			
	A.1	Digital ut	55			
	A.2	Analog inn	56			
в	Teg	ninger av laboppsett	57			
	B.1	Skisse digital ut	57			
	B.2	Skisse analog inn	58			
	B.3	Mekanisk arbeidstegning - Støpemal	59			
	B.4	Mekanisk arbeidstegning - Silikonmodell	60			
	B.5	Mekanisk arbeidstegning - Plate for slangetilkobling	61			
	B.6	Mekanisk arbeidstegning - Trekasse	62			
С	LabVIEW					
	C.1	Programnavn	63			
	C.2	Sample Pressure - analog inn	64			
	C.3	Set Valves - digital ut	66			
	C.4	Logging av kanaler til fil	67			
	C.5	Lagre referansetrykk til fil	67			
	C.6	Hastighetstest av ventiler	68			
D	Mat	tlabscript for diskretisering av overflategeometri	69			
	D.1	Scriptnavn	69			
	D.2	Diskretisering.m	69			
	D.3	TransformasjonsmatriseT.m	74			
\mathbf{E}	Nur	neriske data	79			
	E.1	Måledata	79			

	E.2 Numerisk transformasjonsmatrise T	79
\mathbf{F}	Silikon	83
	F.1 Blandingsforhold silikon fra produsent	83
	F.2 Silikonlim Elastosil E43	84
\mathbf{G}	Alternative deler	87
н	Foto av laboppsett	89

Figurer

Taktil sensor og taktilt display	3
Festo 3/2-veis pneumatisk ventil.	5
Layout laboppstilling for styring og regulering av taktilt display	7
Konstruksjon av støpemal i plast og plexiglass	10
Silikonmodell etter støping	11
Plate for slangetilkobling til silikonmodell	11
Skottgjennomføring for silikonkammerstørrelsene Ø47 og Ø15.7 med 4mm hur- tigkobling. Fabrikat: SMC type KQE04-00.	12
Den åpne silikonmodellen limes sammen med tilkoblingsplaten for luftslanger med silikonlim.	12
Pleksiglasskasse og silikonmodell	13
Skisse av silikonmodellen sammen med trekassen	13
Silikonmodellen og pleksiglasset skyves ned i trekassen	14
Trekassen stiver opp silikonmodellen	14
Prinsippskisse for struping av slanger	15
Pneumatisk 5/3 ventil	19
Sprangrespons på silikonkammer uten struping.	21
Sprangrespons av kanal 2 med struping. Stigetid ca 2.9 sekund	21
Forstørret plott av kammer 2 med settpunkt 50kPa. Avviket er ca $1\mathrm{kPa.}$	22
Sprangrespons med struping for kammer 1,5 og 14	23
Sprangrespons med struping. Forstørret plott av figur 4.5	24
Frontpanel til hovedprogram i LabVIEW.	27
Blokkdiagram til hovedprogram i LabVIEW.	29
Blokkdiagram for initialisering til hovedprogrammet	30
Blokkdiagram for avslutning av hovedprogrammet.	31
Programhierarki for TactileDisplay_b10.vi	31
	Taktil sensor og taktilt display Festo 3/2-veis pneumatisk ventil. Layout laboppstilling for styring og regulering av taktilt display Konstruksjon av støpemal i plast og plexiglass Silikonmodell etter støping Plate for slangetilkobling til silikonmodell Skottgjennomføring for silikonkammerstørrelsene Ø47 og Ø15.7 med 4mm hur- tigkobling. Fabrikat: SMC type KQE04-00. Den åpne silikonmodellen limes sammen med tilkoblingsplaten for luftslanger med silikonlim. Pleksiglasskasse og silikonmodell Skisse av silikonmodellen sammen med trekassen. Silikonmodellen og pleksiglasset skyves ned i trekassen. Silikonmodellen og pleksiglasset skyves ned i trekassen. Trekassen stiver opp silikonmodellen. Prinsippskisse for struping av slanger Pneumatisk 5/3 ventil Sprangrespons på silikonkammer uten struping. Sprangrespons ned struping for kammer 1,5 og 14. Sprangrespons med struping. Forstørret plott av figur 4.5. Frontpanel til hovedprogram i LabVIEW. Blokkdiagram til hovedprogram i LabVIEW. Blokkdiagram for initialisering til hovedprogrammet Programhierarki for Tact11eDisplay_b10.vi

6.1	Metode for måling av overflategeometri ved bruk av digitalt fotoapparat
6.2	Initialisering av måleserie vha digitalt fotoapperat. Et rektangel definerer arbeid- sområdet til det taktile displayet
6.3	Diskretisert kurve av fotomåling etter bildeanalyse i matlab
6.4	3D-plott av diskretisert måledata skalert i pixels. 42 målinger med en oppløsning på 923 pixels.
6.5	Plott av diskretiserte kurver fra måledata. Samme plott som 3D-figur 6.4 men skalert i millimeter
6.6	Estimatplott med biasfeil pga fratrekk i middelverdi
6.7	Plott av måleserie nr 18 av 42. Legg merke til de negative verdiene i predikert trykk <i>p</i> . Stort avvik mellom virkelig og estimert geometri <i>y</i>
6.8	Tapsfunksjon V for systemet som gir negativ trykkverdier. Måling nr 18 skiller seg ut med stort avvik
6.9	Estimering av $p \mod lsqlin()$ i matlab
6.10	Tapsfunksjon V med lsqlin()
6.11	Sammenlikning av ønsket geometri og gjenskapt geometri.
6.12	Sammenlikning av ønsket og gjenskapt geometri i ulineær skala
7.1	Plott av geometri, avvik og trykk korrigert for middelverdi.
7.2	Tapsfunksjon V korrigert for middelverdi.
7.3	Plott av måling nr 27 som ga det største avviket ved fra trekk av middelverdi $\ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ $
A.1	Signaltabell for digital ut. Fra silikonkammer til LabVIEW.
A.2	Signaltabell for analog inn. Fra silikonkammer til LabVIEW.
C.1	analog_in_median2.vi
C.2	analog_in_median2_subvi.vi
C.3	digital_out_subvi5.vi
C.4	save2spreadsheet_subvi.vi
C.5	save2matlab_subvi.vi
C.6	Blokkdiagram: hastighetstest_av_flereventiler.vi
E.1	Trykkreferanse P som genererer måledata av taktil display. Rader er målen r og kolonner er ønsket trykk i silikonkammerer. Dimensjon $[m \times k]$
E.2	Avrundet numerisk transformasjonsmatrise T med dimensjon $[923 \times 25]$. Figuren viser her de 75 første radene av 923.
H.1	Laboppsett med ventiler, struping og taktilt display.
H.2	Slangetilkobling til taktilt display
H.3	Taktilt display sett ovenfra

H.4	Taktilt display sett fra siden	91
H.5	Struping av luftslanger	92
H.6	Støpemal	93

Symbolliste

Variabel	Betydning
\overline{A}	Mengde silikon av type A
B	Mengde katalysator for silikon A
i_s	Styrkeforhold (indeks) til ferdig blandet silikon
y	Geometrivektor i pixels $[n \times 1]$
T	Konstant transformasjonsmatrise $[k \times n]$
p	Trykkvektor i kPa $[k \times 1]$
P^{\dagger}	Pseudoinvers av P med dimension $[k \times m]$
T^{\dagger}	Pseudoinvers av T med dimension $[k \times n]$
Y	Målematrise for geometri i mm $[m \times n]$
P	Trykkreferansematrise i k Pa $[k\times m]$
n	antall pixler i horisontal retning
m	antall utførte målinger (samples)
k	antall silikonkammer $= 25$
t_{svitsj}	Svitsjetid for en ventil
t_{syklus}	den tiden det tar å slå på og av en ventil
f_{syklus}	Ventilfrekvens
p_s	Supplytrykk fra luftregulator, 2 bar
t_K	90% stigetid/responstid for silikonkammer K
K	$\{k_1 \ k_2 \ \dots \ k_{25}\}$, silikonkammer 1-25

Sammendrag

Ved konvensjonell kirurgi hvor man åpner opp pasientens kropp bruker kirurger hender og fingrer til å føle direkte motstand i vev. Den taktile tilbakekoblingen ved kikkhullskirurgi blir borte når man stikker små teleskopiske instrumenter gjennom 1 cm store hull. Ved å gi tilbakemelding til kirurgen ved hjelp av et taktilt display, vil kirurgen få igjen noe av denne følesansen.

Hensikten med oppgaven er å videreutvikle en prototyp av et taktilt display basert på en masteroppgave våren 2004. Arbeidet omfatter design, konstruksjon og dokumentasjon av et taktilt display, styring og regulering i LabVIEW samt estimering av en matematisk modell.

Materialbasis for det taktile displayet er silikongummi. Silikonen støpes ved hjelp av en invertert støpemodell i plast, som danner grunnlaget for det taktile displayet med 25 hulrom i tre størrelser. Ved å trykksette disse hulrommene, vil silikonen utvide seg og danne en dynamisk overflate som endrer seg i takt med trykket i silikonkammerene. Regulering i LabVIEW skjer ved hjelp av trykksensorer som føler på trykket i hulrommene og gir et pneumatisk pådrag ved hjelp av to-punkts ventilstyring. En matematisk modell ble funnet ved å ta en rekke digitale bilder av overflategeometrien og estimert ved minste-kvadraters metode i matlab.

Resultatet er et andre generasjons taktilt display med funksjonell styring og regulering i Lab-VIEW. Den matematiske modellen som ble funnet bør optimaliseres. Videre arbeid med nåværende modell blir å integrere en trykk/overflatesensor som danner en referansegeometri for det taktile displayet.

Del I

Prosjektrapport

Kapittel 1

Innledning

Rapporten gir en grundig innføring i totalsystemet til det taktile displayet. Målet er at det skal være enkelt for nye mennesker å sette seg inn i systemet slik at kontinuitet i prosjektet lettere kan videreføres. Masteroppgaven til Christensen [1] hadde lite dokumentasjon av laboppsettet.

Oppgaven deles inn i fire deler:

- 1. Dokumentasjon av laboppsett
- 2. Konstruksjon av taktilt display
- 3. Programmering i LabVIEW
- 4. Estimering av en matematisk modell basert på eksperimentelle måledata

Rapporten starter med å gi en oversikt av laboppsettet og en kort beskrivelse av komponentene som inngår i systemet. Videre presenteres problemene ved overtakelse av prosjektet og hva som måtte gjøres for å løse disse. En stor del av oppgaven var mekanisk design hvor 3Dtegneprogrammet SolidWorks ble brukt. Prosedyre for støping av silikon til det taktile displayet presenteres med gode tips. Vi får innsyn i hvordan programstrukturen er designet i LabVIEW og hvordan vi måler den geometriske deformasjonen av displayet med digitalt kamera. Bildene analyseres i matlab og vi finner en transformasjonsmatrise ved minste-kvadraters metode som omformer trykk til en vilkårlig overflategeometri i to dimensjoner. Resultater, konklusjoner og anbefaleringer avslutter selve rapportdelen.

I appendikset finnes mekaniske arbeidstegninger slik at det skal være lett å reprodusere nye eller endre deler samt kode for LabVIEW, matlab og noen fotografier av prosjektet helt til slutt.

CD-rom er vedlagt med følgende innhold:

- Prosjektoppgave høst 2003, Christensen
- Masteroppgave vår 2004, Christensen
- Prosjektoppgave høst 2004, Efteland

Cd'en inneholder bl.a. komplett dokumentasjon og kildefiler til LabVIEW, matlab, foto og video av taktilt display, høyoppløselige mekaniske tegninger og rapport i pdf-format.

Kapittel 2

Bakgrunnsstoff

2.1 Scenario

En taktil sensor omsetter parametrer assosiert ved en berøring av legemer til elektriske signal. Disse sensorene kan basere seg på prinsipper som kapasitive, konduktive, strekklapp eller piezoelementer. Man kan tenke seg at flere slike sensorerer ligger i sammen i en matrise og senser på vev innvendig i kroppen via et teleskopisk instrument. De elektriske signalene overføres til et taktilt display. Displayet endrer form i takt med hvor hardt sensoren trykkes mot vevet. Kirurgen kan ta hånden på displayet og kjenne på blodårer, svulster (tumorer), hardt/mykt vev og ta nye avgjørelser med ny informasjon.



Figur 2.1: Taktil sensor og taktilt display

Forskningen har økt betraktelig på dette området de siste årene. Det viser at det finnes et marked for slike produkter. En haptisk tilbakekobling kan brukes til alle mulige formål, og ikke bare til kikkhullskirurgi. F.eks. kan man tenke seg å koble et taktilt instrument til internett og føle og ta på digitale mennesker, en lege kan oppdage kreft ved å berøre en digital svulst, en kan ta og føle på et barn som ikke er født enda og bombeeksperter kan desarmere sprengstoff via en robot. Mulighetene er uendelige for denne type teknologi. Allerede i dag er taktil tilbakekobling mye brukt i dataspillindustrien, hvor joystick med forced feedback fungerer som tilbakekobling når bilen kjører over en fortauskant. Et eksempel på taktilt display som bruker silikon og luftstyring kan finnes på http://robotics.eecs.berkeley.edu/~gmoy/tactiledisplay/main.html

2.2 Status ved oppstart av prosjektet

Ved overtakelse av masteroppgaven til Christensen, ble systemet koblet opp og testet med tilhørende PC og LabVIEW. Det viste seg raskt at det var rom for forbedringer. Problemene er listet opp under og de fleste er beskrevet i [1].

Problemformulering:

- 1. Silikonmodellen hadde innbyrdes lekkasjer mellom kammere og lekkasje ut til atmosfæretrykk. Det ble laget en invertert støpemal i voks. Voksen ble så smeltet ut etter at silikonmassen hadde herdet. Støpemetoden med voks førte til at silikonveggene mellom kammerene fikk ulik tykkelse og ble ujevne. Det førte til at avviket mellom den fysiske og matematiske modellen ble større. Min oppgave ble å designe en ny metode for støping og støpe ett nytt taktilt display.
- 2. De pneumatiske ventilene er av typen 3/2-ventil som i figur 2.2. Det betyr at ventilen har 3 tilkoblingsporter med 2 stillinger. De bineære ventilene kan kun slåes av eller på, og er normalt lukket (normally closed) ved 0V. I aktivert tilstand (5V) åpnes det for lufttilstrømning til kammerene og ved 0V stenges denne og åpner for returluften som går ut til atmosfæren. Dermed går enten luften inn eller ut av kammerene gjennom ventilene og setter store krav til rask regulering. For å redusere flowen til silikonmodellen konstruerte Christensen en strupebarre som klemte over alle luftslangene samtidig. Det viste seg at strupingen ble ulik på kammerene slik at responstiden varierte for hvert kammer. Siden det er tre forskjellige størrelser på kammerene, så må vi ha tre forskjellige strupeparametere. Min oppgave ble å konstruere en individuell struping for hvert kammer.
- 3. Programmet i LabVIEW for styring og regulering av det taktile displayet var laget med en sekvensiell struktur. Programmet leste inn analoge verdier fra trykksensorene og multiplekset ut de digitale signalene til ventilene. Resultatet ble for treg reguleringssløyfe, noe som førte til større oscillering i selve kammerene. Min oppgave ble å lage et mer robust program i LabVIEW.
- 4. Avviket mellom ønsket overflategeometri og virkelig geometri ble for stort ved bruk av Finite Element Method og FEMLAB. Det ble bestemt at det taktile displayet skulle analyseres ved eksperimentelle målinger og identifikasjonsteori for å finne en matematisk modell av det taktile displayet. Utfordringen ble å finne en metode for å måle overflategeometrien og finne en god matematisk modell som skal gjenskape en tilnærmet vilkårlig overflategeometri i to dimensjoner.
- 5. Terminalkortet for digital ut hadde baner som var brent av og en kortslutning må ha funnet sted. Dette førte til at noen utganger på digitalkortet ikke virket slik de skulle. Elektronikkortet for trykksensorene og forsterkerkortet hadde for lange komponentben, noe som kan ha ført til kortslutningen. Begge elektronikkortene ble reparert og forbedret. De sprengte digitale utgangene ble koblet bort og ventilene ble rutet til andre utganger.



