

Schilderijen gecontroleerd schoonmaken met lasers

De schoonheid van de mechatronische ontwerpbenadering

Het concept van reiniging van kunstwerken met behulp van lasers wordt al langere tijd toegepast op 'harde' beeldhouwwerken. Het reinigen van 'zachte' schilderijen met laserstralen vormt echter een geheel nieuwe uitdaging. Onlangs is daarvoor een laser cleaning station ontwikkeld volgens de mechatronische ontwerpaanpak. De ontwerpopgaven lagen met name bij de optische arm voor de geleiding van de laserbundel en de xy-manipulator voor het nauwkeurig scannen van het te reinigen oppervlak. Continue monitoring zorgt voor een gecontroleerde reiniging. Dankzij de combinatie van disciplines als optica, mechanica, elektronica en regeltechniek is het mogelijk schilderijen grondig en toch veilig schoon te maken. Inmiddels komen uit de kunstwereld enthousiaste reacties op deze revolutionaire techniek. De case van het laser cleaning station illustreert eens te meer de schoonheid van de mechatronische ontwerpbenadering.

• **Hans van Eerden, Hans Scholten en Dennis Schipper** •

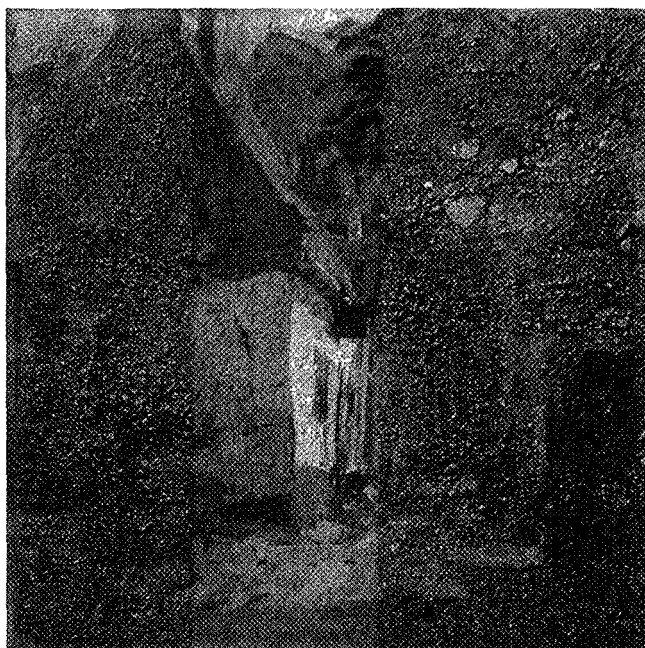
Kunstwerken zoals schilderijen belichamen bij uitstek menselijke ideeën over schoonheid. Op enig moment moeten deze kunstwerken ook letterlijk schoon worden gemaakt, vanwege verkleuring van het vernis, overschilderingen en aanslag van schimmels en ander vuil. Restaurateurs hebben een grote expertise voor dat delicate schoonmaakwerk, het originele kunstwerk mag immers niet worden aangetast. Maar ook zij staan machteloos met hun handwerk als de aanslag of overschilderingen te sterk hechten aan de onderliggende verflaag of als het vernis zodanig is uitgehard dat oplosmiddelen niets kunnen uitrichten. Op dat moment biedt moderne techniek een oplossing. Uit Griekenland, een land vol beelden uit de oudheid, is het reinigen van beelden met laserstralen bekend. Dat roept de vraag op of deze techniek ook voor de reiniging van schilderijen, wandschilderingen en fresco's kan worden ingezet. Met de ontwikkeling van een laser cleaning station is daarop een bevestigend antwoord gekomen (zie kader). Na een korte verkenning van de toepassing van lasers voor het reinigen van schilderijen (afbeelding 1), gaat dit artikel dieper in op het mechatronische ontwerp van het laser cleaning

Ontwikkeling van een laser cleaning station

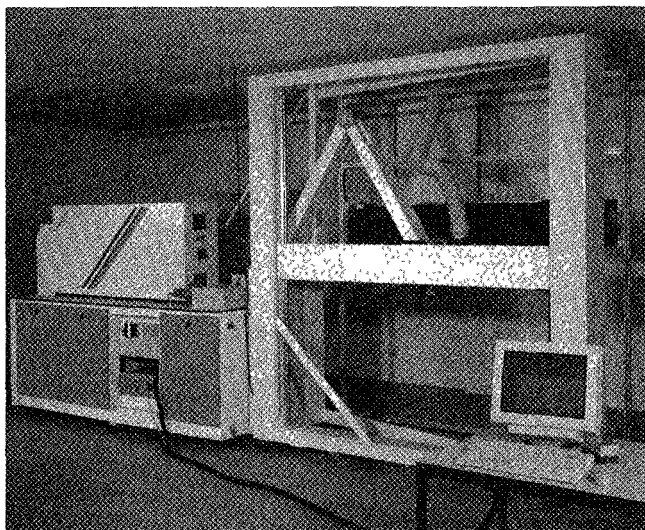
Het Hengelose bedrijf Art Innovation, spin-off van mechatronisch ontwerp bureau Demcon, heeft een laser cleaning station voor het reinigen van schilderijen ontwikkeld. Voorafgaand onderzoek vond plaats in samenwerking met de Foundation for Research and Technology – Hellas, die laserreiniging van kunstwerken al langer toepast. Daarbij waren tevens restauratie-experts uit Portugal, Spanje en Nederland betrokken en het FOM-instituut voor Atoom- en Molecuulfysica in Amsterdam, dat onderzoek deed naar onder meer moleculaire veranderingen van verflagen.

De internationale samenwerking kreeg vorm in het project 'Advanced workstation for controlled laser cleaning of artworks', met subsidie van CRAFT, een Europese regeling voor onderzoeksprojecten van het midden- en kleinbedrijf. Inmiddels bezoeken restaurateurs het laboratorium van Art Innovation om proef te draaien en zijn de eerste betaalde opdrachten voor het reinigen van schilderijen uitgevoerd. De kunstwereld reageert enthousiast en contacten zijn gelegd met onder meer het Mauritshuis in Den Haag en het Guggenheim in New York.

station (afbeelding 2). De specifieke gegevens zijn ontleend aan [Scholten].



Afbeelding 1. Voorbeeld van laserreiniging van een door brand zwaar beschadigd schilderij. Jan van Vuuren, 1925, met dank aan A.L.Verheij, De Manenstegell, Bathmen. Een schoonmaakbeurt met de laser kan tot spectaculaire 'onthullingen' leiden.



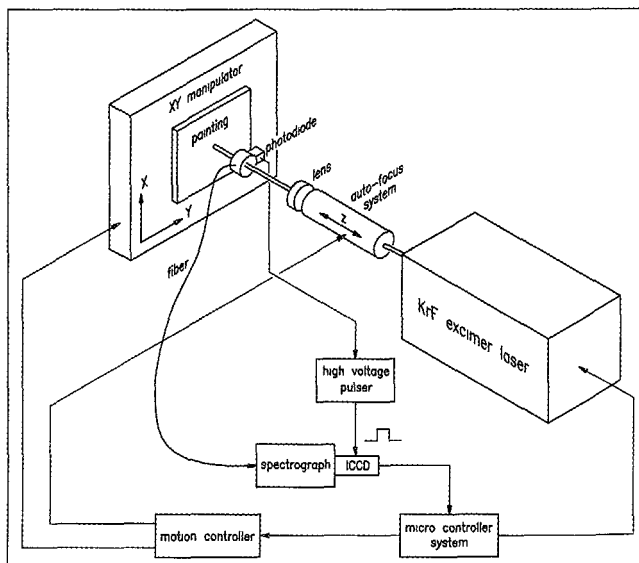
Afbeelding 2. Het laser cleaning station in het laboratorium van Art Innovation.

Concept

Een schilderij met laserstralen reinigen is niet een kwestie van even een laser op het kunstwerk richten en het vuil eraf schieten. Zo werkt het, simpel gezegd, wel bij 'harde' kunstwerken zoals beelden. Het vuil absorbeert (een deel van) de straling terwijl het materiaal van het beeld zelf, bijvoorbeeld steen of marmer, de straling reflecteert. Het kunstwerk heeft dus niet te lijden van een flinke dosis laserstraling. Bij 'zachte' kunstwerken is dat beslist anders. Zowel de verfpigmenten als het doek van een schilderij zijn gevoelig voor beschadiging door laserstraling. Dus moet laserreiniging van schilderijen gecontroleerd gebeuren, met een laserbundel die beheerst en nauwkeurig het te reinigen oppervlak scant. Bovendien moet continu het effect van de laserreiniging worden gemonitord, zodat de laserbundel op tijd wordt verplaatst en alleen de bovenste (verontreinigings)lagen van het doek worden verwijderd.

Het concept voor laserreiniging van schilderijen omvat derhalve drie aspecten (zie ook afbeelding 3):

- laser cleaning: bepalen van de geschikte laserconfiguratie voor het reinigen;
- monitoring: controleren dat alleen de bedoelde verontreiniging wordt verwijderd;
- scanning: bestrijken van het gehele te reinigen oppervlak.



Afbeelding 3. Het concept van een laser cleaning station: cleaning (laser met optica), monitoring (spectrograph) en scanning (xy-manipulator aangestuurd door motion controller). Het micro controller system verzorgt de besturing van het station.

De mogelijkheden en beperkingen van laser cleaning en monitoring leggen de randvoorwaarden op aan het ontwerp van het scanningsysteem.

Globale specificaties

De specificaties voor een laser cleaning station omvatten naast de technische specificaties ook de specificaties van de te reinigen kunstwerken en de gebruikersspecificaties. De gebruiker, de restaurateur, blijft immers het uitgangspunt. Ter vergelijking: de resolutie die met handwerk kan worden gehaald ligt in de orde van $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$. Met een automatisch reinigingssysteem moet een veel betere resolutie kunnen worden behaald. Om de restaurateur te ondersteunen bij zijn reinigingswerk moet het station zijn uitgerust met gereedschappen zoals een microscoop en UV- en IR-spectrometers. De specificaties van het kunstwerk betreffen de aard en de dikte van de verschillende lagen op het doek [Teule]. Verflagen zijn 20-50 μm dik en een typische vernislaag is 20-80 μm dik. Met laserreiniging blijkt een diepteresolutie van 0,1-1 μm per puls te kunnen worden bereikt. De maximale afmeting van een te behandelen schilderij is typisch op 1,4x2,2 m^2 vastgesteld.

De technische specificaties betreffen de snelheid van het scanningsysteem en de resolutie van het reinigingsproces, zie [Scholten]. Uitgaande van een bewerkingstijd van 0,2-1 s per positie (spot) ligt een optimale tijdstap van het scanningsysteem (van spot tot spot) in de orde van 0,1 s. De laterale resolutie (stapfout) van het reinigingsproces volgt uit de maximaal aanvaardbare positioneringsfout van de laserbundel op het doek. In een haalbaarheidsstudie [Scholten] is deze vastgesteld op 40 μm .

Laser cleaning

Een excimeerlaser zendt niet continu straling uit, maar geeft pulsen af van een extreem korte duur (nanosecondes). Dat zorgt telkens voor een korte interactietijd met het oppervlak, waardoor beschadiging kan worden voorkomen. Het maakt de excimeerlaser geschikt voor het delicate reinigen van schilderijen. Belangrijk pluspunt is tevens de mogelijkheid van automatisering van zowel de laserreiniging als de monitoring, zodat het resultaat niet afhangt van de handvaardigheid en de subjectieve waarneming van de restaurateur. Doordat per puls slechts zeer weinig materiaal wordt verwijderd, kan op deze manier beter doseerbaar worden gereinigd dan met chemische reiniging of een mechanische aanpak.