Figur 2.2: Festo 3/2-veis pneumatisk ventil.

Figur 2.2 viser en pneumatisk 3/2-veis ventil hvor port 1 er lufttrykk inn, port 2 kobles til taktilt display via luftslanger og port 3 er returluft fra taktilt display.

Kapittel 3

Taktilt display og fysiske komponenter

3.1 Systemlayout





Figur 3.1: Layout laboppstilling for styring og regulering av taktilt display

3.1.1 Komponenter i laboppstilling

Under følger noen utvalgte punkter fra databladene til de viktigste komponentene. En mer grundig beskrivelse av hver enkelt komponent finnes i kapittel 3 i [1]. Alle datablad er tilgjengelig i prosjektperm som følger med prosjektet. Nummereringen under henviser til figur 3.1.

1. Digital I/O card - 48 kanaler¹

Type: PCI-7248, 48 digitale inn/utganger. Produsent: Alink, NuDAQ, www.adlinktech.com

2. Analog I/O card - 32 kanaler

Type: PCI-9113A: 32 isolerte analoge innganger, 2 analoge utganger, 12 bits oppløsning, maks 10v inn.

Produsent: Alink, NuDAQ, www.adlinktech.com

3. Valve amplifier card

Forsterkerkort med NPN svitsjende transistorer 2N4401 konstruert av Christensen [1] fordi det digitale I/O-kortet ikke kunne levere nok strøm til å drive ventilene alene.

4. Air supply regulator

Parker regulator med filter, 0-6 bar, 1/4". Arbeidstrykk for systemet er 2 bar.

5. Festo miniature valves, 25 valves Ventil MHA1-M4H-3/2G-0.6-PI part no197006 med manifoil part no 197334

Svitsjetid <5ms, Maks 8bar, 10 l/min.

6. Flow reducer

En strupeløsning ble konstruert for å ha kontroll på tidskonstantene til silikonmodellen. Individuell justering av hvert kammer.

- 7. **Tactile display** Selve silikonmodellen med 25 kammere.
- Pressure sensor card Motorola MPX5100GP, piezoresistiv transducer, responstid 1ms.
 0-100kPa (0-14.5 psi), 0.2-4.7 V utsignal. Konstruert av Christensen [1]
- 9. **Power supply 5V** Utlånt fra komponentlager.

3.1.2 Om trykksensorer

For å få trykk til spenning fra trykksensorene, kan følgende formel brukes [2]

$$V_{out} = Vs \left(P \cdot 0.009 + 0.04 \right) \tag{3.1}$$

hvor V_s er forsyningsspenning i [V], P er trykk i [kPa] og V_{out} er spenning som leses av de analoge inngangene på i/o kortet.

Trykksensorene er lineære i arbeidsområdet 0 - 100 k Pa.

¹Digital utgang P1A0-4 og P1A7 er sprengt.

3.1.3 Skjema for digital ut og analog inn

Se appendiks A for tabell for digital ut og analog inn. Mer detaljert tegning og layout finnes i appendiks B.1 og B.2.

3.1.4 Programvare brukt i laboppstilling

Følgende programmer ble brukt for å kjøre laboppsettet:

- 1. LabVIEW 7 med drivere til analog og digital i/o kort
- 2. Matlab 7 R14 med Image Processing Toolbox v5.0.1 for analyse av digitale bilder

3.1.5 Utstyr for måling av overflategeometri

- 1. Canon Ixus 400 med usb-kabel og stativ
- 2. RemoteCapture 2.7 for automatisert fotografering av taktilt display

3.1.6 Innkjøpte komponenter

Det ble kjøpt inn noen nye komponenter for å forbedre systemets ytelse.

Komponent	Leverandør	Pris
Luftregulator, manometer $+$ div koblinger	RsOnline.no	1300
Hurtigkoblinger	Rexroth-Boschman	$ca \ 400$
Silikon 2kg+0.2kg herder	Trondheim Ortopediske verksted	ca 3000

3.2 Mekanisk konstruksjon

Generelt er alt designet og tegnet av meg og produsert ved mekanisk verksted hvis ikke annet er nevnt.

3.2.1 Konstruksjon av støpemal

For å få en erfaring med å jobbe med voks ble det utført et lite eksperiment med å lage en støpemodell i voks. Det viste seg rask at denne metoden var for tidkrevende og unøyaktig med det utstyret som var tilgjengelig. Hvis man absolutt skulle bruke voks, måtte man ha konstruert en støpeform, hvor all voksen ble helt oppi samtidig, på sammen måte som man støper en kobberfigur i en gipsform. Problemet er at voksen trekker seg sammen under avkjøling, slik at man må gi mer påfyll med voks. Det fører til en noe ujevn modell.

Løsningen ble å konstruere en stiv støpemal i plast som i figur 3.2. Se appendiks B.3 for fullstendig arbeidstegning. Denne løsningen viste seg å fungere utmerket ved støping.

Plasseringen av kammerene er basert på Christensens modell for FEMLAB [1].



Figur 3.2: Konstruksjon av støpemal i plast og plexiglass

3.2.2 Konstruksjon av silikonmodell

Man måtte designe en metode for å koble luftslanger til silikonmodellen. Etter støping så hadde modellen åpne hull som måtte tettes som vist i figur 3.3. Løsningen ble å lage en plate i pleksiglass og plast med tilkoblinger for slanger, se figur 3.4. Sylindrene i plast fungerer som et lokk for hulrommene. De to største plastsylindrene ble gjenget opp til $M12 \times 1$ og festet til pleksiglasset med mutter og skottgjennomføring som i figur 3.5. Dette er en hurtigkobling slik at man enkelt kan sette slanger inn i koblingen uten bruk av verktøy. Skottgjennomføringene var ikke små nok til de minste kammerene, så det ble laget en egen løsning med M3 gjengestak med hull for luftgjennomstrømning. Luftslangene ble tredd over skruene. Det førte til lekkasje mellom gjenger og slange på noen kammere, men en liten dråpe silikonlim (appendiks F) på gjengene stoppet lekkasjen. Se appendiks B.5 for mekanisk tegning av plate for slangetilkobling og appendiks B.4 for silikonmodell.

Platen for slangetilkoblingen ble så limt sammen til silikonmodellen med silikonlim av type Elastosil E43 [10] som vist i figur 3.6. Silikonmodellen ble testet med maks trykk på 80kPa og ingen lekkasjer oppsto.

Pleksiglasskassen som ble brukt under støpingen brukes om igjen. Silikonmodellen skyves ned i kassen som illustrert i figur 3.7. Pleksikassen er konstruert av Christensen.

3.2.3 Konstruksjon av trekasse

Det ble konstruert en trekasse for å stive av silikonmodellen og pleksiglasskassen. Når trykket bygget seg opp i silikonmodellen, førte det til at pleksiglasset bøyde seg og mistet geometri i vertikalplanet. Faren for lekkasje øker også. Trekassen gjør modellen mer lineær og robust slik at trykk fra kammerene skaper en deformasjon oppover, og ikke ut på sidene. Silikonmodellen



Figur 3.3: Silikonmodell etter støping



Figur 3.4: Plate for slangetilkobling til silikonmodell



Figur 3.5: Skottgjennomføring for silikonkammerstørrelsen
e $\emptyset47$ og $\emptyset15.7$ med 4mm hurtigkobling. Fabrikat: SMC type KQE
04-00.



Figur 3.6: Den åpne silikonmodellen limes sammen med tilkoblingsplaten for luftslanger med silikonlim.



Figur 3.7: Pleksiglasskasse og silikonmodell



Figur 3.8: Skisse av silikonmodellen sammen med trekassen.

plasseres oppi pleksiglasset som så skyves ned i trekassen som vist på figurene 3.9 og 3.10.



Figur 3.9: Silikonmodellen og pleksiglasset skyves ned i trekassen.



Figur 3.10: Trekassen stiver opp silikonmodellen.

3.2.4 Konstruksjon av struping

Struping ble konstruert ved å lage en innretning som klemmer på hver enkelt slange. Med et skrujern stilles det inn hvor mye flow man vil ha gjennom restriksjonen. På denne måten kan man endre tidskonstanten til hvert kammer slik at strupingen fungerer som et analogt lavpassfilter. I LabVIEW settes et sprang i referansetrykket og tiden måles til ønsket verdi er oppnådd. Slik kan man enkelt justere hvor mye struping hvert enkelt kammer skal ha. Figur 3.11 viser prinsippet for struping av ett kammer. Alt i alt er 25 stk montert sammen på en treplate. Man kan også kjøpe inn strupeventiler men det ville ha kostet over 3500,-.



Figur 3.11: Prinsippskisse for struping av slanger

3.3 Støping av silikon

3.3.1 Blandingsforhold silikon

Silikonen er produsert av Centri i Sverige, type CG100, silicone rubber. Vi fikk tak i silikonen ved Trondheim Ortopediske Verksted. Silikonen er en tokomponentstype, A og B hvor B er katalysatoren. Den hardeste blandingen oppnås ved å bruke 9 deler base A og 1 del katalysator B, (styrkeindeks $i_s = 9$). Christensen brukte forholdet 73:27 på sin modell ($i_s = 2.7$), noe som er relativt mykt. Jo mer katalysator, desto hardere og sterkere blir silikonen. Jeg valgte en litt hardere modell med styrkeindeks på 3.7. Se blandingsforhold fra produsent i appendiks F.

Silikon er dyrt og man bør regne ut hvor mye som behøves til en støping. Et eksempel under viser hvor mye silikon som behøves for å støpe et display.

Volum støpekasse (pleksiglass)

$$V_{kasse} = l \cdot b \cdot h$$
(3.2)
= 160 \cdot 100 \cdot 80 mm³
= 1.28 dm³

Volum ett kammer

$$V_{Sylinder} = \pi r^2 h = \frac{\pi}{4} d^2 h$$

Volum alle kammer, med en lengde på h = 90mm

$$V_{kammer} = \frac{\pi}{4} \left(3d_1^2 + 6d_2^2 + 16d_3^2 \right) h$$

$$= \frac{\pi}{4} \left(3 \cdot 47^2 + 6 \cdot 15.7^2 + 16 \cdot 5.2^2 \right) \cdot 90 \,\mathrm{mm}^3$$

$$= 0.6036 \,\mathrm{dm}^3$$
(3.3)

Estimert silikonvolum blir da

$$V = V_{kasse} - V_{kammer}$$
(3.4)
= (1.28 - 0.6036) dm³
= 0.6764 dm³

For å være på den sikre siden måler vi opp en total mengde på V = 750 ml. Mengdene av Silikon A og B kan regnes ut fra sammenhengen

$$A + B = V \tag{3.5}$$

$$\frac{A}{B} = i_s \tag{3.6}$$

hvor i_s er styrke
indeksen.

Likningene løses m
hpA og B, og eksempelet vårt blir da

$$B = \frac{V}{i_s + 1} = \frac{750 \,\mathrm{ml}}{3.7 + 1} \approx 160 \,\mathrm{ml} \tag{3.7}$$

$$A = V - B = (750 - 160) \text{ ml} \approx 590 \text{ ml}$$
 (3.8)

Det gir en styrkeindeks på $i_s = \frac{A}{B} = 3.69$

3.3.2 Prosedyre for støping

Utstyr: Vakuumpumpe, varmeovn, silikon A og B, målebeger 400ml, en beholder på minst 2liter, isboks, to skjeer, tape.

Sted: Verksted i kjeller (Spør Arvid Lervold på mekanisk verksted om kode til hengelås)

- 1. Rensk bort urenheter og gjør klar pleksiglassboks. Pass på at boksen er tett i skjøtene -> bruk tape/silikonlim eller liknende, ellers drar boksen inn luftbobler under vakuumeringen.
- 2. Mål opp silikon komponent A og B etter ønsket styrkeforhold i_s med et målebeger. Hell deretter silikonen i en 2 liters beholder og rør godt rundt med en skje. Formel:

$$B = \frac{V}{i_s + 1}$$
$$A = V - B$$

3. Sett 2 liters beholder i vakuumklokke og start kompressoren. Undertrykket suger luftboblene i silikonen til overflaten. Pass på: silikonen ekspanderer enormt (stor fare for søl). Ved å justere på ventil ved manometer kan du slippe luft inn i vakuumklokka og da synker silikonen tilbake igjen. Gjenta denne prosessen til luftboblene er borte. Når luftboblene som trekkes til overflaten blir større og større så er det et tegn på lite gjenværende luft i silikonen.

- 4. Hell silikonen fra beholderen over i pleksiglassboksen, og gjenta vakuumeringen til luftboblene er helt borte. Når prosessen er ferdig, slå av pumpa, slipp inn luft og ta boksen ut av vakuumklokka.
- 5. Senk deretter støpemalen forsiktig ned i pleksiglasset. Legg press på toppen slik at silikonen renner over. Ha noe under (isboks, avis..). Tørk av.
- 6. Sett i varme
ovn. ca 65° i 1-2 timer. Silikonen herder raskere ved høyere temperatur
er. Ta ut og la stå over natten.
- 7. Skru ut alle skruene som fester plastsylindrene til topplokket. Ta av lokket og sett skruene i sylindrene og prøv å dra dem opp med en spisstang eller liknende. Bruk såpe hvis sylindrene er vanskelige å få ut.

Deretter limes platen for slangetilkobling og silikonmodellen som beskrevet i kapittel 3.2.2.
Kapittel 4

Dynamikk

4.1 Dynamikk og responstider til laboppsett

De pneumatiske ventilene har kun to tilstander slik at de enten fyller et kammer med luft eller slipper ut luft. Det betyr at vi må ha en rask reguleringssløyfe, spesielt på de små kammerene. I stedet for en to-stillingsventil, burde man brukt en tre-stillingsventil som vist i figur 4.1, slik at luftstrømningen er stengt begge veier i midtstilling.



Figur 4.1: Pneumatisk 5/3 ventil

Definisjon 1 Svitsjetid er den tiden t_{svitsj} det tar å skifte tilstand på en ventil.