Bij laserablatie, het reinigen van een oppervlak met

behulp van laserstraling, spelen drie mechanismen een rol:

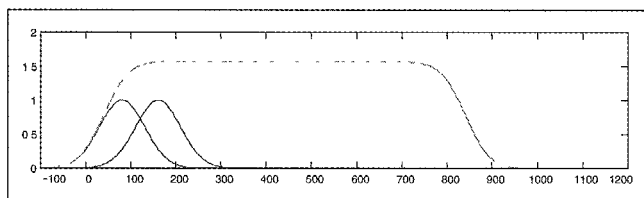
- foto-chemisch: vrijkomen van molecuulfragmenten na het verbreken van de chemische bindingen in organische moleculen door absorptie van de energie van laserfotonen;
- foto-mechanisch: wegschieten van deeltjes ten gevolge van schokgolven veroorzaakt door een invallende laserbundel;
- foto-thermisch: verdampen van deeltjes door absorptie van met name infraroodstraling.

Foto-thermische effecten moeten zoveel mogelijk worden vermeden; een infraroodlaser bijvoorbeeld zal op schilderijen lokaal een smeltbadje van verontreiniging én verf creëren. Hetzelfde geldt voor foto-mechanische effecten, die de kwetsbare samenhang tussen verschillende verflagen onderling en met het doek kunnen verstoren. Dus moet reiniging vooral volgens het foto-chemische mechanisme plaatsvinden, met een laser die in het UV-spectrum opereert. Want het gaat om voornamelijk organische verontreiniging op het oppervlak, dus moet de laserstraling een geringe indringdiepte hebben en de energie leveren voor het verbreken van covalente bindingen. De energie van deze bindingen ligt tussen 3,5 eV (C-H) en 6,29 eV (C-C). Volgens de formule voor de fotonenergie, $E = hc/\lambda$ met h de constante van Planck, c de lichtsnelheid en λ de golflengte, ligt de benodigde golflengte tussen 200 en 350 nm. De kryptonfluoride (KrF) excimeerlaser met $\lambda = 248 \text{ nm}$ is dan een geschikte kandidaat.

De bundel van een KrF-laser heeft typisch een rechthoekige doorsnede, met in de breedterichting bij benadering een Gaussisch profiel en in de hoogterichting een profiel in de vorm van een plateau met 'Gaussische' flanken. Het Gaussische karakter is van belang voor een gelijkmatige bestraling van het oppervlak op opeenvolgende posities. De overlap van Gaussische profielen leidt bij geschikt gekozen instellingen tot een uniforme intensiteit van de bestraling; zie afbeelding 4. Daarbij is de mate van overlap niet zeer kritisch; tussen 50% en 80% overlap is het resultaat bij een uniforme bestraling. Uniforme bestraling leidt tot een uniforme ablatiediepte en voorkomt daarmee het ontstaan van een zichtbaar 'ablatieooster'.

Om de maximale resolutie bij de reiniging te verkrijgen wordt de bundel in de hoogterichting opgedeeld in meerdere bundels door een tralie in de bundel te plaatsen. De overlap van deze afzonderlijke bundels is zodanig dat ook in de hoogterichting een uniforme bestraling wordt

gerealiseerd. Het effect van elke bundel kan afzonderlijk gemonitord worden en elke bundel kan afzonderlijk met een sluiters worden afgestopt. Het maximum aantal bundels wordt bepaald door de capaciteit van de multi-kanaalspectrometer (zie verderop).

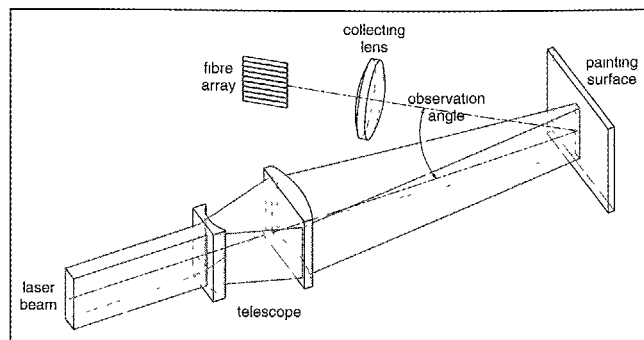


Afbeelding 4. Totale intensiteit van bestraling (willekeurige eenheid) ten gevolge van overlappende Gaussische profielen, bij een spotbreedte van 200 (willekeurige eenheid) en een verschuiving van opeenvolgende profielen van 80 (willekeurige eenheid), wat overeenkomt met 60% overlap.

De energie van een laserpuls is typisch 600 mJ, wat bij een puls frequentie van 10 Hz lokaal op het schilderij blijkt te leiden tot een (acceptabele) temperatuurstijging van 30-40 °C. De pulsduur is typisch 10-25 ns. Deze korte pulstijd heeft als voordeel dat de bundel nauwelijks in contact komt met de pluim die zich als gevolg van de 'beschieting' boven het doek ontwikkelt. Bij langere pulsduur kan deze pluim de laserbundel afschermen van het doek, waardoor de reinigende werking verloren gaat en bovendien kan interactie van de laserbundel met de pluim leiden tot schokgolven die het doek kunnen beschadigen.

De laserbundel heeft typisch een divergentie van 1 tot 3 mrad in breedte-, respectievelijk hoogterichting. Bij uit treden heeft de bundel typisch een dwarsdoorsnede van 10 x 24 mm². Vanwege de divergentie wordt een lens toegepast om de bundel te focuseren tot een spot op het doek, zie afbeelding 5. Om het Gaussische profiel te behouden wordt een cilindrische lens gebruikt. Naarmate de spot kleiner is zal de energiedichtheid ter plekke groter zijn, waardoor per puls een grotere ablatiediepte wordt bereikt. Daar staat tegenover dat een kleiner oppervlak wordt bewerkt. Combinatie van de effecten op ablatiediepte en bewerkte oppervlakte leidt tot een optimum in de energiedichtheid ('optimal ablation fluence'), afhankelijk van het bestraalde materiaal. Gegeven de energie-inhoud van een puls kan daaruit een optimale breedte van de spot worden bepaald. Voor vernis blijkt deze in de orde van 8 mm te liggen en een wat harder materiaal als pleisterwerk vraagt een hogere energiedichtheid en dus een kleinere spot, met

een breedte in de orde van 2,5 mm. De scherptediepte ligt in de orde van 1 mm, afhankelijk van de spotgrootte.



Afbeelding 5. De invallende laserstraling (in verticale richting opgedaald in meerdere bundels) wordt gefocuseerd door een cilindrische lens. Door de foto-chemische werking van de laserbundel ontstaat een plasma, dat fluorescentiestraling uitzendt die onder een bepaalde observatiehoek wordt opgevangen door een array van glasfibers, een voor elke bundel.

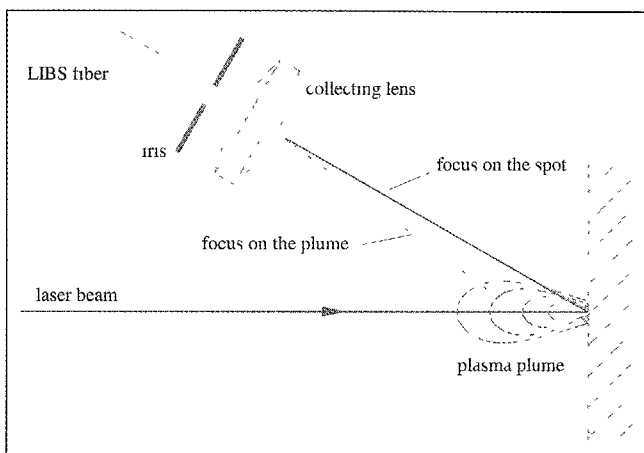
Monitoring

Bij laserablatie waar fotochemische effecten overheersen, ontstaat boven de laserspot op het schilderij een plasma bestaande uit molecuulfragmenten in aangeslagen toestand. Bij terugvallen naar hun grondtoestand zenden ze fluorescentiestraling uit die met behulp van spectroscopie (Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) kan worden bestudeerd. De emissie van het plasma is karakteristiek voor het verwijderde materiaal, dus als de laserbundel dieper in een laag een andere samenstelling van materiaal tegenkomt, zal de emissie ook veranderen. Bij de continue monitoring richt de aandacht zich op relevante emissiepieken van te verwijderen materiaal en te behouden pigmenten. Met een bepaald algoritme voor de relatieve intensiteiten van pieken, kan het reinigingsproces bewaakt worden. Als het algoritme een uitkomst geeft die buiten een veilige range valt, zal de reiniging op dat punt worden gestopt en de laserbundel worden verplaatst.

Een LIBS-spectrograaf bevat typisch 9 kanalen, die elk via een aparte fiber het fluorescentiesignaal van een spot afbeelden op een CCD-sensor, met negen aparte tracks. De uitleesfrequentie van de CCD-sensor moet groter zijn dan de puls frequentie, want het afvuren van een volgende puls is afhankelijk van het meetresultaat na de voorgaande puls. In een eerste uitvoering is de uitleesfrequentie van een 1024x256 CCD-array, opgedaald in 9

tracks, typisch 50 Hz. Inmiddels zijn al uitleesfrequenties tot 500 Hz gerealiseerd.

Het ruimtelijk oplossend vermogen van het monitoring-systeem is getest voor een loodwit/titaniumwit overgang, door een bundel deze overgang te laten passeren en de beide gemeten piekintensiteiten te vergelijken. Een orde verschil in piekintensiteit bepaalt dan de grens van het oplossend vermogen. Het blijkt dat door toepassing van een geschikt diafragma om strooilight af te schermen, door signaalbewerking met aftrek van 'organische' achtergrondemissie en door het focuseren van de collimatorlens op de spot en niet op het plasma erboven, een oplossend vermogen van 0,4 mm haalbaar is (zie afbeelding 6).



Afbeelding 6. Het oplossend vermogen van het LIBS-monitoringsysteem wordt verbeterd door focussing op de spot in plaats van op de plasmaplume erboven en door toepassing van een diafragma (iris).

Scanning

Het scanningsysteem voor een laser cleaning station moet laserstraling over grotere afstanden veilig transporteren naar elke gewenste positie op het oppervlak van een schilderij - met voldoende nauwkeurigheid en met behoud van bundelprofiel en -intensiteit.

Voor het scannen van een schilderij met een laserbundel zijn in principe verschillende oplossingen mogelijk die in de praktijk grote bezwaren hebben:

- Het schilderij staat vast en de laser met uittredende bundel beweegt. Dit is bezwaarlijk vanwege de grote massa van de laser en de koppeling met waterkoeling en gastoevoer.
- De laser staat vast en het schilderij beweegt. Dit is bezwaarlijk vanwege de grote variatie in ophanging,

afmetingen en materialen van schilderijen. De meeste ophangingsconstructies lenen zich niet voor inklemming. Een lage stijfheid van het (bewegende) schilderij kan leiden tot schadelijke trillingen. Om dit te voorkomen is een zwaar inklemmechanisme vereist. Verder vraagt deze oplossing een grote werkruimte, namelijk in zowel de x- als de y-richting het dubbele van de maximale afmeting van een te behandelen schilderij.