Definisjon 2 Syklustiden er den tiden t_{syklus} det tar å slå en ventil på og deretter av igjen.

Definisjon 3 Responstiden t_K er 90% av stasjonærverdien ved et sprang fra 0 til 100% av arbeidsområdet. Kalles også for stigetid.

Produsenten Festo garanterer at ventilene skifter tilstand innen 5 ms $[3]^1$. Det vil si at den teoretiske syklustiden for å slå ventilene av og på er 10 ms. Det gir en teoretisk sykelfrekvens på 100 Hz. Dette ble testet ut ved å måle syklustiden i LabVIEW på en enkelt ventil (se appendiks C for filnavn). Resultatet lå rett over 12 ms. Dvs det er fysisk mulig å kjøre ventilene med en frekvens på 167 Hz. Om det er forsvarlig å gjøre det, er en annen sak. Ventilen ble utrolig varm etter noen minutter på maksimal hastighet og lydnivået passer slett ikke inn på et sykehus. Produsenten anbefaler maksimal kontinuerlig svitsjefrekvens på 20 Hz, noe som gir 50 ms syklustid. Siden vi ikke har kontinuerlig svitsjing i vårt oppsett, så kan vi sette denne litt høyere

 $^{^{1}}$ I det refererte databladet til Festo ventilene, skifter ventilene tilstand etter ca 4ms. I databladet som fulgte med ved kjøp av ventilene er de oppgitt til <5ms.

Syklustiden velges til

$$t_{svitsj} = 10 \,\mathrm{ms} \tag{4.1}$$

$$t_{syklus} = 20 \,\mathrm{ms} \tag{4.2}$$

$$f_{syklus} = 50 \,\mathrm{Hz} \tag{4.3}$$

Trykksensorene har en responstid på 1 ms [2].

Det analoge i/o-kortet har en samplingrate opp til 100 kHz [4]. Det gir en en maksimal sampletid på 0.01 ms.

Det digitale i/o-kortet har en oppgitt datahastighet i datablad [5] på 500 kbytes/s, og det er tilstrekkelig hastighet for kravene vi har satt til ventilfrekvens.

4.2 Dynamikk og responstider for taktilt display

Responstid uten struping

For å få et begrep om hvordan responstiden til den fysiske modellen var, ble det utført en sprangresponstest og lest av 90% stigetid på de tre størrelsene til silikonkammerene. I figur 4.2 gjør vi et sprang fra 0 til 50kPa på kammer k_2, k_6 og k_{20} som representerer de fysiske størrelsene Ø47,Ø15.7 og Ø5.2. (se appendiks B.4 for plassering av silikonkammer).

90%trykk ved 50k Pa sprang er

$$p_{50} = 0.9 \cdot 50kPa = 45kPa \tag{4.4}$$

Figur 4.2 gir oss et godt bilde av responsen til det taktile displayet. Kammer k_2 er det største kammeret fysisk og den med tregest tidskonstant og responstid. Reguleringsavviket er ca 2kPa. Legg også merke til kurvene nederst i samme plott. Det er kammer 1,3,5 og 8 (sees bedre på figur 4.3) som blir påvirket av trykket fra k_2 . Disse har et trykk på 5 - 10kPa. Dette er en ulinearitet i modellen. Kammer k_6 gir et reguleringsavvik på ca 4kPa og 90% stigetid på ca 0.16s. Kammer k_{20} derimot, gir et avvik på ca 20kPa og oscilleringen er vært stor. Stigetiden er mellom 0.04 og 0.05s.

Responstid for kammer uten struping

$$t_{k2} = 1.28 \,\mathrm{s}$$

 $t_{k6} \in [0.16 \ 0.17] \,\mathrm{s}$
 $t_{k20} \in [0.04 \ 0.05] \,\mathrm{s}$

Et eksempel med struping er vist i figur 4.3 som viser silikonkammer nr 2 med en stigetid på ca 2.9 sekund.

4.3 Total dynamikk

Systemets totale dynamikk avhenger i stor grad av flowen og størrelsene på silikonkammerene. Båndbredden til systemet velges ut fra det svakeste ledd, som er det taktile displayet og ventilene. Som en hovedregel skal reguleringssløyfen være ca 10x raskere enn det fysiske systemet.



Figur 4.2: Sprangrespons på silikonkammer uten struping.



Figur 4.3: Sprangrespons av kanal 2 med struping. Stigetid ca 2.9 sekund.



Figur 4.4: Forstørret plott av kammer 2 med settpunkt 50kPa. Avviket er ca 1kPa.

Reguleringsløyfen har en båndbredde på $\omega_r = 50 \text{ Hz}$ noe som gir en båndbredde $\omega_s = 5 \text{ Hz}$ til det taktile displayet. Det tilsvarer at responstiden må være større enn 0.2 s hvis vi gir et sprang fra 0 til 50kPa. Vi ser av figur 4.2 at et system med arbeidsområde 0 - 50kPa gir tilfredsstillende regulering for kammer 2, men ikke for de mindre kammerene. Strupingen sørger for at modellen blir treg nok til at slik at reguleringsavviket er tilfredsstillende og reguleringsløyfen 10x raskere enn den fysiske modellen.

På bakgrunn av det vi nå vet om systemet kan vi bestemme følgende parametere,

Luftforsyning fra luftregulator

$$p_s = 2 \ bar \tag{4.5}$$

Arbeidsområdet til det taktile displayet

$$p \in \{0, 50kPa\} \ \forall \ k_1, k_2, k_3 \tag{4.6}$$

$$p \in \{0, 80kPa\} \ \forall \ K \neq k_1, k_2, k_3 \tag{4.7}$$

hvor p er trykk, K alle silikonkammere hvor k_1 er kammer nr 1. Responstid taktilt display, 90% av arbeidsområdet

$$_{K} > 2\,\mathrm{s} \tag{4.8}$$

hvor indeksen K representerer kammer 1-25. Reguleringssløyfe

$$t_{syklus} \le 0.2 \,\mathrm{s} \tag{4.9}$$

Kravet om 10x reguleringssløyfe er da tilfredsstilt.

t

4.4 Kalibrering av struping

Kalibrering av struping ble enkelt gjort ved å sette 100% sprang i det gyldige arbeidsområdet til hvert kammer (likn 4.6 og 4.7).

Ideen er å få like stor tidskonstant for alle kammerene. Dette blir gjort ved å strupe flowen til hvert kammer individuelt. Metoden er som i kapittel 4.2, å sette på et sprang og justere strupeskruen slik at stigetiden ble tilnærmet like lang for alle kammer. Det betyr at vi setter stigetiden til den tregeste elementet, nemlig silikonkammer k_1, k_2, k_3 .

Hele kalibreringsprosedyren var relativt tidkrevende, og det var vanskelig å stille inn responstiden helt nøyaktig. Spesielt de minste kammerene var svært sensitive. Disse fikk derfor raskere respons, slik at oscilleringen likevel var på et minimum. Resultatet for kammer k_1, k_5 og k_{14} er vist i figur 4.5



Figur 4.5: Sprangrespons med struping for kammer 1,5 og 14.

Responstidene for kammerene er nå

$$t_{k1} = 2.4 \,\mathrm{s}$$

 $t_{k5} = 2.8 \,\mathrm{s}$
 $t_{k14} = 0.8 \,\mathrm{s}$

Selv om responstiden for det minste kammeret er kortere enn kravet vi satte i 4.8, som er $t_K > 2$ s, så er responstiden mye lenger enn det som var tilfellet uten struping, figur 4.2.

Når vi forstørrer plottet og ser på stasjonærverdien, ser vi at reguleringen absolutt er tilfredsstillende. Dette vises i figur 4.6. Avviket på trykket ligger rundt 1kPa på alle kammerene.



Figur 4.6: Sprangrespons med struping. Forstørret plott av figur 4.5.

Kapittel 5

Programmering i LabVIEW

5.1 Maskinvareadressering

Datamaskinen har et PCI-9113A kort med 32 isolerte analoge innganger og et PCI-7248 kort med 48 digitale inn- og utganger.

I LabVIEW er kortene satt opp med adressene

$$Analog inn = device1 \tag{5.1}$$

$$Digital \ ut = device2 \tag{5.2}$$

Sammenhengen mellom hvilke kanaler som brukes til det taktile displayet finnes i appendiks A.

5.2 Første generasjons LabVIEW-applikasjon

Som nevnt i kapittel 2.2 var Christensen LabVIEW-program av en sekvensiell oppbygning. Ventilene settes av og på sekvensielt i rekkefølgen 1...25. Det skapte en unødvendig ekstra tidsforsinkelse slik at de statiske egenskapene til det taktile displayet var mindre bra. Løsningen hennes var å gjøre systemet tregere ved å strupe lufttilførselen så mye at oscilleringen til silikonoverflaten kom på et akseptabelt nivå. Frekvensen på ventilene lå dermed omkring 20 Hz ifl [1].

5.3 Om valg av programmeringsstruktur

Styring og regulering av det taktile displayet ble bygget opp fra bunnen av basert på LabVIEWdriverene fra kort-produsenten. I følge et notat fra National Instruments [9] finnes det tre typer hovedstrategier for bruk av tråder (multithreading) for oppgaver av denne type. Ideen går ut på å bruke flere tråder til forskjellige oppgavetyper.

For vårt problem kan man tenke seg å bruke

1. en tråd for datainnsamling fra trykksensorene

- 2. en tråd for analyse, evt filtrering og regulering
- 3. en tråd for presentasjon til skjerm
- 4. en tråd for sending av data til pneumatiske ventiler

De tre strategiene for kjøring av tråder er

- a. Sekvensiell struktur, som kjøres som en tråd og utfører deloppgavene sekvensielt
- b. Enkel multitasking, hver tråd kjøres individuelt for hver deloppgave ved bruk av lokale variabler
- c. Avansert multitasking, fortsatt individuelle tråder, men nå med bruk av køer mellom trådene slik at ingen informasjon mistes

Christensen brukte *metode a* i sitt laboppsett. Ulempen med denne metoden er at når datainnsamlingen pågår (1), så venter de andre deloppgavene (2-4) på at (1) skal gjøre seg ferdig og levere stafettpinnen videre. Det blir mao. inneffektiv bruk av prossessortid fordi prosessoren går på tomgang mens den venter på beregninger og svar fra analogt i/o-kort under datainnsamlingen.

Metode b har den ulempen at den kan miste data underveis eller data dupliseres fordi man jobber på delte variabler. Dette kan løses ved å bruke semaforer eller mutex som setter lås på den kritiske regionen slik at man ikke får lese mens noen skriver til de samme variablene. Svakheten ved å miste data kan også utnyttes ved å gi forskjellig prioritet til deloppgavene. Hvis man ikke får tid til å analysere dataene, så kastes de. Det er lett å forstå at presentasjon til skjerm er mindre viktig enn å gi riktig pådrag til riktig tid. De store og sterke og lure får dermed stafettpinnen.

 $Metode\ c$ bruker et køsystem for å overføre data til de andre prosessene. Med denne metoden kan man fordele oppgavene på flere datamaskiner eller prosessorer og forhindre at datainformasjon blir tapt. Flere stafettpinner er mer effektivt.

For vårt system egner *metode* b seg best. Vi har ganske harde sanntidskrav og vi tolererer ikke forsinkede meldinger som et køsystem kan gi eller venting på opplåsning av delte variabler. Reguleringssystemet tar seg av den informasjonen vi mister eller får om igjen.

LabVIEW skiller mellom seks typer for trådkjøring i applikasjoner [8]. Disse kan finnes ved å velge *File»VI Properties* og velge *Execution* i *VI Properties dialog box*. I vårt system brukes user interface med lav prioritet for å kjøre frontpanelet (skriver informasjon til skjerm) og data acquisition med høyere prioritet for å kjøre de andre trådene som er tidskritiske. Trådene er uavhengige av hverandre og hver trådkjøring har sin egen kø utenom user interface. Det betyr at aktiviteter som grafikk, tastatur og mus på frontpanelet ikke stjeler ressurser fra de andre trådene. Alle trådene kjører i hver sin løkke (loop). Ved bruk av en ventefunksjon (wait) kan man angi hvor ofte trådene vil få prosessortid. Løkka for skriving til skjerm (front panel) er ikke tidskritisk og tildeles mye mindre prosessortid enn trådene som leser inn trykket i silikonkammerene og setter pådraget til ventilene.

5.4 Andre generasjons LabVIEW-applikasjon

Under finnes en kort introduksjon til LabVIEW-programmet TactileDisplay_b10.vi som brukes til å regulere det taktile displayet. Programmet er designet på nytt og bruker drivere fra produsenten til i/o-kortene til å sample fra analoginngangene og sende ut på digitalutgangene. Frontpanelet vises i figur 5.1 og blokkdiagrammet vises i figur 5.2.



Figur 5.1: Frontpanel til hovedprogram i LabVIEW.

5.4.1 Forklaring til frontpanelet

Punktene følger figur 5.1.

- 1. Auto/manuell bestemmer om man skal kjøre manuelt pådrag eller regulering.
- 2. Her velger vi hastigheten til de to løkkene. Default er 10 ms på sample loop, og 200 ms på main loop. Sample loop bestemmer reguleringshastigheten til ventilene. Syklusen blir da $t_{syklus} = 20$ ms som bestemt i likn 4.9.
- 3. Manuelt pådrag. Her kan man direkte sette tilstand på ventilene ved å klikke på lys hvis (1) står i manuell. Ventilene er ordnet i bit-rekkefølge. Dvs ventil 1 er LSB (least significant bit) og dermed lengst til høyre.
- 4. Ved datainnsamling (brukt i kapittel 6.3.1), kan man lagre referansetrykk-vektoren (7).
- 5. Denne brukes til kontroll av datalagring i punkt (4).
- Man kan plotte trykket i et silikonkammer ved å velge kanal. Kanal 1 = kammer 1 ...osv.
 (2) Main loop bestemmer tidsskalaen på plottet.
- Når (1) står i auto, kan du velge ønsket trykk i silikonkammerene ved å taste ett tall mellom 0 og 100kPa. –1 betyr at reguleringen er av.
- 8. Her lagrer du plottet fra alle kanaler til en fil. *STOP* knappen garanterer at programmet terminerer med alle ventilene i av-tilstand.

Frontpanelet er ganske spartansk i utseende. Det er lagt vekt på funksjonalitet. Skriving til skjerm krever mye ressurser og derfor er det bare et minimum som blir presentert på frontpanelet.

5.4.2 Forklaring til blokkdiagrammet

Blokkdiagrammet i figur 5.2 er bygget opp med to løkker. En for sampling, regulering og pådrag og en for presentasjon til skjerm, lagring av data og plotting av trykk.