- Zowel het schilderij als de laser bewegen, elk in een andere richting. Deze optie valt uiteraard ook af.

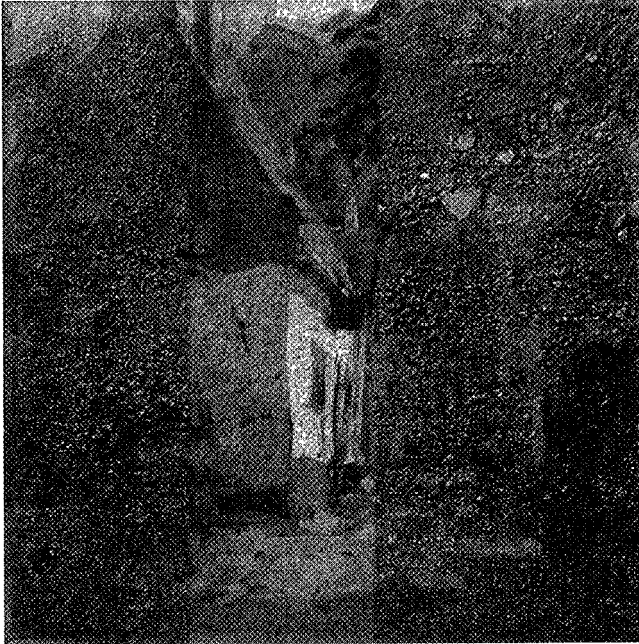
Scanning zal derhalve moeten gebeuren door alleen de laserbundel, toegevoerd vanaf een gefixeerde laser, te verplaatsen over het schilderij. Daarvoor zijn weer oplossingen denkbaar die niet voldoen:

- Fiber optics. Door interne reflecties in een glasfiber gaat het Gaussische bundelprofiel verloren, waardoor de overlap op naastliggende posities niet tot uniforme bestraling van het oppervlak leidt.
- Flying optics met verplaatsbare of draaibare spiegels die de bundel over het schilderij laten lopen. Door de relatief hoge divergentie van de excimeerlaserbundel zal de afmeting van de spot, en dus de intensiteit van de bestraling, over het oppervlak variëren met de posities van de spiegels.

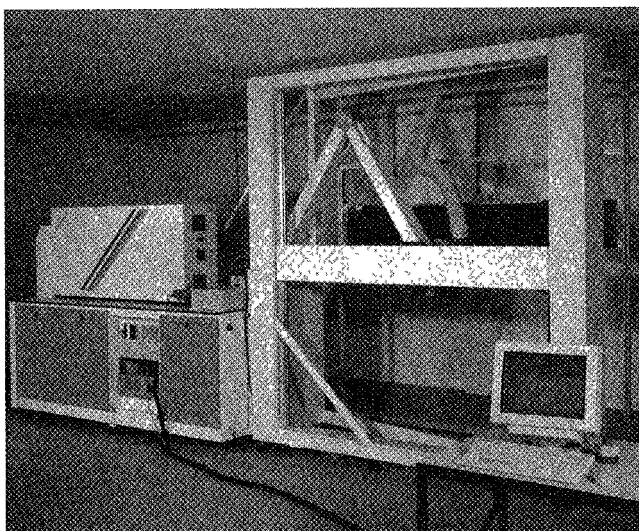
De uiteindelijke oplossing ligt in een variant op bovengenoemde flying optics, namelijk een optische arm die werkt volgens het principe van een periscoop (zie afbeelding 7). Deze oplossing heeft twee sterke punten: de optische weglengte van de laserbundel is constant en de spiegelconfiguratie zorgt ervoor dat het bundelprofiel behouden blijft. Daardoor levert deze optische arm overal op het te scannen oppervlak een bundel met gelijke eigenschappen af. De ontwerpopgave die dan nog rest is de nauwkeurigheid waarmee het oppervlak wordt gescand. Als die voldoende is, dan is een uniforme bestraling van het oppervlak gegarandeerd.

Het scannen van het oppervlak moet gebeuren door de kop, daar waar de bundel uit de optische arm treedt. Dat kan actief, met een (antropomorfe) arm die is uitgerust met motoren in de gewrichten en die in polaire coördinaten opereert, zoals de menselijke arm. Het kan echter ook passief, met een manipulator die een beweging aan de kop voorschrijft (zie afbeelding 7). Deze laatste oplossing ligt voor de hand: het scannen van het oppervlak vindt, gezien het rechthoekige profiel van de laserbundel, bij voorkeur plaats langs rechte (horizontale) lijnen. Dit is eenvoudig te realiseren met een xy-manipulator, waarbij de bewegingen in de x- en de y-richting zijn ontkop-

station (afbeelding 2). De specifieke gegevens zijn ontleend aan [Scholten].



Afbeelding 1 Voorbeeld van laserreiniging van een door brand zwaar beschadigd schilderij
Jan van Vuuren, 1925, met dank aan A.L.Verheij, De Manenstegell, Bathmen. Een schoonmaakbeurt met de laser kan tot spectaculaire 'onthullingen' leiden.



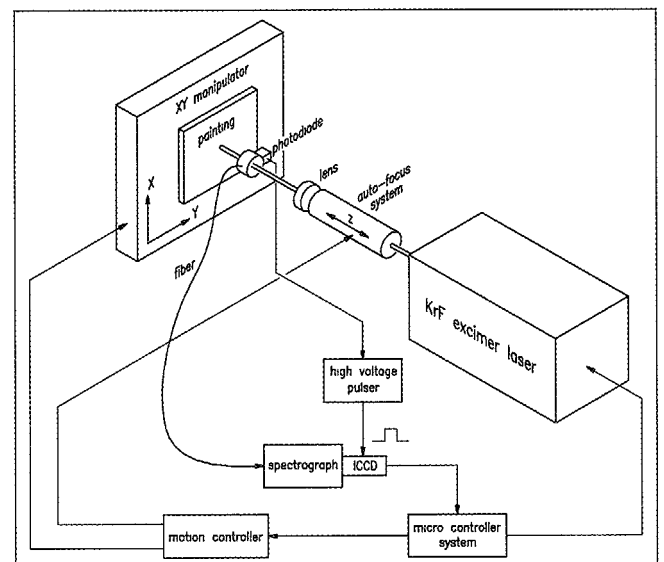
Afbeelding 2. Het laser cleaning station in het laboratorium van Art Innovation

Concept

Een schilderij met laserstralen reinigen is niet een kwestie van even een laser op het kunstwerk richten en het vuil eraf schieten. Zo werkt het, simpel gezegd, wel bij 'harde' kunstwerken zoals beelden. Het vuil absorbeert (een deel van) de straling terwijl het materiaal van het beeld zelf, bijvoorbeeld steen of marmer, de straling reflecteert. Het kunstwerk heeft dus niet te lijden van een flinke dosis laserstraling. Bij 'zachte' kunstwerken is dat beslist anders. Zowel de verpigmenten als het doek van een schilderij zijn gevoelig voor beschadiging door laserstraling. Dus moet laserreiniging van schilderijen gecontroleerd gebeuren, met een laserbundel die beheerst en nauwkeurig het te reinigen oppervlak scant. Bovendien moet continu het effect van de laserreiniging worden gemonitord, zodat de laserbundel op tijd wordt verplaatst en alleen de bovenste (verontreinigings)lagen van het doek worden verwijderd.

Het concept voor laserreiniging van schilderijen omvat derhalve drie aspecten (zie ook afbeelding 3).

- laser cleaning: bepalen van de geschikte laserconfiguratie voor het reinigen;
- monitoring: controleren dat alleen de bedoelde verontreiniging wordt verwijderd;
- scanning: bestrijken van het gehele te reinigen oppervlak.



Afbeelding 3. Het concept van een laser cleaning station: cleaning (laser met optica), monitoring (spectrograph) en scanning (xy-manipulator aangestuurd door motion controller). Het micro controller system verzorgt de besturing van het station.

De mogelijkheden en beperkingen van laser cleaning en monitoring leggen de randvoorwaarden op aan het ontwerp van het scanningsysteem.

Globale specificaties

De specificaties voor een laser cleaning station omvatten naast de technische specificaties ook de specificaties van de te reinigen kunstwerken en de gebruikersspecificaties. De gebruiker, de restaurateur, blijft immers het uitgangspunt. Ter vergelijking: de resolutie die met handwerk kan worden gehaald ligt in de orde van $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$. Met een automatisch reinigingssysteem moet een veel betere resolutie kunnen worden behaald. Om de restaurateur te ondersteunen bij zijn reinigingswerk moet het station zijn uitgerust met gereedschappen zoals een microscoop en UV- en IR-spectrometers. De specificaties van het kunstwerk betreffen de aard en de dikte van de verschillende lagen op het doek [Teule]. Verflagen zijn 20-50 μm dik en een typische vernislaag is 20-80 μm dik. Met laserreiniging blijkt een diepteresolutie van 0,1-1 μm per puls te kunnen worden bereikt. De maximale afmeting van een te behandelen schilderij is typisch op $1,4 \times 2,2 \text{ m}^2$ vastgesteld.

De technische specificaties betreffen de snelheid van het scanningsysteem en de resolutie van het reinigingsproces, zie [Scholten]. Uitgaande van een bewerkingstijd van 0,2-1 s per positie (spot) ligt een optimale tijdstap van het scanningsysteem (van spot tot spot) in de orde van 0,1 s. De laterale resolutie (stapfout) van het reinigingsproces volgt uit de maximaal aanvaardbare positioneringsfout van de laserbundel op het doek. In een haalbaarheidsstudie [Scholten] is deze vastgesteld op 40 μm .

Laser cleaning

Een excimeerlaser zendt niet continu straling uit, maar geeft pulsen af van een extreem korte duur (nanosecondes). Dat zorgt telkens voor een korte interactietijd met het oppervlak, waardoor beschadiging kan worden voorkomen. Het maakt de excimeerlaser geschikt voor het delicate reinigen van schilderijen. Belangrijk pluspunt is tevens de mogelijkheid van automatisering van zowel de laserreiniging als de monitoring, zodat het resultaat niet afhangt van de handvaardigheid en de subjectieve waarneming van de restaurateur. Doordat per puls slechts zeer weinig materiaal wordt verwijderd, kan op deze manier beter doseerbaar worden gereinigd dan met chemische reiniging of een mechanische aanpak.

Bij laserablatie, het reinigen van een oppervlak met

behulp van laserstraling, spelen drie mechanismen een rol:

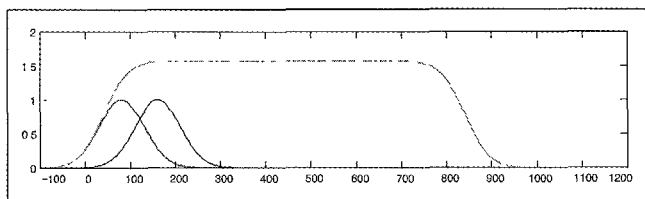
- foto-chemisch: vrijkomen van molecuulfragmenten na het verbreken van de chemische bindingen in organische moleculen door absorptie van de energie van laserfotonen,
- foto-mechanisch: wegschieten van deeltjes ten gevolge van schokgolven veroorzaakt door een invallende laserbundel;
- foto-thermisch: verdampen van deeltjes door absorptie van met name infraroodstraling

Foto-thermische effecten moeten zoveel mogelijk worden vermeden; een infraroodlaser bijvoorbeeld zal op schilderijen lokaal een smeltbadje van verontreiniging én verf creëren. Hetzelfde geldt voor foto-mechanische effecten, die de kwetsbare samenhang tussen verschillende verflagen onderling en met het doek kunnen verstoren. Dus moet reiniging vooral volgens het foto-chemische mechanisme plaatsvinden, met een laser die in het UV-spectrum opereert. Want het gaat om voornamelijk organische verontreiniging op het oppervlak, dus moet de laserstraling een geringe indringdiepte hebben en de energie leveren voor het verbreken van covalente bindingen. De energie van deze bindingen ligt tussen 3,5 eV (C-H) en 6,29 eV (C-C). Volgens de formule voor de fotonenergie, $E = hc/\lambda$ met h de constante van Planck, c de lichtsnelheid en λ de golflengte, ligt de benodigde golflengte tussen 200 en 350 nm. De kryptonfluoride (KrF) excimeerlaser met $\lambda = 248 \text{ nm}$ is dan een geschikte kandidaat.