- 1. Sampling av analoge innganger. Inn er hvilke kanaler vi vil scanne og ut kommer medianfiltrert trykk i kPa. *Sample pressure* inneholder konvertering av spenning til trykk i kPa, temperaturkompensering for trykksensorene og man kan velge medianfiltrering eller gjennomsnittsfiltrering. Default er medianfiltrering av 4 samples pr kanal. Se appendiks C for detaljert kode for *sample pressure*.
- 2. Dette er en topunkts-reguleringssløyfe. Sammenlikner referansetrykkvektoren med målt trykkvektor og gir ut 0 eller 1 pådragsvektor individuelt for alle kanaler.
- 3. Set valves sender pådragsvektoren fra regulatoren ut til ventilene. Se appendiks C for detaljert kode.
- 4. Global stoppvariabel garanterer at begge løkkene terminerer.
- 5. Lagring av trykkreferansevektor til fil. Fila importeres i matlab. Se appendiks C for detaljert kode.
- 6. Plotting av ønsket kanal.



Figur 5.2: Blokkdiagram til hovedprogram i LabVIEW.

7. Lagring av av alle kanalene samtidig. Se appendiks C for detaljert kode.

Blokkdiagrammet til hovedprogrammet er delt opp i tre sekvenser.

- i. Sekvens 0 er initialisering av digital ut og diverse tabeller figur 5.3.
- ii. Sekvens 1 er selve hovedprogrammet som vist i figur 5.2.
- iii. Sekvens 2 er for å slå av ventilene slik at silikonmodellen ikke fylles med luft og sprenges ved uregelmessig terminering, figur 5.4.



Figur 5.3: Blokkdiagram for initialisering til hovedprogrammet

5.4.3 Programhierarki

Hovedprorammet består av flere sub'vier. Disse kan sees i figur 5.5. Detaljerte blokkdiamgrammer finnes i appendiks C.





Figur 5.4: Blokkdiagram for avslutning av hovedprogrammet.



Figur 5.5: Programhierarki for TactileDisplay_b10.vi

Kapittel 6

Systemidentifikasjon

6.1 Systemmodell

Generelt kan systemet settes opp som en lineær modell på formen

$$\mathbf{y} = T \mathbf{p} \tag{6.1}$$

hvor \mathbf{y} er en vektor med målt geometri i mm, \mathbf{p} er trykkvektor i kiloPascal, og T en konstant transformasjonsmatrise som omformer trykk til geometri.

Målet er å finne en matrise T som transformerer ønsket geometrisk overflate til trykk, slik at

$$\mathbf{p} = T^{-1}\mathbf{y} \tag{6.2}$$

Hvis matrisen Tikke er kvadratisk, dv
s den inverse matrisen ikke eksisterer, bruker vi
 venstre pseudo-invers avTslik at

$$\mathbf{p} = T^{\dagger} \mathbf{y}$$
$$\mathbf{p} = (T^T T)^{-1} T^T \mathbf{y}$$

På den måten kan man gjenskape en tilnærmet vilkårlig overflategeometri ved å trykksette de forskjellige kammerene.

Med nåværende modell er det kun mulig å gjenskape en geometri i to dimensjoner. Ved analyse av de eksperimentelle måledataene med minste-kvadraters metode kan transformasjonsmatrisen T finnes. Ved å sette kjente trykk på silikonmassen kan vi måle deformasjonen ved hjelp av et vanlig digitalt fotokamera. Et matlabscript analyserer det digitale bildet og diskretiserer overflategeometrien til en vektor y. Da kan matrisen T finnes ved

$$T = \mathbf{y}\mathbf{p}^{\dagger} \tag{6.3}$$

hvor \mathbf{p}^{\dagger} er pseudo-invers.

6.2 Måleseriematrise

Målingene gjøres ved å ta en rekke digitale bilder av de forskjellige geometriformasjonene. Bildene blir automatisk lastet inn i matlab fra harddisk og analysert med matlabscriptet diskretisering.m. Se appendiks D.2 for kode. Ut får vi transformasjonsmatrisen T.

Matrisenes dimensjoner er avhengig av oppløsningen på bildet. Antall pixels kaller vin, antall målinger m, og antall silikonkammere k. Målingene **y** og trykkreferansene **p** stables bortover som kolonner i en matrise og danner **Y** og **P**.

٦

Matrisene for måleseriene blir da

$$\mathbf{Y} = T^T \mathbf{P} \tag{6.4}$$

$$\begin{bmatrix} y_{1,1} & \dots & y_{1,n} \\ y_{2,1} & \dots & y_{2,n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ y_{m,1} & \dots & y_{m,n} \end{bmatrix} = T^T \begin{bmatrix} p_{1,1} & \dots & p_{1,42} \\ p_{2,1} & \dots & p_{2,42} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ p_{k,1} & \dots & p_{k,m} \end{bmatrix}$$
(6.5)

Г.,

$$[m \times n] = [n \times k] [k \times m]$$

$$(6.6)$$

Et eksempel med n = 923, m = 42, k = 25

г

$$\begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \dots & y_{1,923} \\ y_{2,1} & y_{2,2} & \dots & y_{2,923} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ y_{42,1} & y_{42,2} & \dots & y_{42,923} \end{bmatrix} = T^T \begin{bmatrix} p_{1,1} & \dots & p_{1,42} \\ p_{2,1} & \dots & p_{2,42} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ p_{25,1} & \dots & p_{25,42} \end{bmatrix}$$
$$[42 \times 923] = [923 \times 25] [25 \times 42]$$

Det vil si at matrisen T har dimension $[25 \times 923] = [k \times n]$

6.3 Praktisk gjennomføring av måleserie

Målingen av silikonmassens overflatedeformasjon ble utført med et Canon Ixus 400 montert på et kamerastativ ca 2 meter unna objektet. Avstanden måtte være såpass for å unngå perspektivfeil. Maksimal zoom på kameraet ble brukt for å unngå vidvinkeleffekt. Kameraet ble tilkoblet en pc via usb-kabel og fjernstyringsprogrammet RemoteCapture 2.7 (gratis på www.canon.com). Med programmet kunne man enkelt stille inn manuelle parametere som fast fokus, intervallfotografering, lysforhold og fjernstyre utløsermekanismen på kameraet med PC. Siden stativet var av dårlig kvalitet ville jeg helst unngå å trykke på utløsermekanismen på selve kameraet, slik at motivet kunne forflytte seg. Det ville gitt målefeil og avvikende diskretisering av overflaten.

Parallellitet og perspektivfeil ble sjekket ved å ta ett bilde med referanselinjaler i horisontal- og vertikal-retning og millimeterpapir i måleområdet (i arbeidsområdet til det taktile displayet), og analysert i matlab. Feilen var ikke målbar slik at den diskretiserte kurven er svært nær virkelig overflategeometri. Denne metoden fungerte utmerket.

Det ble utført 42 målinger med forkjellig trykk i silikonkammerene. Ideen var å gjenskape så mange forskjellige overflater som mulig.

Man kan også bruke et webkamera, men mitt webkamera ga for stor ulinearitet i de parallelle linjenene i horisontal- og vertikal-planet.



Figur 6.1: Metode for måling av overflategeometri ved bruk av digitalt fotoapparat

6.3.1 Prosedyre for måleserie i grove trekk

RemoteCapture/Matlab/LabVIEW:

1. Bruk en sort bakgrunn for å fremheve konstrasten i bildet. Ta et testbilde av en overflate på silikonmodellen og kjør matlabscriptet diskretisering.m (se appendiks D.2 for kode). Scriptet plukker ut arbeidsområdet til silikonmodellen automatisk ved å definere et rektangel rundt trekassen som vist i figur 6.2 (Tips! bruk *Data Cursor* i figurvinduet). Arbeidsområdet i vertikalretning er her valgt til 200pixels, men kan forandres ved å endre variabelen delta_y. Hvis bildet er skjevt kan man rotere bildet. Sjekk at det diskretiserte plottet stemmer overens med testbildet som i figur 6.3.



Figur 6.2: Initialisering av måleserie vha digitalt fotoapperat. Et rektangel definerer arbeidsområdet til det taktile displayet.

2. Neste skritt er seriefotografering. Start LabVIEW
programmet, og velg en ønsket trykkreferansevektor, \mathbf{p}_i . Referansevektoren lag
res til fil og importeres i matlab. Slik slipper man å

taste inn alle verdiene manuelt i matlab. For hver måling i lagres trykkvektoren ved å trykke på save i LabVIEW-programmet. Målerekkefølgen 1...i lagres som første kolonne i matrisen **P**, som inngår i lign 6.4. Da kan man enkelt sjekke at måling nr i og bilde nr stemmer overens hvis bildene har løpende indeks i filnavnet. Total antall målinger har variabelen m.

- 3. Ta bilde ved å trykke på *Capture* i *RemoteCapture*. Bildet overføres fra kamera til destinasjonssted på harddisk.
- 4. Sett nytt referansetrykk i LabVIEW og lagre til fil.
- 5. Gjenta punkt 4 og 5 til du syntes du har nok målinger.

Når målingene er ferdig er det tid for bildeanalyse i matlab.



Figur 6.3: Diskretisert kurve av fotomåling etter bildeanalyse i matlab.

6.3.2 Diskretisering av bilder i Matlab

Matlabscriptet diskretisering.m bruker *Image Processing Toolbox* for analyse av digitale bilder. Scriptet er selvforklarende, men noen ting kan være greit å vite om. Koden finnes i appendiks D.2.

- Kommenter inn/ut de plottene du vil se ved å endre if 1/if 0 foran hvert plott.
- Scriptet bruker en for-sløyfe til å laste inn alle bildene. Disse lagres i en cellestruktur. Man henter ut verdier fra en celle med {}, og legger inn med (). F.eks. I(i)={imread(picture)} legger inn et bilde i en celle, og imshow(I{1}) henter ut bildet av cellen og plotter det.
- Scriptet klipper ut rektangelet av arbeidsområdet til det taktile displayet (se kapittel 6.3.1), og konverterer det til et binært bilde (black and white) og finner kantene til overflaten

av silikonmodellen. Hver måling blir lagret som en kurve y(i), hvor i er løpenummer for målingene. Disse settes sammen til en stor målematrise **Y** som i lign 6.5.

• Matlab bruker bwtraceboundary() for å finne kantene til den ekspanderte silikonmassen. Man kan få feilmelding hvis metoden ikke finner en kant langs initialpunktet. Feilmelding i form av en tom celle, B=[].

6.4 Eksperimentell analyse ved minste kvadraters metode

6.4.1 Måledata

Observerte måledata er vist i figur 6.4. Måledataene er diskretiserte kurver av overflategeometrien til det taktile displayet, generert av matlabscriptet diskretisering.m i appendiks D.2. Disse dataene er generert ved å trykksette silikonkammerene som vist i tabell i appendiks E. Måledataene fra diskretiseringen er lagret som en m-fil, analyse2.mat.



Figur 6.4: 3D-plott av diskretisert måledata skalert i pixels. 42 målinger med en oppløsning på 923 pixels.

6.4.2 Forbehandling av data

Før vi begynner med minste-kvadraters metode må vi forbehandle rådataene [7]. Vi må trekke fra det statiske arbeidspunktet for hver måling. Hvis ikke kan vi få feil i parameterestimatene



Figur 6.5: Plott av diskretiserte kurver fra måledata. Samme plott som 3D-figur 6.4 men skalert i millimeter.

(bias). Det gjøres ved å trekke fra måleseriens middelverdi med *mean* i matlab. Middelverdi for en måling er

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{m,j} \tag{6.7}$$

hvor indeksen i er løpenummer i måleserien 1..mVi trekker middelverdien fra måling y_i med

$$\Delta y_i = y_i - \bar{y}_i = y_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{i,j}$$
(6.8)

Når vi tar med hele måleserien 1..mkan det skrives som

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \vdots \\ \Delta y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{y}_1 \\ \vdots \\ \bar{y}_m \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{1,j} \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{m,j} \end{bmatrix}$$
$$\Delta Y = Y - \bar{Y} = Y - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_j$$
(6.9)

Når man trekker fra middelverdien, fikk estimatene en bias på nøyaktig middelverdien, figur 6.6. Det tyder på at feilen e kan være hvit støy, noe som gir null bias.



Figur 6.6: Estimatplott med biasfeil pga fratrekk i middelverdi.

LS-estimatets modell kan skrives som

$$y = Tp_0 + e \tag{6.10}$$

y er observerte målinger og p_0 er trykkreferansen. Da er e "likningfeilen" som skal minimaliseres med minste-kvadraters metode.

Hvis e har farget karakteristikk så er ikke estimatet konsistent, og vi får en bias. At vi har hvit støy (inneholder alle mulige frekvenser) betyr at $\hat{p} \to p_0$ når antall målinger m går mot uendelig. Det betyr at feilen e blir veldig liten bare vi utfører nok målinger, og da vil vi oppnå en god modell.

Vi trekker derfor ikke fra middelverdien i de videre kapittelene.

6.4.3 Transformasjonsmatrisen T

Matrisen T som transformerer trykk p til geometri y finnes ved likning 6.3. Rent teknisk finnes matrisen T ved å gange sammen målte observasjoner Y og pseudo-invers av pådraget P.

Det gir likningen

$$T = Y^T \left(P^{\dagger} \right)^T \tag{6.11}$$

med dimensjonene

$$[923 \times 25] = [42 \times 923]^T [25 \times 42]^T$$
(6.12)

Matlabscriptet TransformasjonsmatriseT.m i appendiks D.3 beregner matrisen T ved å bruke Moore-Penroses metode pinv() for invertering av matrisen P, som er en ikke-kvadratisk og ikkesingulær matrise. Dette er en minste-kvadraters løsning av Tp = y som minimaliserer $||Tp - y||^2$. Resultatet av numerisk T-matrise finnes i appendiks E.

6.4.4 Trykkvektoren \hat{p}

Målet for oppgaven er å beregne hvilket trykkpådrag man skal gi det taktile displayet når en får en ønsket geometri som innparameter. Som nevnt i scenario i kapittel 2.1, så er det signaler fra en trykksensor som skal gjenskapes på det taktile displayet. Innsignal blir da en vektor med ønsket overflategeometri y og ut blir den estimerte pådragsvektoren \hat{p} . Dette er beskrevet i likning 6.2. T-matrisen er ikke kvadratisk og likningen omformes til

$$\hat{p} = T^{\dagger} y^T \tag{6.13}$$

hvor \hat{p} er predikert trykk. Problemet er at denne metoden kan gi negative trykk. Det er vist i figur 6.7. Vi kan ikke ha vakuumtrykk i vår modell. Merk at det finnes flere løsninger av \hat{p} og dette er bare en løsning av mange (men som her gir negativt trykk).



Figur 6.7: Plott av måleserie nr 18 av 42. Legg merke til de negative verdiene i predikert trykk p. Stort avvik mellom virkelig og estimert geometri y.

6.4.5 Tapsfunksjonen V og avviket e

Når vi plotter tapsfunksjonen V, får vi et overblikk over hvor stor feilen for hver måleserie er. Dette vises i figur 6.8.

Avviket e defineres som

$$e = y - \hat{y}$$
(6.14)
$$= y - T\hat{p}$$

og E

$$E = Y - \hat{Y} \tag{6.15}$$

hvor y er målt geometri og \hat{y} er estimert geometri. Hvis vi kvadrerer og summerer alle avvikene for hver måling m, så får vi tapsfunksjonen V.