De bundel van een KrF-laser heeft typisch een rechthoekige doorsnede, met in de breedterichting bij benadering een Gaussisch profiel en in de hoogterichting een profiel in de vorm van een plateau met 'Gaussische' flanken. Het Gaussische karakter is van belang voor een gelijkmatige bestraling van het oppervlak op opeenvolgende posities. De overlap van Gaussische profielen leidt bij geschikt gekozen instellingen tot een uniforme intensiteit van de bestraling; zie afbeelding 4. Daarbij is de mate van overlap niet zeer kritisch; tussen 50% en 80% overlap is het resultaat bij een uniforme bestraling. Uniforme bestraling leidt tot een uniforme ablatiediepte en voorkomt daarmee het ontstaan van een zichtbaar 'ablatieooster'.

Om de maximale resolutie bij de reiniging te verkrijgen wordt de bundel in de hoogterichting opgedeeld in meerdere bundels door een tralie in de bundel te plaatsen. De overlap van deze afzonderlijke bundels is zodanig dat ook in de hoogterichting een uniforme bestraling wordt

gerealiseerd. Het effect van elke bundel kan afzonderlijk gemonitord worden en elke bundel kan afzonderlijk met een sluiters worden afgestopt. Het maximum aantal bundels wordt bepaald door de capaciteit van de multi-kanaalsspectrometer (zie verderop).

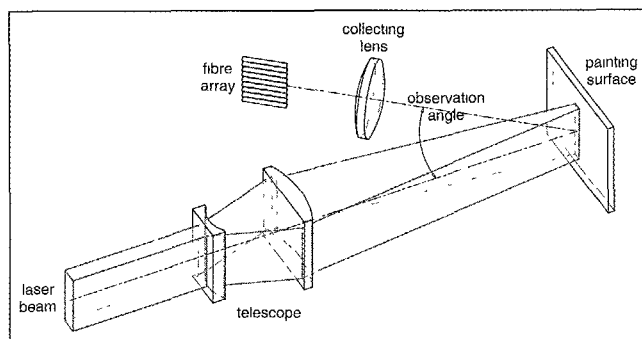


Afbeelding 4. Totale intensiteit van bestraling (willekeurige eenheid) ten gevolge van overlappende Gaussische profielen, bij een spotbreedte van 200 (willekeurige eenheid) en een verschuiving van opeenvolgende profielen van 80 (willekeurige eenheid), wat overeenkomt met 60% overlap.

De energie van een laserpuls is typisch 600 mJ, wat bij een puls frequentie van 10 Hz lokaal op het schilderij blijkt te leiden tot een (acceptabele) temperatuurstijging van 30-40 °C. De pulsduur is typisch 10-25 ns. Deze korte pulstijd heeft als voordeel dat de bundel nauwelijks in contact komt met de pluim die zich als gevolg van de 'beschieting' boven het doek ontwikkelt. Bij langere pulsduur kan deze pluim de laserbundel afschermen van het doek, waardoor de reinigende werking verloren gaat en bovendien kan interactie van de laserbundel met de pluim leiden tot schokgolven die het doek kunnen beschadigen.

De laserbundel heeft typisch een divergentie van 1 tot 3 mrad in breedte-, respectievelijk hoogterichting. Bij uitreden heeft de bundel typisch een dwarsdoorsnede van 10 x 24 mm². Vanwege de divergentie wordt een lens toegepast om de bundel te focuseren tot een spot op het doek, zie afbeelding 5. Om het Gaussische profiel te behouden wordt een cilindrische lens gebruikt. Naarmate de spot kleiner is zal de energiedichtheid ter plekke groter zijn, waardoor per puls een grotere ablatiediepte wordt bereikt. Daar staat tegenover dat een kleiner oppervlak wordt bewerkt. Combinatie van de effecten op ablatiediepte en bewerkte oppervlakte leidt tot een optimum in de energiedichtheid ('optimal ablation fluence'), afhankelijk van het bestraalde materiaal. Gegeven de energie-inhoud van een puls kan daaruit een optimale breedte van de spot worden bepaald. Voor vernis blijkt deze in de orde van 8 mm te liggen en een wat harder materiaal als pleisterwerk vraagt een hogere energiedichtheid en dus een kleinere spot, met

een breedte in de orde van 2,5 mm. De scherptediepte ligt in de orde van 1 mm, afhankelijk van de spotgrootte.



Afbeelding 5. De invallende laserstraling (in verticale richting opgedeeld in meerdere bundels) wordt gefocuseerd door een cilindrische lens. Door de foto-chemische werking van de laserbundel ontstaat een plasma, dat fluorescentiestraling uitzendt die onder een bepaalde observatiehoek wordt opgevangen door een array van glasfibers, een voor elke bundel.

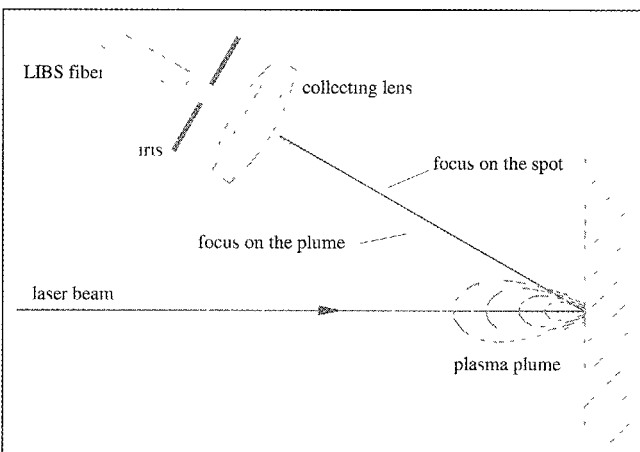
Monitoring

Bij laserablatie waar fotochemische effecten overheersen, ontstaat boven de laserspot op het schilderij een plasma bestaande uit molecuulfragmenten in aangeslagen toestand. Bij terugvallen naar hun grondtoestand zenden ze fluorescentiestraling uit die met behulp van spectroscopie (Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) kan worden bestudeerd. De emissie van het plasma is karakteristiek voor het verwijderde materiaal, dus als de laserbundel dieper in een laag een andere samenstelling van materiaal tegenkomt, zal de emissie ook veranderen. Bij de continue monitoring richt de aandacht zich op relevante emissiepieken van te verwijderen materiaal en te behouden pigmenten. Met een bepaald algoritme voor de relatieve intensiteiten van pieken, kan het reinigingsproces bewaakt worden. Als het algoritme een uitkomst geeft die buiten een veilige range valt, zal de reiniging op dat punt worden gestopt en de laserbundel worden verplaatst.

Een LIBS-spectrograaf bevat typisch 9 kanalen, die elk via een aparte fiber het fluorescentiesignaal van een spot afbeelden op een CCD-sensor, met negen aparte tracks. De uitleesfrequentie van de CCD-sensor moet groter zijn dan de puls frequentie, want het afvuren van een volgende puls is afhankelijk van het meetresultaat na de voorgaande puls. In een eerste uitvoering is de uitleesfrequentie van een 1024x256 CCD-array, opgedeeld in 9

tracks, typisch 50 Hz. Inmiddels zijn al uitleesfrequenties tot 500 Hz gerealiseerd.

Het ruimtelijk oplossend vermogen van het monitoring-systeem is getest voor een loodwit/titaniumwit overgang, door een bundel deze overgang te laten passeren en de beide gemeten piekintensiteiten te vergelijken. Een orde verschil in piekintensiteit bepaalt dan de grens van het oplossend vermogen. Het blijkt dat door toepassing van een geschikt diafragma om strooilicht af te schermen, door signaalbewerking met aftrek van 'organische' achtergrondemissie en door het focuseren van de collimatorlens op de spot en niet op het plasma erboven, een oplossend vermogen van 0,4 mm haalbaar is (zie afbeelding 6)



Afbeelding 6. Het oplossend vermogen van het LIBS-monitoringsysteem wordt verbeterd door focusering op de spot in plaats van op de plasmaplume erboven en door toepassing van een diafragma (iris).

Scanning

Het scanningsysteem voor een laser cleaning station moet laserstraling over grotere afstanden veilig transporteren naar elke gewenste positie op het oppervlak van een schilderij – met voldoende nauwkeurigheid en met behoud van bundelprofiel en -intensiteit.

Voor het scannen van een schilderij met een laserbundel zijn in principe verschillende oplossingen mogelijk die in de praktijk grote bezwaren hebben:

- Het schilderij staat vast en de laser met uittredende bundel beweegt. Dit is bezwaarlijk vanwege de grote massa van de laser en de koppeling met waterkoeling en gastoevoer.
- De laser staat vast en het schilderij beweegt. Dit is bezwaarlijk vanwege de grote variatie in ophanging,

afmetingen en materialen van schilderijen. De meeste ophangingsconstructies lenen zich niet voor inklemming. Een lage stijfheid van het (bewegende) schilderij kan leiden tot schadelijke trillingen. Om dit te voorkomen is een zwaar inklemmechanisme vereist. Verder vraagt deze oplossing een grote werkruimte, namelijk in zowel de x- als de y-richting het dubbele van de maximale afmeting van een te behandelen schilderij.

- Zowel het schilderij als de laser bewegen, elk in een andere richting. Deze optie valt uiteraard ook af.

Scanning zal derhalve moeten gebeuren door alleen de laserbundel, toegevoerd vanaf een gefixeerde laser, te verplaatsen over het schilderij. Daarvoor zijn weer oplossingen denkbaar die niet voldoen.

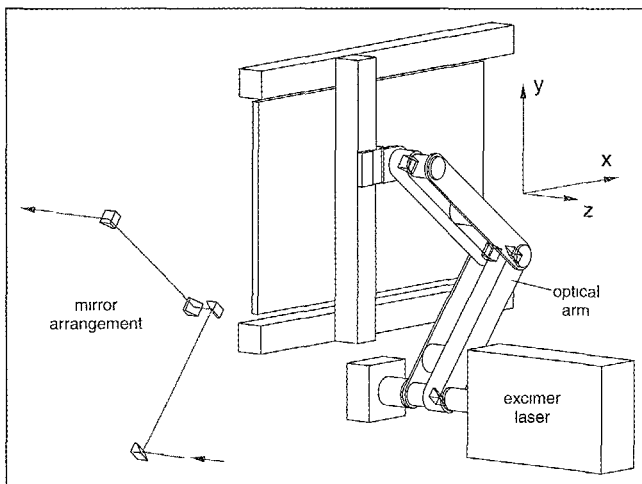
- Fiber optics. Door interne reflecties in een glasfiber gaat het Gaussische bundelprofiel verloren, waardoor de overlap op naastliggende posities niet tot uniforme bestraling van het oppervlak leidt.
- Flying optics met verplaatsbare of draaibare spiegels die de bundel over het schilderij laten lopen.