Tapsfunksjonen er definert som [7]

$$V = \sum_{i=1}^{m} e_i^2$$

$$= E^T E$$

$$= \left(Y - T\hat{P}\right)^T \left(Y - T\hat{P}\right)$$

$$= Y^T Y - Y^T T\hat{P} - T^T \hat{P}^T Y + T^T \hat{P}^T T\hat{P}$$
(6.17)

Her er \hat{P} den verdien av P som minimaliserer summen av de kvadratiske avvikene mellom observert Y og predikert \hat{Y} . V er en vektor med tapsfunksjonen for hver måling som vist i figur 6.8.



Figur 6.8: Tapsfunksjon V for systemet som gir negativ trykkverdier. Måling n
r 18 skiller seg ut med stort avvik.

Når vi ser på figuren for tapsfunksjon, så skiller måling nr 18 seg ut med stor feil. Det kan tolkes som at måling nr 18 inneholder størst "likningsfeil" og er minst tilpasset til de målte dataene. Vi bruker måling nr 18 som eksempel videre.

6.4.6 LS-estimering med begrensninger

For at trykket p ikke skal være negativt må vi legge inn begrensning i estimatberegningen. Detgjøres ved å bruke lsqlin() i matlab (*Constrained Least Square*).

Dette kan skrives som

$$\min_{p} \frac{1}{2} \left\| Tp - y \right\|^2 \tag{6.18}$$

$$lb \le p \le ub \tag{6.19}$$

hvor lb, ub er nedre og øvre grense.

Det fysiske systemet vårt har en begrensning på 0 - 100kPa, og vi
 velger grensene til lb = 0 og ub = 80kPa.

Resultatet vises i figur 6.9.



Figur 6.9: Estimering av $p \mod lsqlin()$ i matlab.

Subplott 1 viser ingen synlig avvik mellom virkelig og estimert geometri. Det er avviket mellom disse to som er minimalisert. Subplott 2 viser at feilen e ligger mellom ± 0.5 mm. Subplott 3 viser det opprinnelige referansetrykket p som ble brukt for å skape geometri y som trekanter i figuren. Settpunktet er her $p_1 = 60kPa, p_2 = 40kPa$ og $p_3 = 20kPa$. lsqlin() beregner \hat{p} som vises som rundinger i subplott3. Løsningen holder seg innenfor de begrensningene vi har satt, 0 - 80kPa. Når vi nå ser på tapsfunksjonen for V i figur 6.10 så har den minket drastisk i forhold til



Figur 6.10: Tapsfunksjon V med lsqlin()

tapsfunksjonen som ga negativt trykk i figur 6.8. Måling nr 18 har nå verdien $e^2 = 210$ i forhold til forrige som ga $e^2 = 8000$.

6.4.7 Alternativ transformasjonsmatrise T med vekting

Vi vet at noen trykkammer kan prioriteres foran andre. F.eks vil vi heller prioritere trykk i store kammere som skal gi stor deformasjon, enn at samme geometri oppnås med mange små. Vi kan legge inn en vektmatrise R når vi beregner transformasjonsmatrisen T. Vektene legges inn på diagonalen i R. Matrisen får dimensjon $[n \times k]$.

Transformasjonsmatrise med vekt

$$T = Y \left(RP \right)^{\dagger} \tag{6.20}$$

Det ble ikke foretatt noen forsøk med denne metoden.

6.5 Resultat av minste-kvadraters metode

Til slutt ble det foretatt en praktisk test for å se om man virkelig klarer å gjenskape ønsket geometri på displayet. Vi setter ønsket geometri lik måling nr 18 og bruker estimert trykk \hat{p} fra figur 6.9. I LabVIEW-programmet blir estimert trykk referansetrykket ut til det taktile displayet. Deretter fotograferes geometrien og diskretiseres i matlab, før vi sammenlikner de to kurvene. Resultatet er vist i figur 6.11.

Vi ser at feilen ikke er veldig stor. Noe av feilen skyldes avrunding i trykkreferansen og slurv i fotograferingen. Likevel er resultatet bra og avviket er her mellom 1-3mm. Det ble ikke foretatt flere sammenlikninger enn dette.



Figur 6.11: Sammenlikning av ønsket geometri og gjenskapt geometri.



Figur 6.12: Sammenlikning av ønsket og gjenskapt geometri i ulineær skala.

Kapittel 7

Diskusjon med konklusjon og anbefaling

7.1 Diskusjon

7.1.1 Mekanisk konstruksjon

Løsningen som ble valgt med en støpemal i plast istedet for voks, fungerte svært godt. Hulrommene ble perfekte og støpeprosessen foregikk helt smertefritt. Hvis en vil endre plasseringen av hulrommene eller forandre størrelse, så er det forholdsvis enkelt å produsere en ny støpemal basert på tegninger av nåværende. Det meste foregår i en CNC-maskin. Hvis en vil skalere ned modellen slik at et taktilt display skal tilpasses en fingertupp, så kan vi bruke voks i en støpeform eller sylindre i form av stål eller liknende.

Valget av plasseringen av hulrommene er basert på FEMLAB-modellen til Christensen [1]. Det viser seg å være en fornuftig plassering, selv om det er "dyrt" og kanskje litt luksus å bruke 16 ventiler til de små hulrommene. Effekten av de små hulrommene er at man glatter ut overflaten. Ved en eventuelt nedskalering kan nok disse kuttes ut. Hadde man laget tykkelsen mellom de små hulrommene og overflaten større, så hadde man dempet den tydlige strukturen i modellen. Styrkeforholdet $i_s = 3.7$ på silikonblandingen ga en nokså sterk og hard modell. Muligens burde man laget en mykere modell som gir et større arbeidsområde enn nåværende. Nåværende arbeidsområde er fra 0 til 30mm. Dette bør man vurdere hvis en skal støpe en ny modell.

Trekassen ble laget kun for å stive opp modellen, og kunne vært konstruert i andre materialer. Men tre er pent å se på og enkelt å håndtere. Uten trekassen bøyes pleksiglasset så mye at man får stor ulinearitet i overflategeometrien.

Strupeløsningen fungerte som den skulle, selv om man må være stødig på hånden ved kalibrering av det taktile displayet. Det finnes strupeventiler man kan kjøpe for individuell struping i begge flowretninger og enkel struping som virker begge retninger samtidig (som vår strupeløsning). Se appendiks G for alternative strupeventiler.

Svakhetene med modellen er at man må lime på platen for slangetilkobling. Hvis det ikke gjøres på riktig måte, øker det faren for lekkasje. Det er viktig at silikonen har en ren overflate og at man bruker nok lim på platen for slangetilkobling. Ved ett tilfelle måtte jeg etterlime kammer

nr 10. Måten det ble gjort på var å fylle en kanyl med silikonlim og sprøyte lim inn i lekkasjen. Svakheten er størst rundt kantene til platen for slangetilkobling, så her må man være ekstra nøye når man limer. Slangetilkobling til de minste kammerene var heller ikke noen optimal løsning. Selve skruene var på grensen til å være for korte og uten en dråpe silikonlim på skruene, kunne det føre til at luft lakk ut til atmosfæren gjennom gjengene.

Alt i alt så fungerte den mekaniske kontruksjonen likevel godt som gir en robust modell og tåler harde fysiske antrengelser.

7.1.2 Dynamikk til taktilt display og LabVIEW-program

Nåværende løsning setter harde sanntidskrav til programvare og maskinvare på grunn av ventildesignet. Man burde ideelt hatt en ventil for innluft og en ventil for utluft eventuelt en 5/3-veis ventil som tidligere nevnt. Modellens oppførsel hadde blitt fundamentalt forandret, til det bedre. Man trenger ikke dobbelt sett med ventiler til en slik løsning. De store kammerene klarer seg fint på egen hånd. En kan også velge å gi forskjellig struping til returluften fra kammerene, slik at vi får en tidskonstant for innluft og en for utluft. Ulempen er ulik responstid for å blåse opp ett kammer og slippe ut luft.

Når det gjelder responstiden til det taktile displayet har nåværende modell for langsom tidskonstant. Med en responstid på opptil 3 sekunder blir det en flaskehals for en kirurg som aktivt bruker displayet under en operasjon. Hvis man bruker et teleskopisk instrument (f.eks. en klype) så vil hurtige endringer oppstå, og displayet greier ikke å gjenskape overflaten hurtig nok. Hvis instrumentet brukes som en statisk føler slik at kirugen kan føle og ta på det forstørrede område av det taktile displayet, så vil nåværende tidsrespons være bra nok. Ved nedskalering minker tidskonstanten.

Kjøring av systemet fungerte bra og oscilleringen i silikonmassen var omtrent ikke synlig. Derimot fikk systemet av og til "hikke" og stoppet opp i 100-200ms når silikonmassen var helt oppblåst. Jeg greide ikke finne ut hvorfor, men årsaken kan være at forbruket av luft var for stort i forhold til dimensjoneringen av ventilene. Luftmanifoilen får for stort trykkfall og greier ikke forsyne hulrommene med nok trykk. Man kan kompensere for det lille volumet i manifoilene ved å øke trykket fra luftregulatoren. Arbeidstrykket er satt til 2 bar og manometernåla skjelver nesten 1 bar ved maksimal belastning. Det tyder på stort trykkfall. Man bør ikke justere opp arbeidstrykket uten å ha en sikkerhetsventil eller trykkvakt som hindrer at silikonmassen sprenges ved en feil. Og feil vil oppstå under eksperimentering og utvikling.

7.1.3 Systemidentifikasjon

Tilsynelatende ser modellen vår ut til å fungere bra. Det ble tatt for få tester til å grundig validere den fysiske modellen. Grunnen er at tiden ble litt knapp mot slutten av prosjektet. Middelverdien er ikke trukket fra i analysen, noe som alltid skal gjøres. Grunnen til at det likevel virket er at vi har valgt origo på en lur måte. Hvis vi tar med fratrekk i middelverdi, så får vi likningen

$$\Delta Y = T \Delta P \tag{7.1}$$

$$Y - Y_0 = T \left(P - P_0 \right)$$

$$\Rightarrow T = \Delta Y \Delta P^{\dagger} \tag{7.2}$$

Tmatrisen finnes ved å trekke fra middelverdien fra måleseriene. Dermed blir den numeriske T

matrisen i appendiks E annerledes. Når vi studerer den numeriske matrisen legger vi merke til at kolonne 10 og 25 inneholder bare 0'ere. Det betyr at disse kammerene ikke ble trykksatt under målingen av overflategeometrien. Grunnen er at disse to kammerene hadde en liten lekkasje som ikke ble tettet. Man kan også se på trykkreferansematrisen i samme appendiks, at disse kammerene ikke er trykksatt.

For å beregne ny trykkvektor p, tar vi utgangspunkt i likningen 7.1.

$$y - y_0 = T(p - p_0) \tag{7.3}$$

$$p = p_0 + T^{\dagger} (y - y_0) \tag{7.4}$$

hvor p_0, y_0 er middelverdien til vektorene.

Da slipper vi også å optimalisere med lsqlin() i matlab. Simulert resultat vises i figur 7.1.

Tapsfunksjonen for dette systemet vises i figur 7.2. Resultatet er at vi nå får helt andre tapsfunksjoner enn tidligere. Måling nr 18 er ikke minst tilpasset lenger, nå er det måling 27 som vist i figur 7.3.



Figur 7.1: Plott av geometri, avvik og trykk korrigert for middelverdi.

Likevel skal vi ikke legge bort tanken rundt optimalisering av trykket som gjenskaper geometrien i det taktile displayet. Vi bør gi ulike begrensninger på pådraget. Vi hadde definert et gyldig arbeidsområde i kapittelet om dynamikk i likning 4.6 og 4.7. Disse kan brukes som begrensning av pådraget. Den nedre grensen for pådrag bør tilpasses til den fysiske størrelsen på kammerene. Et pådrag til kammer 1,2,3 mellom 0 og 10kPa gir ingen synlig effekt.



Figur 7.2: Tapsfunksjon V korrigert for middelverdi.



Figur 7.3: Plott av måling nr 27 som ga det største avviket ved fratrekk av middelverdi.

7.2 Konklusjon

Målene med oppgaven er definert i problemformulering i kapittel 2.2. Alle målene ble oppnådd med tilfredstillende resultater med unntak av å finne en god modell av det taktile displayet. Her må man jobbe videre med mer analyse av måledataene (matlabfil analyse2.mat) og validering av modellen. I LabVIEW kan man bygge videre på styringsprogrammet ved å grafisk angi en referansegeometri som gjenskapes på det taktile displayet. Videre må man integrere modellparametrene funnet ved systemidentifikasjon i LabVIEW.

Sluttstatus er at vi nå har laget et andre generasjons taktilt display som fungerer bra. Barnesykdommene fra prototyp nr 1 er borte. Fortsatt mener jeg det er en tvilsom løsning å bruke en ventil til hvert kammer i denne laboppstillingen, noe som fører til harde sanntidskrav til reguleringen og en lang tidskonstant til det taktile displayet.

7.3 Anbefaling

Det gjentår enda litt arbeid for å få modellen fullt ut brukbar. Man må tilpasse det taktile displayet til sensorsiden, eventuelt bygge konvertere og integrere trykk/overflatesensoren i LabVIEW-programmet. Fordelen er at man kan bygge på det eksisterende grunnlaget som er lagt. Ulempen i dag er at displayet kun har to dimensjoner. Det er bra nok hvis vi nedskalerer displayet og tilpasser det til en fingertupp eller liknende. En annen ulempe vil også være alle de pneumatiske slangene som må tilkobles fingrene/teleskopinstrumentet og gir en begrenset bevegelsesfrihet. Hvis formålet er at kirurgen skal legge hånden på dagens display, som er fastmontert på en modul, da må vi konstruere en versjon i 3-dimensjoner. Et fremtidig mål kan være å gjenskape form, hardhet og hurtige forandringer i tre dimensjoner. Ved en nedskalering av det taktile displayet må en annen løsning benyttes for å koble sammen slanger og hulrom i silikonmassen. En ide er å bruke ballong eller kondom innvendig i et hulrom og feste slanger til disse. Produsenten av silikonen, Centri, har i sin produktkatalog varierende størrelser av ballonger i latex [11].