Door de relatief hoge divergentie van de excimeerlaserbundel zal de afmeting van de spot, en dus de intensiteit van de bestraling, over het oppervlak variëren met de posities van de spiegels.

De uiteindelijke oplossing ligt in een variant op bovengenoemde flying optics, namelijk een optische arm die werkt volgens het principe van een periscoop (zie afbeelding 7). Deze oplossing heeft twee sterke punten: de optische weglengte van de laserbundel is constant en de spiegelconfiguratie zorgt ervoor dat het bundelprofiel behouden blijft. Daardoor levert deze optische arm overal op het te scannen oppervlak een bundel met gelijke eigenschappen af. De ontwerp-opgave die dan nog rest is de nauwkeurigheid waarmee het oppervlak wordt gescand. Als die voldoende is, dan is een uniforme bestraling van het oppervlak gegarandeerd.

Het scannen van het oppervlak moet gebeuren door de kop, daar waar de bundel uit de optische arm treedt. Dat kan actief, met een (antropomorfe) arm die is uitgerust met motoren in de gewrichten en die in polaire coördinaten opereert, zoals de menselijke arm. Het kan echter ook passief, met een manipulator die een beweging aan de kop voorschrijft (zie afbeelding 7). Deze laatste oplossing ligt voor de hand: het scannen van het oppervlak vindt, gezien het rechthoekige profiel van de laserbundel, bij voorkeur plaats langs rechte (horizontale) lijnen. Dit is eenvoudig te realiseren met een xy-manipulator, waarbij de bewegingen in de x- en de y-richting zijn ontkop-

peld. Voor het ontwerp is dat gunstig omdat aan de beweging in de x-richting, met veel snelle opeenvolgende bewegingen, andere eisen worden gesteld dan aan de beweging in de y-richting, een enkele stap aan het eind van een x-scan. Bovendien ondersteunt de manipulator de kop aan het uiteinde van de optische arm, op het punt waar de scanning plaatsvindt, hetgeen resulteert in de grootst mogelijke nauwkeurigheid en stijfheid van het scannersysteem.



Het scannersysteem met optische arm en xy-manipulator. Links een schematische weergave van de positionering van de spiegels in de optische arm, volgens het principe van de periscoop.

Vrijheidsgraden

Ontwerpen voor grote nauwkeurigheid kan volgens een mechanische benadering, waarbij een ontwerp moet worden gefabriceerd, gepositioneerd en gecalibreerd met grote precisie. Dit vraagt met name veel van de positionering van de spiegels in de arm. De mechatronische ontwerpbenadering gaat uit van een minder extreme mechanische precisie en brengt daar vervolgens verbetering in door voorspelbare fouten, bijvoorbeeld een systematische drift afhankelijk van de positie, in een nauwkeurige calibratie vooraf te bepalen en daarvoor vervolgens te corrigeren in de besturing van het systeem. Met minder investering in de mechanische nauwkeurigheid wordt zo toch een beter resultaat bereikt.

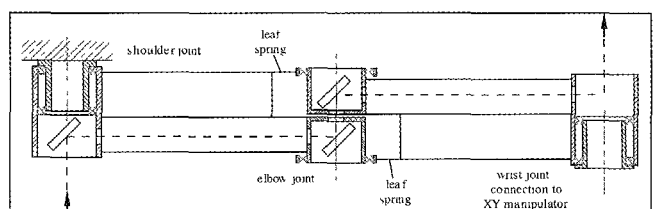
Nauwkeurigheid vraagt om het elimineren van speling en terugslag in draaiverbindingen, door lageringen voor te spannen, en om een hoge mechanische stijfheid. Deze stijfheid mag echter niet door overbepaling worden gerealiseerd. Want die leidt tot onvoorspelbare interne krachten, derhalve onvoorspelbare wrijving en daardoor, ten slotte,

tot onvoorspelbare positiefouten. Dit kan alleen worden voorkomen als de vrijheidsgraden correct zijn bepaald en het ontwerp daadwerkelijk het juiste aantal coördinaten vastlegt. In de praktijk schort het hier nog wel eens aan, wanneer ontwerpers voor een overbepaald ontwerp kiezen, om met de stijfheid aan de veilige kant te blijven.

Een beschouwing over de scanningkop kan dit illustreren. De afstand van de kop tot het oppervlak van het schilderijs moet constant blijven. Dit betekent dat de z-coördinaat, loodrecht op dat oppervlak, moet worden vastgelegd. Dit is mogelijk door een hoge stijfheid van de optische arm te realiseren of door de kop vast aan de xy-manipulator te bevestigen, maar niet door beide acties tegelijk. In het ontwerp is gekozen voor een stijve arm en een 'losse' verbinding van de kop aan de xy-manipulator door middel van een bladveer.

Optische arm

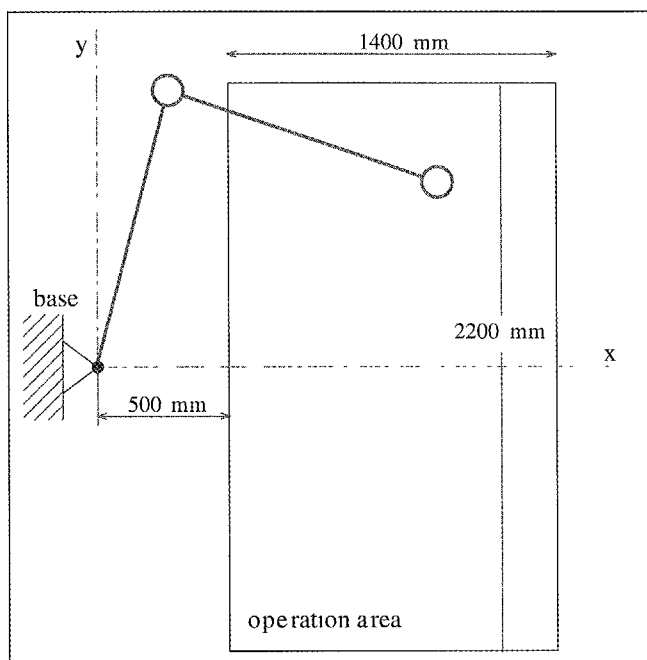
De optische arm kent drie gewrichten: schouder, elleboog en pols (zie afbeelding 8). Bij de schouder is de arm bevestigd aan een frame, de elleboog maakt een draaiing mogelijk met behoud van bundeleigenschappen en bij de pols is de scanningkop losjes bevestigd aan de xy-manipulator. Bij het ontwerp van de optische arm wordt de uiteindelijke onnauwkeurigheid in de positionering van de laserspot bepaald door de stijfheid van de arm, de lagering in de gewrichten en de uitlijning van de spiegels.



Afbeelding 8 Bovenanzicht van de optische arm in doorsnede.

Stijfheid

Extra buizen zorgen voor de buig- en torsiestijfheid van de arm, waarbij bladveerverbindingen overbepaling in het systeem voorkomen. Uit een beschouwing van de stijfheid van de optische arm valt af te leiden dat deze maximaal is voor een arm met twee ledematen van gelijke lengte. Bij een te bewerken oppervlak van 1400x2200 mm² is een lengte van 1200 mm voor een ledemaat voldoende om het gehele oppervlak te bestrijken, zonder dat extreme standen (zoals de gestrekte) voorkomen, waarin grote versnellingen van met name het ellebooggewricht kunnen optreden (zie afbeelding 9).



Afbeelding 9. Bereik van de optische arm.

Lagering

De lagering in de gewrichten is met name kritisch in het ellebooggewricht, waar de rotatie-as van dat gewricht moet samenvallen met de optische weg van de laserbundel. De oplossing die daarvoor gekozen is bestaat uit voorgespannen lagers in een zogeheten O-opstelling, die zorgt voor een grote stijfheid. Bovendien moet het ellebooggewricht, en dus lagering, licht uitgevoerd worden om natrillingen te minimaliseren van uitslagen die kunnen optreden bij minder gunstige standen van de optische arm (schaar-effect). Bij de lagering in schouder- en polsgewricht wordt voorspanning door de constructie aangebracht. De totale lagerconstructie is zo ontworpen dat deze stijver is dan de optische arm zelf. Bovendien maakt de gekozen constructie het mogelijk dat de spiegels in- en uitgemonteerd kunnen worden zonder de lagers te hoeven demonteren.

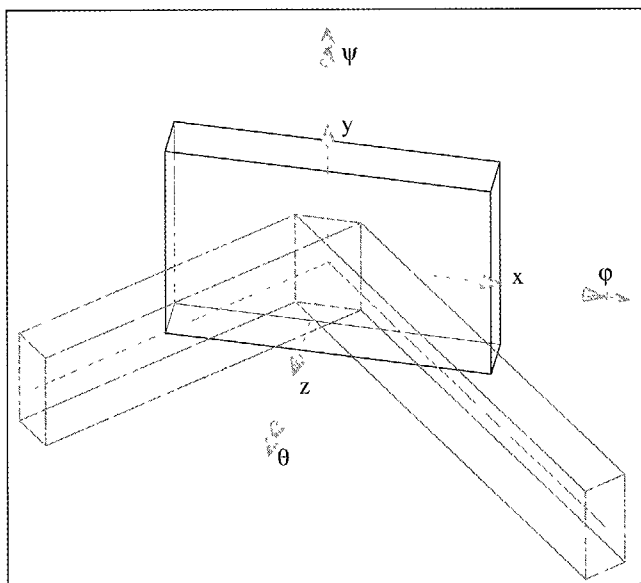
Uitlijning spiegels

De meest kritische factor voor de nauwkeurigheid van de positionering van de laserspot, ten slotte, is de uitlijning van de spiegels. Het gaat om vijf spiegels, vier in de optische arm en een spiegel die de uittrekkende laserbundel in de optische arm stuurt. Deze extra spiegel voorkomt het moeizame exacte uitlijnen van de zware laser ten opzichte van de optische arm.

Voor een nauwkeurige uitlijning kan een mechanische ontwerpaanpak worden gevolgd, die uitgaat van preci-

siemontage van alle spiegels, onder hoeken van exact 45° met de rotatie-as van het gewricht waarin de betreffende spiegel zich bevindt. Het alternatief is bij voorbaat uitgaan van een niet-exacte uitlijning en voorzien in een regelmechanisme voor het na fabricage en montage zo nauwkeurig mogelijk uitlijnen van de spiegels. Dat uitlijnen kan simpelweg handmatig gebeuren, met stelschroeven, of regeltechnisch met actuatoren die elektrisch worden aangestuurd. In dit geval blijkt de handmatige oplossing voldoende nauwkeurigheid op te leveren (zie hierna). Het feit dat de extra belasting van de optische arm veel minder is dan bij een regeltechnische oplossing, geeft in het ontwerp de doorslag ten gunste van handmatige uitlijning. Wederom een voorbeeld van een mechatronische aanpak, in die zin dat niet in één discipline met veel moeite een maximale precisie wordt nagestreefd, maar met inbreng van een andere discipline eenvoudiger het gewenste resultaat wordt bereikt. In dit geval zo eenvoudig dat een handmatige oplossing volstaat.

Het ontwerpen van een nauwkeurige positionering van de spiegels begint met een beschouwing van de vrijheidsgraden (zie afbeelding 10).



Afbeelding 10. De zes vrijheidsgraden van een spiegel.

Drie vrijheidsgraden spelen hier geen rol. Variaties in x , y en θ leiden namelijk niet tot een drift van de laserbundel. Variaties in z , ϕ en ψ leiden daarentegen wel tot een drift van de bundel. Daarbij heeft een variatie in ψ het grootste effect. Een verandering van ψ leidt tot een verandering 2ψ in de oriëntatie van de bundel (zie afbeelding

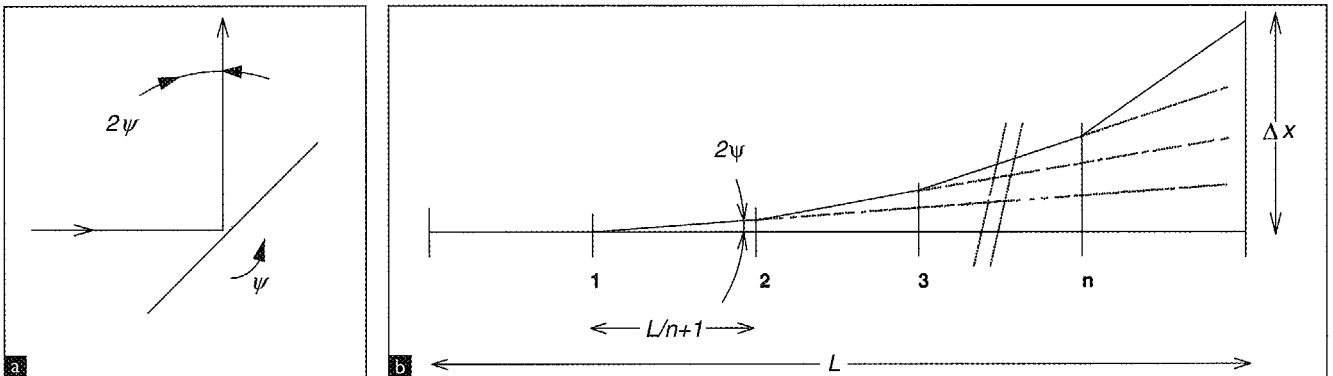
11). De totale verschuiving Δx van de spot aan het eind van een weglengte l , waarin zich spiegels i ($i = 1$ tot n) bevinden, is dan volgens een worst-case beschouwing:

$$\Delta x = \sum_{i=1}^n l \cdot \frac{l}{n+1} \cdot 2 \cdot \psi$$

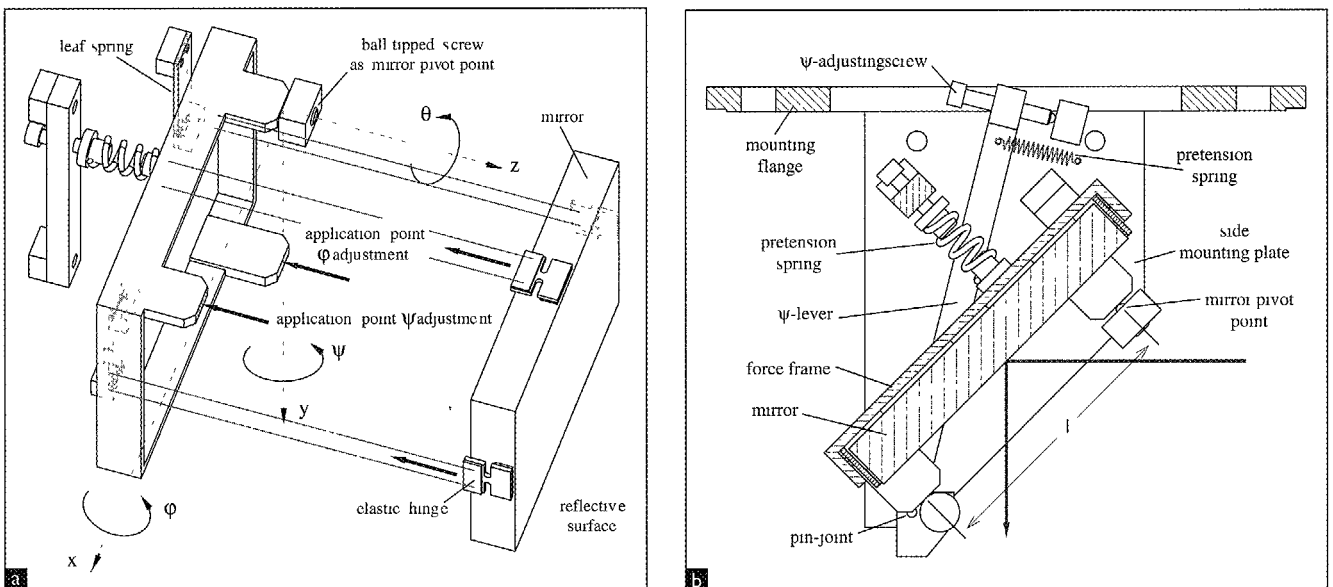
[* sommatie Σ loopt van $i = 1$ tot n *]

Bij de globale specificaties is eerder een laterale resolutie van $40 \mu\text{m}$ opgevoerd. Omdat bij opeenvolgende stappen van de laserspot de gemaakte fout nagenoeg even groot zal zijn, zal deze laterale resolutie (een soort relatieve fout tussen die opeenvolgende stappen) veel kleiner zijn dan de absolute fout. Dat leidt in de haalbaarheidsstudie [Scholten] tot een Δx van maximaal $0,2 \text{ mm}$. Bij een weglengte van 3000 mm geldt dan een maximale hoeknauwkeurigheid van $\psi = 2,75 \text{ arcsec}$.

Bovenstaande beschouwingen over de nauwkeurigheid van uitlijning hebben geleid tot het ontwerp van een spiegelhouder die ruimte biedt aan een spiegel van $50 \times 70 \text{ mm}^2$ en die eenvoudig in de optische arm kan worden gemonteerd zonder de arm verder te demontieren (zie afbeelding 12 a). De spiegelhouder zorgt voor het instelbaar vastleggen van de drie vrijheidsgraden z , φ en ψ en houdt drie vrijheidsgraden (θ , x en y) over. De spiegel is middels elastische scharnieren verbonden aan een krachtenframe. Verstelkrachten en voorspankrachten grijpen aan op dit krachtenframe, waarbij de door elastische scharnieren opgehangen spiegel niet belast wordt en dus ook niet vervormt. Een bijkomend voordeel is dat bij benadering sprake is van een thermisch centrum, waardoor temperatuurvariaties niet leiden tot ongewenste veranderingen in de positie of oriëntatie van de spiegel.



Afbeelding 11 Afbuiging van de bundel door variatie in spiegelhoek ψ (links) en worst-case resultaat voor n spiegels.



Afbeelding 12: De spiegelhouder in 'exploded view' (a) en zijaanzicht (b).

Voor afregeling van de meest kritische coördinaat, ψ , is gekozen voor een hefboom met stelschroef (zie afbeelding 12 b). Bij een overbrengingsverhouding van 1:20 en een afstand l van 56 mm tot het kantelpunt, vertaalt de benodigde hoeknauwkeurigheid (2,75 arcsec) zich in een hefboomverplaatsing van 0,015 mm. Bij een simpele M3 stelschroef met spoed 0,5 mm is dit een draaiing van 11° . Dat is ergonomisch goed mogelijk met de hand. Conclusie is dat bij calibratie handmatige fijnstelling van de spiegels mogelijk is. Calibratie vindt plaats met behulp van een HeNe laserbundel ($\lambda = 632.8$ nm), waarvoor de spiegels – die immers maximaal reflecteren bij $\lambda = 248$ nm – gedeeltelijk doorlatend zijn. De doorgaande bundel wordt achter elke spiegel gedetecteerd met een fotodiode achter een uiterst klein gat in een flens die op de optische arm is gemonteerd.

xy-manipulator

Na het ontwerp voor de optische arm volgt de xy-manipulator die de scanningbeweging van de kop van de optische arm met korte, snelle bewegingen moet verzorgen. Omdat scanning in horizontale richting plaatsvindt, is de beweging in de x-richting de meest kritische. De scanning in x-richting verloopt typisch in stappen h_m van 2,5 mm in een tijd t_m van 0,1 s. De maximale plaatsfout u_0 was eerder al bepaald op 0,04 mm. Dat leidt tot een relatieve plaatsfout $U_0 = u_0 / h_m$ van 0,016. De maximale snelheid wordt op 300 mm/s gesteld om binnen een acceptabele tijd het totale werkgebied te kunnen bestrijken.

Een dergelijke scanningstap wordt door een motion controller met een input $h(t)$ aan de x-actuator opgelegd. Een simpele rampfunctie geeft discontinuïteit in snelheid, wat regeltechnisch een complexe oplossing vraagt. Een parabolische functie bij wijze van 'nette' input heeft dan de voorkeur, daar waar functies van nog hogere orde te rekenintensief kunnen worden. In dat geval is de maximale versnelling $a_{\max} = 4 \cdot h_m / t_m^2$; deze bedraagt dan 1 m/s^2 .

Vervolgens kunnen de bewegingsvergelijkingen voor de optische arm worden opgesteld en opgelost [Scholten, appendices]. Voor de massa's van de beide ledematen wordt 4 kg genomen en voor de massa's van spiegel en lagering in elleboog- en polsgewricht respectievelijk 2 en 1 kg.

De kracht op het polsgewricht varieert afhankelijk van de posities van de ledematen. Met inbegrip van een massa van 5 kg voor de x-stage (het bewegende systeem voor het scannen in de x-richting) en daarop geplaatste monitoringapparatuur, blijkt de maximaal optredende

kracht een belasting van 21,5 kg voor de beweging in de x-richting te representeren.

Voor het systeem wordt tevens de laagste eigenfrequentie, bij geblokkeerde actuator, berekend uit

$\omega_m = 2\pi / (\tau_m \cdot t_m)$, waarin τ_m de dimensieloze periode van het systeem is volgens $\sqrt{(5 \cdot U_0)}$. Deze frequentie bedraagt 35 Hz. De maximaal benodigde stijfheid c_x is dan $m_{x\text{-load}} \cdot \omega_m^2 = 1.10^6 \text{ N/m}$. Voor een nadere toelichting op bovenstaande berekening wordt verwezen naar [Koster, Van Luenen en De Vries].

Voor de y-beweging kan een analoge berekening worden uitgevoerd, met een stap van 30 mm, gegeven de relatief grote hoogte van de dwarsdoorsnede van de laserbundel. De maximale versnelling van 1 m/s^2 levert een tijdstap van 0,35 s, een maximale belasting van 56 kg (inclusief een massa van 25 kg van de y-stage), een laagste eigenfrequentie van 10 Hz en een stijfheid c_y van $2,3 \cdot 10^5 \text{ N/m}$. Speling komt als een speciaal punt van aandacht naar voren uit het rekenwerk aan de bewegingsvergelijkingen. De kracht in de x-richting kan op een gegeven punt van teken omdraaien. Als de kracht nul is heeft de speling vrij spel. Daarom is voor een speciale harmonic drive (SKF) gekozen, die nagenoeg spelingsvrij is. In de y-richting speelt dit probleem niet omdat de zwaartekracht als het ware voor een voorspanning zorgt.