Referanser

- [1] Tone Rossen Christensen, Dynamically reconfigurable geometry for tactile displays, Masteroppgave NTNU 2004
- [2] Datablad, Trykksensor Motorola MPX5100GP. Tilgjengelig på http://www.datasheetarchive.com/download.php?pi=241544 [sist besøkt 17.11.2004]
- [3] Datablad Festo pneumatiske ventiler, type 197334 MH1. Tilgjengelig på http://catalog.festo.com/data/CAT_PDF/001/Miniature-Valves_0310_EN.pdf [sist besøkt 17.11.2004]
- [4] Datablad og Manual Adlink Analog I/O kort PCI-9113A.
 Tilgjengelig på http://www.adlinktech.com/products/DataAcquisition/PCI-9113A.htm
 [sist besøkt 17.11.2004]
- [5] Datablad og Manual Adlink Digital I/O kort PCI-7248. Tilgjengelig på http://www.adlinktech.com/PD/web/PD_detail.php?pid=20&seq=2&id=3&sid=22
 [sist besøkt 17.11.2004]
- [6] NuDAQ LabVIEW driver manual & Functional Reference.
- [7] Finn Haugen, Regulering av dynamiske systemer, lærebok, Tapir Forlag 1996.
- Using LabVIEW to Create Multithreaded VIs for Maximum Performance and Reliability. Tilgjengelig på http://zone.ni.com/devzone/conceptd.nsf/webmain /D2E196C7416F373A862568690074C759/\$File/AN114.pdf [sist besøkt 17.11.2004]
- Using LabVIEW to Create Multithreaded DAQ Applications, National Instruments Tilgjengelig på http://zone.ni.com/devzone/conceptd.nsf/webmain /4C94C56FE0BBF5F686256A2C006C139C [sist besøkt 17.11.2004]
- [10] Datablad for silikonlim Elastosil E43, http://www.wacker.com/internet/webcache/de_DE/PTM/TM /Elastosil/Elastosil_E/ELASTOSIL_E43.pdf [sist besøkt 17.11.2004]
- [11] Produktkatalog fra www.centri.se, produsent av silikon. http://www.centri.se/pdf/centri_materials_supplies.pdf [sist besøkt 25.11.2004]

Del II Appendiks
Tillegg A

Signaltabell for digital ut og analog inn

A.1 Digital ut

Terminalboard digital out											
tactile		25p dsub	26p ribbon	screw	50p ribbon	I/O	card	Labvie	ew		
display		male	flat cable	terminal	flat cable	48 0	dig in				
Chamber	Signal		A,B	X2:	X1:	Pin	Name	Dig Ch Group	CH:		
1	valve1	3	A3	47	VI	XCN2:47	P2A0	4	0		
2	valve2	5	A5	45	GN	XCN2:45	P2A1	4	1		
3	valve3	7	A7	43	OG	XCN2:43	P2A2	4	2		
4	valve4	9	A9	41	BN	XCN2:41	P2A3	4	3		
5	valve5	11	A11	39	WH	XCN2:39	P2A4	4	4		
6	valve6	13	A13	37	VI	XCN2:37	P2A5	4	5		
7	valve7	15	A15	35	GN	XCN2:35	P2A6	4	6		
8	valve8	17	A17	33	OG	XCN2:33	P2A7	4	7		
9	valve9	19	A19	31	BN	XCN2:31	P2B0	5	8		
10	valve10	21	A21	29	WH	XCN2:29	P2B1	5	9		
11	valve11	23	A23	27	VI	XCN2:27	P2B2	5	10		
12	valve12	25	A25	25	GN	XCN2:25	P2B3	5	11		
13	valve13	1	B1	23	OG	XCN2:23	P2B4	5	12		
14	valve14	3	B3	21	BN	XCN2:21	P2B5	5	13		
15	valve15	5	B5	19	WH	XCN2:19	P2B6	5	14		
16	valve16	7	B7	17	VI	XCN2:17	P2B7	5	15		
17	valve17	9	B9	15	GN	XCN2:15	P2C0	6	16		
18	valve18	11	B11	13	OG	XCN2:13	P2C1	6	17		
19	valve19	13	B13	11	BN	XCN2:11	P2C2	6	18		
20	valve20	15	B15	9	WH	XCN2:9	P2C3	6	19		
21	valve21	17	B17	7	VI	XCN2:7	P2C4	7	20		
22	valve22	19	B19	5	GN	XCN2:5	P2C5	7	21		
23	valve23	21	B21	3	OG	XCN2:3	P2C6	7	22		
24	valve24	23	B23	1	BN	XCN2:1	P2C7	7	23		
25	valve25	25	B25	6	BU	XCN1:47	P1A0	0	24		
	GND25			8	GY	XCN1:48					
	5V			49	BK						
	GND			50	WH						
	Note: pin 6	and 8 on X	CN1/2 are u	used for eve	ent and ext.	clock, which	n is not in us	se in this configu	Iration		

Figur A.1: Signaltabell for digital ut. Fra silikonkammer til LabVIEW.

A.2 Analog inn

Terminalboard analog in									
tactile		screw	37p dsub	Analig i/o	Labview				
display		terminal	female	card					
Chamber	Signal	X2:	X1:		CH				
1	PS1	1	1	Al0	0				
2	PS2	20	20	Al1	1				
3	PS3	2	2	Al2	2				
4	PS4	21	21	AI3	3				
5	PS5	3	3	Al4	4				
6	PS6	22	22	AI5	5				
7	PS7	4	4	Al6	6				
8	PS8	23	23	AI7	7				
9	PS9	5	5	AI8	8				
10	PS10	24	24	AI9	9				
11	PS11	6	6	AI10	10				
12	PS12	25	25	AI11	11				
13	PS13	7	7	AI12	12				
14	PS14	26	26	AI13	13				
15	PS15	8	8	AI14	14				
16	PS16	27	27	AI15	15				
17	PS17	11	11	AI16	16				
18	PS18	30	30	AI17	17				
19	PS19	12	12	AI18	18				
20	PS20	31	31	AI19	19				
21	PS21	13	13	AI20	20				
22	PS22	32	32	Al21	21				
23	PS23	14	14	AI22	22				
24	PS24	33	33	AI23	23				
25	PS25	15	15	Al24	24				
	IGND	9	9						
	IGND	10	10						
	IGND	19	19						
	IGND	28	28						
	IGND	29	29						
	GND	GND(38)							
	IGND = ISO	OLATED EA	ARTH						

Figur A.2: Signaltabell for analog inn. Fra silikonkammer til LabVIEW.

Tillegg B

Tegninger av laboppsett

B.1 Skisse digital ut



Layout digital ut fra PC til ventilstyring

B.2 Skisse analog inn



Layout analog inn

B.3 Mekanisk arbeidstegning - Støpemal



Mekanisk tegning av støpemal

B.4 Mekanisk arbeidstegning - Silikonmodell



B.5 Mekanisk arbeidstegning - Plate for slangetilkobling



B.6 Mekanisk arbeidstegning - Trekasse



Tillegg C LabVIEW

C.1 Programnavn

Programnavn	Beskrivelse/Hensikt
TaktileDisplay_b10.vi	Hovedprogram for styring og regulering av taktilt display
analog_in_median2.vi	Sampler data fra trykksensorene, kompenserer for temperatur
analog_in_median_2_subvi.vi	Subvi for sampling, medianfiltrering
digital_out_subvi5.vi	Sender pådrag til ventiler
<pre>save2matlab_subvi.vi</pre>	Lagrer alle kanalene til fil
<pre>save2spreadsheet_subvi.vi</pre>	Lagrer trykkreferanse til fil
stoppvariabel.vi	Global stoppvariabel
Hastighetstest_av_flereventiler.vi	Hastighetstest av pneumatisk Festoventil.

C.2 Sample Pressure - analog inn



Figur C.1: analog_in_median2.vi



Figur C.2: analog_in_median2_subvi.vi



C.3 Set Valves - digital ut



C.4 Logging av kanaler til fil



Figur C.4: save2spreadsheet_subvi.vi

C.5 Lagre referansetrykk til fil



Figur C.5: save2matlab_subvi.vi

C.6 Hastighetstest av ventiler



Figur C.6: Blokkdiagram: has tighetstest_av_flereventiler.vi

Tillegg D

Matlabscript for diskretisering av overflategeometri

D.1 Scriptnavn

Programnavn	Beskrivelse/Hensikt
diskretisering.m	Script som henter inn foto av overflaten til det taktile displayet
	og diskretiserer målingene
TransformasjonsmatriseT.m	Beregner matrisen T og plotter resultat
analyse2.mat	Inneholder måledata til diskretiserte overflater fra taktilt display
analyse2_komplett.mat	Inneholder alle variablene fra diskretisering.m

D.2 Diskretisering.m

```
clear all;
close all;
%
   %Tast inn st\U{f8}rrelse p\U{e5} trekasse i [mm]
       xkasse_mm = 210;
       ykasse_mm = 109;
   %bruk DataCursor i figurvindu, lagre punkt 1 \U{f8}verst til venstre p\U{e5} trekassen som
   %cursor_info1, og punkt 2 nederst til h\U{f8}yre p\U{e5} trekassen som cursor_info2
       x1 = 567; %cursor_info1.Position(1);
       x2 = 1778; %cursor_info2.Position(1);
       y1 = 890;
       y1 = 890; %cursor_info1.Position(2);
y2 = 1519; %cursor_info2.Position(2);
                  %cursor_info1.Position(2);
           x_skalert = xkasse_mm/(x2-x1);
           y_skalert = ykasse_mm/(y2-y1); %x_skalert og y_skalert skal v\U{e6}re like.
           %Ellers er bildet skjevt eller du har valgt un\U{f8}yaktige punkter.
```

```
% genererer arbeidsomr\U{e5}det til det taktile displayet med punkt (x3,y3) og (x4,y4)
   % delta y er antall pixels i h\U{f8}yderetning
       delta_y = 200;
          x3 = round(x1+25/x_skalert); %25mm fra kant av trekasse til taktilt display
          y3 = y1;
          x4 = round(x2-25/x_skalert);
          y4 = y1-delta_y;
   % Tast inn antall bilder (antall m\U{e5}linger)
       m = 2;
   % path og nr til f\U{f8}rste bilde i serie
       nr =41;
       p = sprintf('D:\\prosjekt\\Capture\\Capture2\\Capture_%05d.JPG');
%
k = 25; %antall kammere i taktilt display
   n = x4-x3; % n er oppl\U{f8}sningen til bildet i pixels i x-retning
   range_x = n;
   range_y = y3-y4;
   %skalering_x = virkelig_x/range_x; %skalering av x-akse
   rotasjonsvinkel = 0.1; %roterer bilde hvis skjevt
% Laster inn bilde, gj\U{f8}r om til bine\U{e6}rt svart-hvitt
%
% For-sl\U{f8}yfe laster inn seriebilder og legges i tabell
% I(i) legger inn, I{i} tar ut sett med multidimensjonale tabeller
   %initialiserer celler
   boundary = cell(m,1);
   x = cell(m, 1);
   y = cell(m, 1);
   yd = cell(m,1);
   I = cell(m, 1);
   BW = cell(m,1);
%HOVEDSL\U{d8}YFE START
for i = 1:m
       sprintf('D:\\prosjekt\\Capture\\Capture2\\Capture_%05d.JPG',nr)
       picture=sprintf('D:\\prosjekt\\Capture\\Capture2\\Capture_%05d.JPG',nr);
       I(i) = {imread(picture)};
       BW(i) = {im2bw(I{i}, graythresh(I{i}))};
       %figure(i+50),imshow(BW{i});
       nr = nr+1;
```

```
I(i) = {imrotate(I{i},rotasjonsvinkel)}; %roterer bildet etter vinkel
if O
    % Plotter f\U{f8}rste bilde for \U{e5} klippe ut interessemr\U{e5}det
        figure(i);
        imshow(I{1});
        hold on; %plotter et rektangel
        %rektangel for trekasse
            line([x1 x2],[y1 y1],'Color','w','LineWidth',1);
            line([x2 x2],[y1 y2],'Color','w','LineWidth',1);
            line([x1 x2],[y2 y2],'Color','w','LineWidth',1);
            line([x1 x1],[y1 y2],'Color','w','LineWidth',1);
        %rektangel for arbeidsomr\U{e5}de til taktilt display
            line([x3 x4],[y4 y4],'Color','w','LineWidth',2);
            line([x4 x4],[y3 y4],'Color','w','LineWidth',2);
            line([x3 x4],[y3 y3],'Color','w','LineWidth',2);
            line([x3 x3],[y3 y4],'Color','w','LineWidth',2);
        hold off;
end
    %Plukker ut regionen som skal behandles
        crop(i) = {BW{i}(y4:y3,x3:x4,:)};
%
    figure(i+100),imshow(crop{i});
    %Finner kanter med bwtraceboundary
        dim = size(crop{i});
        kol = 1;
        rad = delta_y+1;
        B = bwtraceboundary(crop{i},[rad, kol],'N');
        boundary(i) = {B};
%
        plot(B(:,2),B(:,1),'g','LineWidth',1);
        y(i) = {boundary{i}(:,1)}; %plukker ut alle kantene, en "firkant"
        x(i) = {boundary{i}(:,2)};
%
          plot(x{i},y{i}, 'r','LineWidth', 2);
        y(i) = {(delta_y+1)-y{i}'}; % snur grafen riktig veg
if O
   %Plotter figur skalert i pixels
    hold on
    figure(i+200);
        plot(x{i},y{i}); grid;
        axis([0 range_x 0 range_y]);
        legend('Boundarytracing');
        title('Boundarytracing av taktilt display');
        xlabel('pixel x');
        ylabel('pixel y');
        %text(x,y,'string');
```

```
hold off
end
xd = 1:n;
   for j = 1:n
      a = x{i}==j;
      yy(j)=max(y{i}(a));
   end
   yd(i) = {yy};
   yO(i) = mean(yy);
   s=size(yd{i});
if 1
   %Plotter diskretisert figur i pixels
   hold on
   figure(i+250);
      yd(i) = {yd{i}'};
      plot(xd,yd{i}); grid;
      %axis([0 range_x 0 range_y]);
      axis equal;
      legend('Diskretisert overflategeometri');
      title('Diskretisert geometri av taktilt display');
      xlabel('pixel x');
      ylabel('pixel y');
      %text(x,y,'string');
   hold off
end
if O
hold on;
      figure(i+300);
      xd(1,:)=xd(1,:)*x_skalert;
      yd(i) = {yd{i}*y_skalert};
      %crop(i) = {I{i}(y_start:y_slutt, x_start:x_slutt,:)};
      %imshow(crop{i})
      plot(xd,yd{i}); grid;
      axis([0 range_x*x_skalert 0 range_y*y_skalert]);
      axis equal;
      legend('M\U{e5}lte verdier [mm]');
      title('Plott av m\U{e5}lt geometri p\U{e5} taktilt display');
      xlabel('X [mm]');
      ylabel('Y [mm]');
```

```
hold off;
end;
   %Samler sammen m\U{e5}lingene og stabler de i kolonner
   %M\U{e5}lematrisen; Y
       yd=yd';
       Y(i,:)=yd{i};
   %trekker fra middelverdien
        dY(i,:)=yd{i}-mean(yd{i});
%
    hold on, plot(xd,dY(i,:)), grid, axis equal;
   clear I; % frigj\U{f8}rer minne - bildene tar stor plass
   clear BW;
   clear crop;
   clear boundary;
   clear B;
end %HOVEDSL\U{d8}YFE SLUTT
%
%k=size(y);
   %laster inn referansetrykkmatrisen P, p\U{e5}drag i kPa
       P=load('d:\prosjekt\Capture\Capture2\Capture2.txt');
   % matrisem\U{e5}lingene stables bortover, med kammere som rader, og samples som
   % kolonner m=samples, k=kammer dim=[k*m]
       P=P';
       P=P(2:26,1:42);
       %P=P(2:26,1:k(1));
       %trekker fra middelverdien
       for i=1:m
          for j=1:k
              dP(j,i)=P(j,i)-mean(P(:,i));
           end
       end
       P_inv = pinv(dP');
       %P=p'; %Den O'store P-matrisen : rad=kammer, kolonner=trykkref i
       %P_inv = pinv(P); %matlabs egen pseudo-invers
   %Dimensjon
       sP=size(P_inv);
       sY=size(dY);
save analyse_komplett.mat;
```

```
save('analyse.mat', 'Y', 'dY', 'y0', 'delta_y', 'n', 'P', 'dP');
   %I Transformasjonsmatrisa T
         T=dY'*P_inv'
   %
   %Test med lsqlin
   %
       lsqlin
   %II Test estimert y
%
         yy=T'*P(:,2);
   %III test estimert p
%
         pp=pinv(T)'*yy;
    if O
   %Plotter referansetrykk og estimert trykk
   hold on
   figure(i+400);
       plot(1:k,P(:,1),'r:',1:k,pp,'b-'); grid;
       axis([1 k 0 100]);
       legend('Referansetrykk P1', 'estimert trykk P1');
       title('Plott av estimert trykk');
       xlabel('kammer k');
       ylabel('Trykk P [kPa]');
   hold off
end
if O
   %Plotter estimert y og virkelig y
   hold on
   figure(i+450);
       %yd(i) = {yd{i}'};
       plot(xd,yd{1},'r:',xd,yy','b-'); grid;
       %axis([0 range_x 0 range_y]);
       axis equal;
       legend('virkelig y','estimert y');
       title('Estimert geometri av taktilt display');
       xlabel('pixel x');
       ylabel('pixel y');
       %text(x,y,'string');
   hold off
end
```