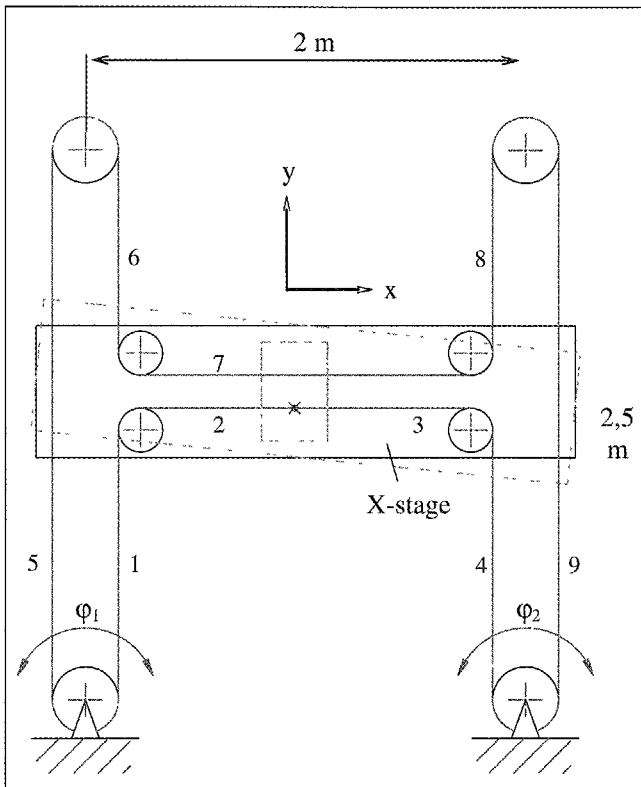
Conceptkeuze

Aan de hand van bovenstaande berekende waarden van de stijfheid voor beweging in de x- en in de y-richting, kan de keuze van een concept voor de xy-manipulator worden onderbouwd.

Een eerste optie is een schroefspindel met kogelomloopmoer. Dit geeft een schroefbeweging, waarbij de x- dan wel de y-stage, aangedreven door de schroef, over een lineaire geleider loopt en de moer zodanig aan de stage is bevestigd dat het systeem niet wordt overbepaald. De totale stijfheid van een dergelijk schroefstelsel wordt bepaald door de axiale en de torsiestijfheid. Voor een stalen schroef met een spoed van 15 mm, een diameter van 20 mm en een lengte van 2,5 m wordt een stijfheid berekend van $2 \cdot 10^7 \text{ N/m}$. Dat is op zich voldoende. De eigenfrequentie voor buiging komt echter vanwege de grote lengte van de schroef uit op een lage waarde van iets meer dan 9 Hz. Zelfs met de relatief grote spoed van 15 mm/s levert dat een maximale snelheid op van slechts 135 mm/s, wat ver beneden de specificatie van 300 mm/s ligt. Daarom valt het schroefconcept af.

Een alternatief voor de xy-manipulator is aandrijving met een enkele, gesloten riem, aangedreven door twee

motoren, die bij rotatie in dezelfde richting een verplaatsing in de x-richting bewerkstelligen, en bij rotatie in tegengestelde richting een y-verplaatsing (zie afbeelding 13).

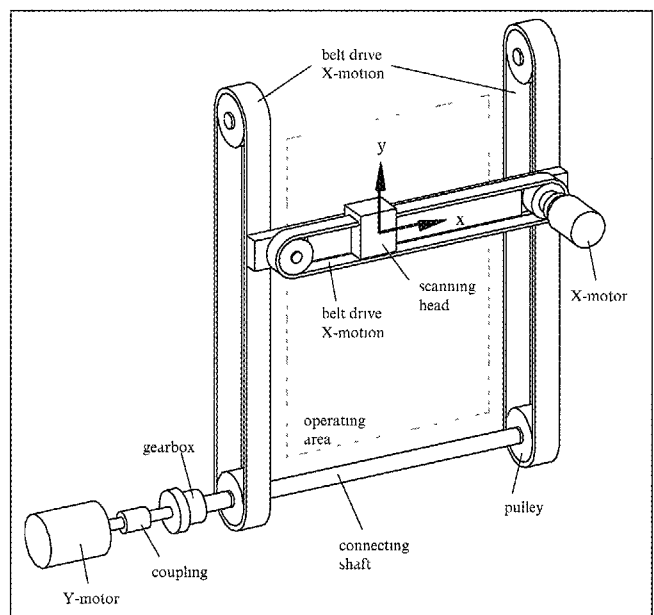


Afbeelding 13 Een xy-manipulator met aandrijving van een enkele, gesloten riem.

De stijfheden voor beweging in de x- en de y-richting blijken minimaal in de orde van $1-2 \cdot 10^6$ N/m te liggen. Dat is op zich voldoende. Nu kan er echter geen rotatiestijfheid aan het systeem ontleend worden omdat de rotatiecoördinaat van de x-stage niet vastligt, als gevolg van de loop van de riem. Een alternatief met een gewijzigde loop van de riem heeft voldoende stijfheid voor rotatie van de x-stage, maar blijkt weer een ongunstige stijfheid voor de y-beweging op te leveren. Blijkbaar is hier principieel sprake van een uitrust van stijfheden.

De oplossing wordt gevonden in het ontkoppelen van de x- en de y-beweging, door voor de x-beweging een aparte gesloten riemaandrijving te gebruiken en voor de y-beweging zelfs twee afzonderlijke gesloten riemen, aangedreven door één as (zie afbeelding 14). Het vasthouden aan riemaandrijving houdt onder meer verband met het grote bereik, de eenvoudige verbinding met een lineaire

geleider en de mogelijkheid van lichtgewicht constructie. Bovendien blijkt de niet al te grote nauwkeurigheid bij aandrijving met tandriemen toch te voldoen. Want de fout die bij opeenvolgende stappen in de x-richting en bij scans voor opeenvolgende y-posities optreedt, zal reproduceerbaar min of meer constant zijn. Een eenvoudige constructie met een niet verwaarloosbare fout leidt dan toch tot een goede laterale resolutie.



Afbeelding 14. Het xy-manipulator concept met afzonderlijke riemaandrijvingen voor de x- en de y-beweging.

Een uitvoering met twee riemen voor de y-beweging heeft als mogelijk nadeel dat de twee riemen ongelijk belast worden afhankelijk van de positie van de scanningkop. Een scheve stand van de x-stage kan echter eenvoudig worden bepaald met linialen langs de beide y-geleiders. Gecombineerd met een liniaal langs de x-geleider kan de exacte positie van de scanningkop worden bepaald als ook de in principe bekende doorbuiging van de x-stage wordt meegenomen.

Riemaandrijving vereist wel toepassing van een voorspanning met een kracht die groter is dan de maximaal optredende kracht in het systeem (zie verderop).

Modellering

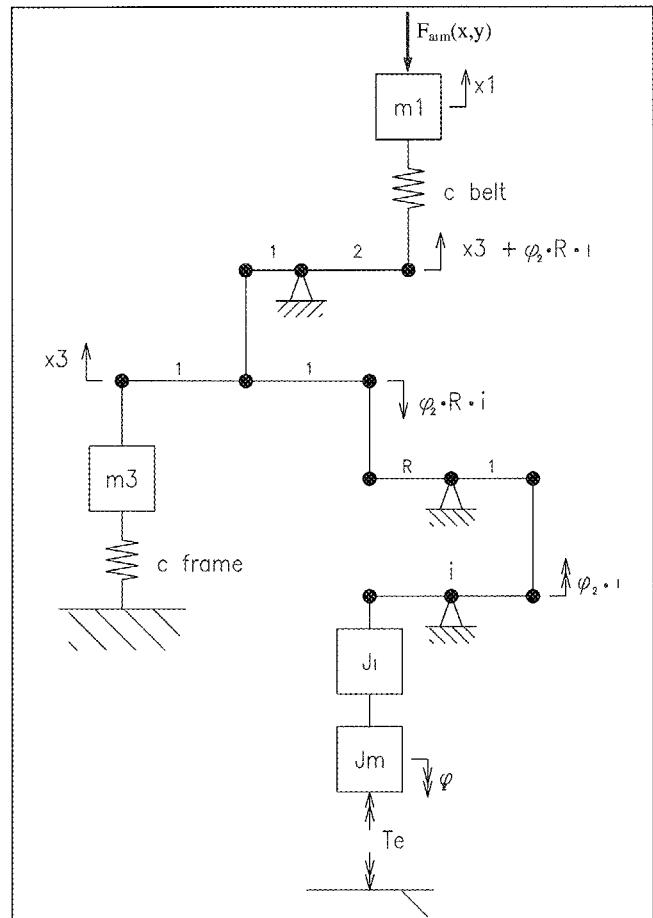
Nu een concept is gekozen, moet in modelstudies worden geverifieerd of de specificaties behaald kunnen worden. Daartoe worden de dominante massa's en stijfheden bepaald, zodat het systeemontwerp kan worden geopti-

maliseerd. Aan de hand hiervan kan uiteindelijk de motorkeuze worden bepaald. Zie ook [Koster, Van Luenen en De Vries].

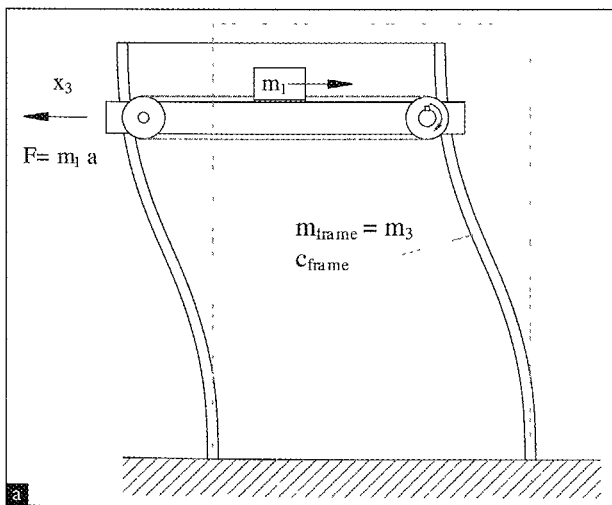
Wederom zal dit voor de kritische beweging, die in de x-richting, worden behandeld. Een versnelling van de x-stage zal leiden tot een belasting van het frame, zodat dit wordt vervormd zoals aangegeven in afbeelding 15 a. Dit kan worden vertaald naar een massa-veermodel, zoals schematisch weergegeven in afbeelding 15 b.

In de aandrijving is een overbrenging opgenomen om met een realistische motorkeuze een maximale output qua snelheidsbereik, torsiestijfheid en versnelling te kunnen verkrijgen. Dat vraagt wel om aanpak van de speling die daarmee wordt geïntroduceerd. Praktisch houdt dat in het toepassen van een harmonic drive (SKF), het aanbrengen van voorspanning en het zoveel spelingsvrij koppelen van de last aan de riem.