D.3 TransformasjonsmatriseT.m

```
%test av transformasjonsmatrisen T
clear all;
```

close all;

```
analyse = load('analyse2.mat'); %laster inn variabler fra diskretiserings script
Y = analyse.Y;
                          %diskretisert geometri
dY = analyse.dY;
                          %diskretisert geometri fratrukket middelverdi
P = analyse.P;
                          %trykkreferansematrise
dP = analyse.dP;
                          %trykkreferanse fratrukket middelverdi
n = analyse.n;
                          %antall pixels i horisontalretning
delta_y = analyse.delta_y;%antall pixels i vertikalretning
                          %st\U{f8}rrelsen p\U{e5} arbeidsomr\U{e5}det til takilt display i horisont
range_x=n;
range_y=delta_y+1;
                          %st\U{f8}rrelse i vertikal retning
x=(1:n);
faktor=160/n;
                          %skalering fra pixler til mm
k=25;
                          %antall silikonkammer
m=size(P); m=m(2);
                          %antall m\U{e5}linger m
dP_inv = pinv(dP');
                          %pseudo-invers av dP
P_inv = pinv(P');
                          %pseudo-invers av P
%Beregner T
T = Y'*P_inv';
T_{inv} = pinv(T);
%dT = dY'*dP_inv';
for i=1:m
    sprintf('Beregner plott %02d',i)
    Pest(i)={lsqlin(T,Y(i,:),[],[],[],[],zeros(k,1),80*ones(k,1))};
    %Pest(i)={lsqnonneg(T,Y(i,:)')};
    %Pest(i)={T_inv*Y(i,:)'*faktor}; %Dette kan gi negative trykkverdier, fyfy!
    Yest(i)={T*Pest{i}*faktor};
    e(i)={Y(i,:)'*faktor-Yest{i}};
    Vi(i)=e{i}'*e{i};
end
%Plukk ut hvilken m\U{e5}leserie du vil se n\U{e6}rmere p\U{e5}
nr=18;
if 1
  figure(1);
     subplot(311) %Plott av estimert y i mm
        x=x*faktor;
        plot(x,Yest{nr}',x,Y(nr,:)'*faktor,'--r','LineWidth',1), grid;
        axis equal
        legend('estimert y','virkelig y',-1);
        title(['Sammenligning av estimert og virkelig Y, M\U{e5}leserie nr: ' num2str(nr)]);
        xlabel('x [mm]');
        ylabel('y [mm]');
     subplot(312) %Plott av feilen e=y-yest i mm
        plot(x,e{nr},'LineWidth',1); grid;
```

```
legend('e=y-y_e_s_t',-1);
title(['Estimatfeil e. V_i = ',num2str(Vi(nr))]);
xlabel('x [mm]');
ylabel('y [mm]');
subplot(313)
hold on;
set(stem(1:k,Pest{nr}'));%,'MarkerFaceColor','blue');
set(stem(1:k,P(:,nr)'),'MarkerFaceColor','red','Marker','^');
axis([1 k 0 100]);
grid;
legend('estimert P','referanse P',-1);
title(['Estimert trykk P og virkelig trykkreferanse P, M\U{e5}leserie nr: ' num2s'
xlabel('Kammer k');
ylabel('Trykk P [kPa]');
hold off;
```

end

```
if 1
   figure(2)
        %Tapsfunksjon V
        V = sum(Vi(:))
       h = stem(1:m,Vi,'fill','-');
        set(get(h,'BaseLine'),'LineStyle','-')
        set(h,'MarkerFaceColor','red')
        axis([1 m 0 inf]);
        grid;
        legend('Tapsfunksjon V_m',-1);
        title('Tapsfunksjon V for hver m\U{e5}ling');
        xlabel('M\U{e5}leserie m (sampling nr)');
        ylabel('e^2');
end
if O
   figure(3) %Plotter maks og min p\U{e5}drag, Trykkvektor p
   for j = 1:k
        Pmax(j)=max(Pest{j});
        Pmin(j)=min(Pest{j});
   end
        hold on
            Stem(1:k,Pmax);
            Stem(1:k,Pmin,':');
        hold off
        axis([0 k -Inf Inf])
        grid;
        legend('Maks og min p',-1);
        title('Maks og min p\U{e5}drag for trykkvektor p');
        xlabel('M\U{e5}leserie m (sampling nr)');
        ylabel('Trykk p [kPa]');
```

end

```
if 0
  i=1;

figure(1);
  %Plott av estimert y i mm
hold on
for i=1:m
  plot(x*faktor,Y(i,:)*faktor), grid;
end
hold off
  %axis equal
  legend('Diskretisert geometri',1);
  axis([0 160 0 Inf])
  title('R\U{e5}data fra m\U{e5}leserie');
  xlabel('x [mm]');
  ylabel('y [mm]');
```

end

```
if 1 %plott av varians
    %p_est-p
    sig2=V/(m-n);
    var_Pest=sig2*inv(P'*P);
```

end

Tillegg E

Numeriske data

E.1 Måledata

Trykkreferanse ${\cal P}$ som genererer måledata er vist i figur E.1

E.2 Numerisk transformasjonsmatrise T

Numerisk transformasjonsmatriseTer vist i figur E.2

<u>Måling nr</u>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	<u>10</u>	<u>11</u>	<u>12</u>	<u>13</u>	<u>14</u>	<u>15</u>	<u>16</u>	<u>17</u>	<u>18</u>	<u>19</u>	<u>20</u>	<u>21</u>	<u>22</u>	<u>23</u>	<u>24</u>	<u>25</u>
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	30	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	30	30	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	30	30	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	40	30	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	40	40	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	40	40	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	50	40	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	50	50	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	50	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	60	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	60	60	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	65	65	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	60	10	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	20	10	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	20	60	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	80	0	0	0	Ő	0	õ	Ő	0	0	0	Ő	0	0	0	0	0	0	0	0	0	õ
22	0	Ő	0	0	80	0	0	Ő	0	õ	Ő	0	0	0	Ő	0	0	0	0	0	0	0	0	0	õ
23	õ	õ	Ő	Õ	0	80	Õ	Ő	Ő	õ	Ő	õ	Ő	õ	õ	õ	Ő	Ő	õ	Ő	Ő	õ	õ	Ő	õ
24	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	80	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	80	80	80	80	80	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	60	60	60	60	80	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	40	40	40	40	40	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	80	80	0	0	0	0	0	0	0	0	80	80	80	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	80	80	80	80	0	0	0	0	80	80	80	80	80	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	80	80	80	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	80	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	80	0	0	80	0	80	0	80	0	80	0	80	0
37	0	0	0	U	U	0	U	0	U	0	80	0	80	0	80	U	80	0	80	0	80	U	80	0	0
38	0	0	0	U	U	0	U	0	U	0	0	0	80	80	0	0	0	0	U	80	80	U	0	0	0
39	0	0	0	U	U	0	U	0	U	0	80	80	0	0	80	80	0	0	80	80	0	U	80	80	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	80	0	0	0	80	0	0	0	80 60	0
41	30	30	30	50	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	00	00	00	0
42	50	5 0	50	50	U	U	U	U	ວບ	U	U	U	U	U	U	U	U	60	00	υu	60	00	υo	00	U

Figur E.1: Trykkreferanse P som genererer måledata av taktil display. Rader er målen
r og kolonner er ønsket trykk i silikonkammerer. Dimensjon
 $[m\times k]$

-0,22 0,27	0,42	0,06	0,06	0,12	0,07	0,16	0,15	0,00	-0,04	0,03	-0,05	-0,16	-0,10	-0,16	-0,09	0,09	0,20	0,09	0,16	0,06	-0,05	0,09 0,00
-0,20 0,27	0,42	0,05	0,05	0,11	0,06	0,17	0,17	0,00	-0,05	0,03	-0,06	-0,16	-0,10	-0,17	-0,08	0,09	0,21	0,09	0,17	0,06	-0,05	0,10 0,00
-0,21 0,29	0,42	0,05	0,06	0,11	0,06	0,17	0,17	0,00	-0,04	0,04	-0,07	-0,16	-0,10	-0,18	-0,09	0,10	0,22	0,09	0,17	0,07	-0,05	0,09 0,00
-0,20 0,20	0,43	0,02	0.04	0,09	0.04	0,12	0,35	0,00	0,00	0,10	-0,05	-0,17	-0,09	-0,19	-0,11	0.12	0,22	0,09	0,17	0,05	-0,11	0,03 0,00
-0.19 0.26	0.46	0.02	0.03	0.07	0.03	0.10	0.41	0.00	0.02	0.14	-0.05	-0.19	-0.08	-0.22	-0.12	0.15	0.23	0.09	0.18	0.05	-0.14	0.02 0.00
-0,19 0,28	0,45	0,02	0,02	0,07	0,02	0,10	0,42	0,00	0,01	0,13	-0,05	-0,19	-0,09	-0,21	-0,12	0,14	0,23	0,09	0,18	0,05	-0,13	0,03 0,00
-0,20 0,30	0,46	0,02	0,02	0,07	0,02	0,10	0,44	0,00	0,00	0,11	-0,05	-0,19	-0,09	-0,21	-0,12	0,14	0,23	0,10	0,19	0,05	-0,11	0,04 0,00
-0,22 0,31	0,47	0,02	0,02	0,07	0,02	0,10	0,45	0,00	0,00	0,11	-0,06	-0,20	-0,09	-0,21	-0,12	0,14	0,23	0,10	0,19	0,06	-0,11	0,04 0,00
-0,23 0,33	0,47	0,02	0,02	0,07	0,02	0,10	0,46	0,00	0,00	0,12	-0,06	-0,21	-0,09	-0,23	-0,13	0,15	0,24	0,10	0,20	0,06	-0,12	0,04 0,00
-0,25 0,37	0,47	0,01	0,01	0,00	0,01	0,10	0,40	0,00	0,00	0,13	-0,00	-0,20	-0,09	-0,22	-0,13	0,15	0.24	0,10	0,20	0,00	-0,13	0,03 0,00
-0.24 0.39	0.46	0.01	0.01	0.06	0.01	0.09	0.52	0.00	0.01	0.15	-0.06	-0.22	-0.10	-0.24	-0.14	0.16	0.26	0.11	0.21	0.06	-0.15	0.03 0.00
-0,23 0,38	0,46	0,00	0,00	0,05	0,00	0,08	0,53	0,00	0,00	0,14	-0,06	-0,21	-0,09	-0,24	-0,12	0,16	0,24	0,10	0,21	0,06	-0,14	0,04 0,00
-0,22 0,37	0,49	0,01	0,01	0,06	0,01	0,08	0,54	0,00	-0,01	0,13	-0,08	-0,20	-0,06	-0,23	-0,11	0,15	0,23	0,09	0,21	0,09	-0,14	0,05 0,00
-0,21 0,36	0,49	0,00	0,00	0,05	0,00	0,07	0,55	0,00	-0,01	0,12	-0,09	-0,19	-0,05	-0,23	-0,11	0,15	0,22	0,09	0,21	0,10	-0,13	0,05 0,00
-0,21 0,38	0,49	0,00	0,00	0,05	0,00	0,06	0,57	0,00	-0,02	0,12	-0,10	-0,16	-0,03	-0,22	-0,10	0,15	0,21	0,08	0,20	0,11	-0,13	0,05 0,00
-0,21 0,38	0,50	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,57	0,00	-0,02	0,11	-0,10	-0,15	-0,03	-0.22	-0,10	0,15	0,20	0,08	0,20	0,12	-0,12	0.05 0.00
-0.22 0.41	0.52	-0.01	0.00	0.05	0.00	0.06	0.59	0.00	-0.03	0.11	-0.11	-0.13	-0.01	-0.22	-0.10	0.14	0.20	0.07	0.20	0.14	-0.12	0.07 0.00
-0,23 0,42	0,53	-0,02	0,00	0,05	0,00	0,06	0,60	0,00	-0,03	0,10	-0,11	-0,13	-0,01	-0,21	-0,09	0,13	0,20	0,07	0,19	0,15	-0,11	0,07 0,00
-0,22 0,42	0,53	-0,01	0,00	0,05	0,00	0,06	0,60	0,00	-0,03	0,10	-0,10	-0,12	-0,02	-0,21	-0,10	0,12	0,21	0,06	0,18	0,15	-0,10	0,07 0,00
-0,23 0,44	0,54	-0,01	-0,01	0,04	-0,01	0,06	0,60	0,00	-0,03	0,11	-0,09	-0,11	-0,02	-0,21	-0,10	0,12	0,22	0,06	0,17	0,15	-0,11	0,07 0,00
-0,24 0,45	0,55	-0,01	-0,01	0,04	-0,01	0,06	0,61	0,00	-0,04	0,10	-0,09	-0,09	-0,01	-0,20	-0,10	0,10	0,23	0,05	0,15	0,16	-0,10	0,08 0,00
-0,23 0,47	0,54	-0,01	-0,01	0,04	-0,01	0,06	0,62	0,00	-0,04	0,10	-0,09	-0,07	-0,03	-0,20	-0,11	0,10	0,24	0,05	0,14	0,10	-0,09	0,08 0,00
-0.23 0.48	0.55	-0.01	-0.01	0.04	-0.01	0.07	0.63	0.00	-0.04	0.09	-0.09	-0.06	-0.02	-0.18	-0.12	0.10	0.22	0.05	0.12	0.17	-0.05	0.06 0.00
-0,23 0,47	0,57	-0,02	0,00	0,05	0,00	0,07	0,64	0,00	-0,04	0,09	-0,09	-0,04	-0,02	-0,18	-0,12	0,10	0,22	0,05	0,11	0,17	-0,04	0,06 0,00
-0,22 0,49	0,56	-0,01	-0,01	0,04	0,00	0,07	0,64	0,00	-0,03	0,09	-0,08	-0,04	-0,02	-0,17	-0,12	0,11	0,20	0,05	0,10	0,16	-0,02	0,06 0,00
-0,22 0,49	0,58	-0,01	-0,01	0,04	-0,01	0,08	0,65	0,00	-0,03	0,09	-0,08	-0,03	-0,02	-0,17	-0,12	0,11	0,20	0,05	0,09	0,16	-0,02	0,05 0,00
-0,23 0,50	0,59	-0,01	-0,01	0,04	-0,01	0,08	0,65	0,00	-0,03	0,08	-0,09	-0,04	-0,02	-0,16	-0,12	0,11	0,19	0,06	0,09	0,15	0,00	0,05 0,00
-0,23 0,50	0,61	-0,01	-0,01	0,04	-0,01	0,08	0,65	0,00	-0,03	0,08	-0,09	-0,03	-0,02	-0,15	-0,12	0,12	0,17	0,06	0,09	0,15	0,01	
-0.23 0.50	0.63	-0.02	-0.02	0.03	0.00	0.08	0.67	0.00	-0.03	0.09	-0.08	-0.03	-0.02	-0.15	-0.12	0.11	0.19	0.05	0.09	0.16	0.00	0.06 0.00
-0,22 0,50	0,65	-0,02	-0,02	0,03	-0,01	0,08	0,68	0,00	-0,02	0,09	-0,08	-0,02	-0,02	-0,15	-0,12	0,11	0,18	0,05	0,08	0,16	0,01	0,06 0,00
-0,23 0,51	0,66	-0,02	-0,02	0,04	-0,01	0,08	0,68	0,00	-0,02	0,09	-0,08	-0,01	-0,02	-0,14	-0,11	0,10	0,17	0,04	0,07	0,15	0,00	0,07 0,00
-0,23 0,51	0,67	-0,02	-0,01	0,04	-0,01	0,08	0,68	0,00	-0,02	0,07	-0,08	-0,01	-0,02	-0,12	-0,11	0,10	0,16	0,05	0,06	0,14	0,03	0,07 0,00
-0,24 0,53	0,67	-0,02	-0,01	0,04	-0,01	0,08	0,69	0,00	-0,02	0,08	-0,08	0,00	-0,01	-0,12	-0,10	0,08	0,10	0,04	0,00	0,15	0,01	0,08 0,00
-0.22 0.51	0.70	-0.02	-0.01	0.04	-0.01	0.09	0.69	0.00	-0.01	0.06	-0.09	0.00	-0.01	-0.12	-0.09	0.10	0.14	0.04	0.07	0.14	0.04	0.09 0.00
-0,23 0,54	0,69	-0,01	-0,01	0,04	-0,01	0,09	0,70	0,00	-0,01	0,07	-0,08	0,00	-0,01	-0,12	-0,10	0,10	0,14	0,05	0,07	0,15	0,03	0,08 0,00
-0,21 0,52	0,70	-0,01	-0,01	0,04	-0,01	0,10	0,70	0,00	-0,01	0,07	-0,08	0,00	-0,01	-0,11	-0,09	0,09	0,14	0,05	0,07	0,15	0,03	0,09 0,00
-0,22 0,54	0,71	-0,01	-0,01	0,04	-0,01	0,10	0,70	0,00	-0,02	0,06	-0,09	0,01	-0,01	-0,11	-0,09	0,09	0,13	0,04	0,06	0,15	0,04	0,10 0,00
-0,23 0,53	0,73	-0,01	-0,01	0,04	-0,01	0,10	0,70	0,00	-0,02	0,06	-0,09	0,02	-0,01	-0,11	-0,09	0,09	0,13	0,04	0,06	0,16	0,04	0,10 0,00
-0.23 0.53	0,73	0.00	0.00	0.05	0.00	0.11	0.69	0.00	-0.02	0.06	-0.10	0.02	0.00	-0.10	-0.07	0.08	0.12	0.03	0.06	0.16	0.02	0.12 0.00
-0,23 0,53	0,77	-0,01	0,00	0,05	0,00	0,11	0,68	0,00	-0,03	0,05	-0,10	0,04	0,00	-0,10	-0,08	0,07	0,13	0,03	0,05	0,18	0,05	0,13 0,00
-0,23 0,53	0,79	-0,01	0,01	0,06	0,01	0,12	0,67	0,00	-0,03	0,05	-0,11	0,04	0,00	-0,09	-0,06	0,07	0,11	0,03	0,06	0,17	0,05	0,14 0,00
-0,24 0,55	0,80	-0,01	0,00	0,05	0,01	0,12	0,67	0,00	-0,03	0,04	-0,10	0,05	0,00	-0,09	-0,07	0,06	0,13	0,03	0,05	0,18	0,06	0,14 0,00
-0,23 0,55	0,80	-0,01	0,00	0,05	0,01	0,12	0,67	0,00	-0,03	0,04	-0,11	0,06	0,00	-0,09	-0,07	0,06	0,13	0,02	0,05	0,18	0,05	0,16 0,00
-0.23 0.57	0.82	-0,01	0,00	0,05	0.02	0,13	0,00	0,00	-0,03	0,04	-0,10	0,00	0,00	-0,09	-0.07	0,00	0,13	0,02	0,05	0,10	0,00	0,15 0,00
-0,24 0,57	0,83	-0,01	0,01	0,06	0,02	0,14	0,66	0,00	-0,02	0,05	-0,10	0,06	0,00	-0,08	-0,06	0,06	0,11	0.02	0,04	0,18	0,06	0,15 0,00
-0,24 0,57	0,84	-0,01	0,01	0,06	0,02	0,14	0,66	0,00	-0,02	0,05	-0,10	0,07	0,00	-0,08	-0,07	0,06	0,12	0,02	0,03	0,18	0,07	0,15 0,00
-0,25 0,58	0,85	0,00	0,01	0,06	0,02	0,14	0,66	0,00	-0,02	0,04	-0,10	0,09	0,00	-0,08	-0,07	0,04	0,13	0,01	0,02	0,20	0,06	0,16 0,00
-0,24 0,58	0,86	-0,01	0,01	0,06	0,02	0,15	0,65	0,00	-0,03	0,04	-0,10	0,08	0,00	-0,07	-0,05	0,04	0,12	0,01	0,03	0,19	0,07	0,17 0,00
-0,25 0,59	0.87	0,01	0,01	0,00	0,02	0,15	0,00	0,00	-0,03	0,04	-0,10	0,09	0,00	-0,07	-0,00	0,04	0,13	0,01	0,02	0,20	0,07	0,17 0,00
-0.23 0.58	0.90	0.00	0.00	0.05	0.02	0.16	0.65	0.00	-0.02	0.05	-0.09	0.10	0.01	-0.07	-0.06	0.03	0.13	0.01	0.01	0.19	0.06	0.17 0.00
-0,24 0,60	0,90	0,01	0,01	0,06	0,02	0,16	0,65	0,00	-0,02	0,06	-0,09	0,09	0,01	-0,07	-0,06	0,04	0,12	0,01	0,02	0,19	0,07	0,17 0,00
-0,26 0,62	0,92	0,01	0,01	0,06	0,02	0,16	0,65	0,00	-0,02	0,05	-0,09	0,10	0,01	-0,06	-0,06	0,03	0,11	0,01	0,00	0,19	0,07	0,17 0,00
-0,25 0,61	0,93	0,01	0,00	0,06	0,02	0,16	0,64	0,00	-0,01	0,06	-0,09	0,11	0,01	-0,06	-0,07	0,04	0,11	0,01	0,00	0,19	0,07	0,17 0,00
-0,26 0,62	0,95	0,00	0,00	0,05	0,03	0,17	0.64	0,00	-0,01	0,04	-0,09	0,12	0,01	-0,05	-0,06	0,03	0,11	0,01	-0,01	0,19	0,08	0,17 0,00
-0.26 0.63	0,90	0.00	0.00	0.05	0.03	0.17	0.64	0.00	0.00	0.06	-0.09	0.12	0.01	-0.05	-0.06	0.04	0,12	0.01	-0.01	0.18	0.08	0.17 0.00
-0,27 0,65	0,97	0,00	0,00	0,05	0,03	0,18	0,64	0,00	0,00	0,06	-0,08	0,12	0,00	-0,04	-0,06	0,03	0,10	0,00	-0,02	0,18	0,08	0,17 0,00
-0,26 0,64	1,00	0,00	0,00	0,05	0,02	0,18	0,65	0,00	0,01	0,06	-0,08	0,12	0,01	-0,03	-0,06	0,04	0,08	0,01	-0,02	0,17	0,09	0,16 0,00
-0,27 0,65	1,01	0,00	0,00	0,05	0,02	0,18	0,65	0,00	0,01	0,07	-0,08	0,12	0,01	-0,04	-0,06	0,03	0,09	0,00	-0,02	0,18	0,08	0,17 0,00
-0,27 0,65	1,02	0,00	0,00	0,05	0,02	0,18	0,65	0,00	0,01	0,07	-0,08	0,12	0,01	-0,04	-0,05	0,02	0,09	0,00	-0,02	0,18	0,07	0,18 0,00
-0,27 0,66	1,02	0,00	0,00	0,05	0,02	0,10	0,00	0,00	0,02	0,00	-0,08	0,13	0,01	-0,04	-0,00	0,03	0,09	0,00	-0,03	0,10	0,07	0,17 0,00
-0.27 0.68	1.05	0.00	0.00	0.05	0.03	0.18	0.65	0.00	0.03	0.08	-0.08	0.14	0.01	-0.04	-0.07	0.03	0.10	0.00	-0.03	0.17	0.06	0.18 0.00
-0,28 0,69	1,05	-0,01	-0,01	0,04	0,03	0,19	0,65	0,00	0,03	0,07	-0,07	0,14	0,00	-0,04	-0,06	0,02	0,10	-0,01	-0,03	0,17	0,06	0,18 0,00
-0,29 0,71	1,05	-0,01	-0,01	0,04	0,03	0,19	0,65	0,00	0,03	0,07	-0,07	0,13	0,01	-0,03	-0,06	0,02	0,09	0,00	-0,03	0,17	0,07	0,19 0,00
0.28 0.70	1.07	-0.01	-0.01	0.04	0.03	0,19	0,65	0,00	0,03	0,08	-0,07	0,13	0,01	-0,03	-0,05	0,02	0,09	0,00	-0,03	0,17	0,07	0.18 0.00

Figur E.2: Avrundet numerisk transformasjonsmatrise T med dimensjon $[923\times25].$ Figuren viser her de 75 første radene av 923.

Tillegg F

Silikon

F.1 Blandingsforhold silikon fra produsent



CG 100 Silicone rubber A + B

A = Silicone rubber 632 010 009 B = Catalysator 632 011 001

The start-mixing proportions for CG 100 A + B : (9 parts silicone rubber A and 1 part B Catalysator)



This mixture makes the silicone rubber hardest and strongest.

To make the silicone rubber \underline{softer} , use more B- component (catalysator) in following proportions:

A:B 9:3



В	A :
4	9:

To make putty, add CG 102 Stabilisator (632 030 001) in following proportions:



Centri AB Datavågen 6 8-175 43 Järfälla Sweden T +48 8 5803 1165 F +45 8 5808 1128 centri@centri.se www.centri.se

Silikonlim Elastosil E43 **F.2**

RTV-1 Silicone Rubber

WACKER SILICONES ELASTOSIL®

n to

ELASTOSIL[®] E 43 RTV-1 Silicone Rubber

Charaoteristics

ELASTOBL[®] E 43 is a self-leveling silicone rubber with very good mechanical properties, which cures at room temperature under the influence of atmospheric molisture.

Acetic acid-curing system
 SetFieveling
 Excellent primeriess adhesion to many substrates

Special characteristics

Storage ELASTOSIL[®] E 43 has a shelf life of at least 9 month when stored in tightly closed original containers at 25 °C. The Viset we before end' date of each batch appears on the product label.

ELASTOSIL" E 43 shows good primeriess adhesion is many substrates. We recommend to run prehiminary tests to optimize conditions for the particular applica-tion.

Storage beyond the date specified on the label does not necessarily mean that the product is no longer usable. In this case however, the properties required for the intended use must be checked for quality as-

Application Multipurpose glue

Processing

 Skin-forming time, 23 °C, 50 % RH
 10 - 25 min

 Curing time, 23 °C, 50 % RH
 12 h/mm

Property	Test method	Unit	Value
Calor			Transparent / black / white
Density at 23 °C		(giam ²)	1.09
Viscosity at 23 °C	ISO 3219	(mPas)	350,000

t data (oured) Test m

Product data (oured)						
Property	Test method	Test method Unit				
Color			Transparent / black / white			
Density at 23 °C, in water	DIN 53 479 A / ISO 2781	[gicm ²]	1.09			
Hardness Shore A	DIN 53 505 / ISO 868	•	30			
Elongation at break	DIN 53 504 8 1 / ISO 37	[%]	500			
Tensie strength	DIN 53 504 8 1 / ISO 37	[Nimm ²]	4.5			
Tear strength	ASTM D 624	(Nimm)	13.0			
2mm, 14 d storage at 23 °C, 50 %	RH.		-			

These figures are only intended as a guide and should not be used in preparing specifications.

Venion 3.00/29-00-04.107. An: ELASTORE®E 43

Page 1/2

Safety information

During vulcanization of ELASTOSIL® E 43, a total of 4 % by weight of acetic acid is split off. These vapours should not be inhaled for long periods or in high concentration. Work areas should therefore be well vertilated. Contact of unvulcanized silicone nubber with eyes and mucous membranes must be avoided as this would cause initiation. However if it does happen, finse the affected area thoroughly.

Comprehensive instructions are given in the corresponding Naterial Safety Data Sheets. They are available on request from Wacker subsidiaries.

Tillegg G

Alternative deler

Leverandør	Best nr	Type	Antall	Ca pris inkl mva
Rsonline.no	314-8284	strupeventil bi-directional	25 stk	5300
Festo^1	151181, GRLO-M5-B	strupeventil	25 stk	4000



Bidireksjonal strupeventil fra RSOnline.no, no314-8284

 $^{^1 {\}rm inkl}$ 15% rabatt



Festo strupeventil

Tillegg H

Foto av laboppsett



Figur H.1: Laboppsett med ventiler, struping og taktilt display.



Figur H.2: Slangetilkobling til taktilt display



Figur H.3: Taktilt display sett ovenfra


Figur H.4: Taktilt display sett fra siden



Figur H.5: Struping av luftslanger



Figur H.6: Støpemal