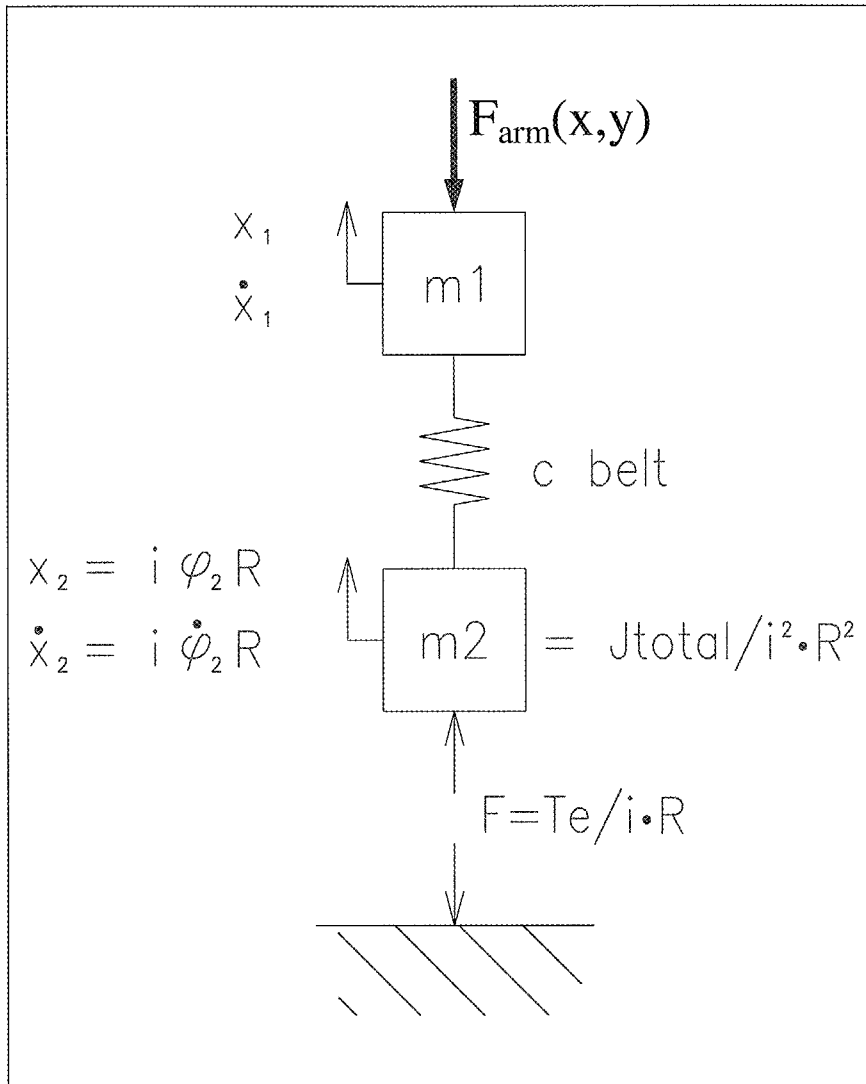
Het massa-veermodel van afbeelding 15 b kan worden omgezet in een dynamisch model (zie afbeelding 16). Dit is een zesde-orde model, omdat er drie (gecombineerde) massa's aanwezig zijn: massa en stijfheid van het frame (m_3 en c_{frame}), massa van de last en stijfheid van de riem (m_1 en c_{belt}) en de massa's van motor en overbrenging (J_m en J_i). Dit model kan gereduceerd worden tot een vierde-orde model, onder de aanname dat de stijfheid van het frame zeer groot is, waardoor de framereactie x_3 kan worden verwaarloosd. Verderop wordt deze aanname onderbouwd.



Afbeelding 16. Dynamisch model van de x-beweging.



Afbeelding 15. De beweging in de x-richting: (a) reactie van het frame op een versnelling en (b) schematisch massa-veermodel van de aandrijving.

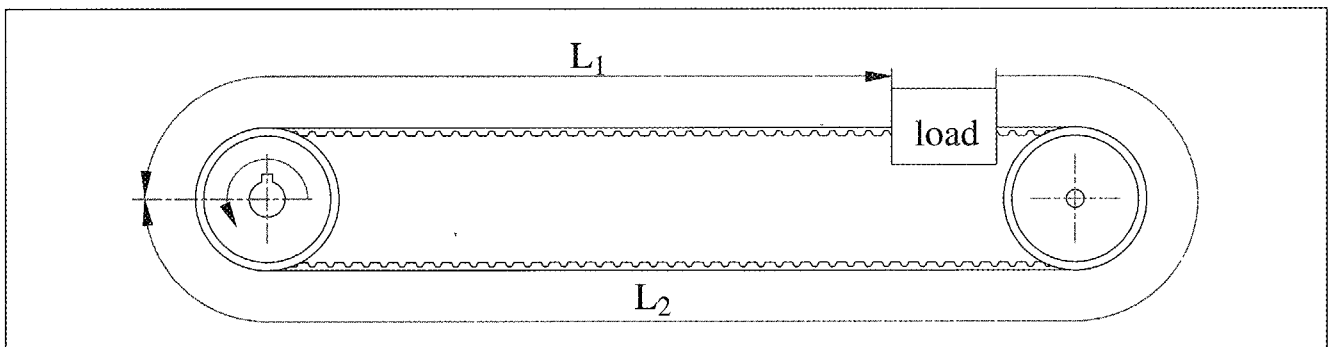


Afbeelding 17. Gereduceerd vierde-orde dynamisch model van de x-beweging.

Het resulterende model is weergegeven in afbeelding 17. De stijfheid van de riem blijkt de dominante factor. Gegeven een specifieke stijfheid van de riem ($c_{spec} = 1,87 \cdot 10^6 \text{ N/m}$), kan de stijfheid van de riem worden berekend volgens $c_{belt} = L_{belt} \cdot c_{spec} / (L_1 \cdot L_2)$, zie afbeelding 18. Deze stijfheid is minimaal $2,42 \cdot 10^6 \text{ N/m}$, als de last m_1 het verst verwijderd is van de motor. Dit resultaat ligt ruim boven de specificatie van $1 \cdot 10^6 \text{ N/m}$.

Voor de y-beweging kan een vergelijkbare stijfheidsberekening worden uitgevoerd, waarbij de stijfheden van de riemen, de torsiestijfheid van de as die beide riemen aandrijft en de stijfheid van de x-balk moeten worden meegenomen. De totale stijfheid is dan een functie van de positie (x,y) van de scanningkop. Met de modelvergelijkingen kan nu de variatie in de totale stijfheid bepaald worden; deze blijkt in de range $1,1-5,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}$ te liggen, ruim boven de gevraagde $2,3 \cdot 10^5 \text{ N/m}$.

Tevens kan de statische afwijking in de y-richting worden bepaald, ten gevolge van doorbuiging van de x-balk, torsie van de aandrijvingsas en doorzakken van de riemen. Deze positiefout in de y-richting blijkt tussen $0,015$ en $0,060 \text{ mm}$ te liggen.



Afbeelding 18. Minimum-stijfheid configuratie van riem met last

Daarmee lijkt de maximaal aanvaardbare positiefout van 0,040 mm te worden overschreden, maar deze fout in y zal niet optreden tussen opeenvolgende scans in x -richting, die immers nagenoeg hetzelfde verloop kennen. De fout tussen opeenvolgende y -posities ligt veel lager dan de gevonden 0,060 mm. Kortom, ook aan deze specificatie is voldaan.

Motorkeuze

Nu de x - en y -bewegingen zijn doorgerekend en de gewenste nauwkeurigheden bekend zijn, is het ontwerp van het servo-systeem voor de motion control aan de orde, met als eerste onderwerp de motorkeuze. Stappenmotoren komen hiervoor niet in aanmerking omdat die niet geschikt zijn voor hoge snelheden. De voorkeur gaat uit naar borstelloze servo-motoren vanwege hun performance qua snelheid en versnelling, warmte-dissipatie, minimaal onderhoud (geen borstels vervangen) en compacte inbouwafmetingen. Aan de motor kan nog een rem worden toegevoegd voor het geval van spanningsuitval of wanneer de optische arm langdurig in bepaalde posities moet worden gehouden. De keuze is uit een groot aantal motoren met uiteenlopende karakteristieken. Een keuze daaruit vergt iteratieve berekeningen omdat verschillende motor- en transmissieparameters aan de specificaties moeten voldoen en omdat die parameters zelf invloed op het gedrag van het aandrijvingssysteem hebben. Deze invloed wordt bijvoorbeeld uitgedrukt in de factor α , die de verhouding tussen de massa van de aandrijving en de totale massatraagheid (aandrijving + belasting) weergeeft. Ideaal is de verhouding 0,5, de situatie van zogeheten traagheidsmatch ('inertial match'). In de praktijk is een bepaalde range voor α acceptabel, waarbij α zeker niet te groot mag worden. Want als een te zware motor een te lichte belasting aandrijft, kan het systeem instabiel worden.

Gegeven een maximale belasting van 65 N, bij een transmissieverhouding van 1:50 en een diameter van de aandrijfpoelie van 4 cm en rekening houdend met verliezen in de transmissie moet de motor een maximaal koppel kunnen leveren in de orde van 0,3 Nm. Verder is vooral de steilheid van de motor van belang. Deze parameter geeft aan hoe een variatie in de belasting zich verhoudt tot de resulterende verandering van de snelheid van de motor. Bij voorkeur moet deze steilheid zo groot mogelijk zijn, zodat een verandering in belasting slechts een kleine snelheidsverandering tot gevolg heeft.

Een analoge beschouwing kan voor de y -beweging worden gehouden, waarbij vooral de veel grotere massa-

traagheid van de y -stage vraagt om een zwaardere motor, met een maximum koppel in de orde van 1,5 Nm.

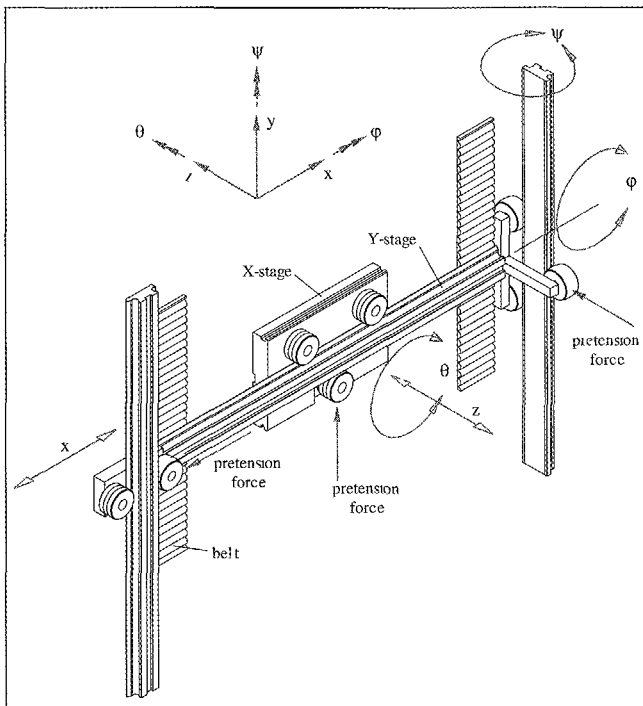
Motorregeling

Vervolgens moet de optimale regeling van de motor worden bepaald. Volgens het gereduceerde model van afbeelding 17 zijn twee elementen van belang, de motormassa (m_2) en de massa van de belasting (m_1). Beiden hebben positie en snelheid als kandidaten voor de servo-regeling. Met twee variabelen kan een stabiele regeling worden gerealiseerd. Wanneer daarvoor positie en snelheid van de motor worden gekozen, wat op zich het eenvoudigst is te realiseren, dan wordt de onnauwkeurigheid die de transmissie introduceert echter gemist. Het alternatief waarbij op zowel positie als snelheid van de last wordt geregeld heeft als nadeel dat hiervoor slechts een zeer beperkt stabiliteitsgebied geldt voor de factor a , die de variatie in belasting weergeeft. De uiteindelijke keuze is daarom voor regeling op motorsnelheid en positie van de belastende massa. Daarvoor geschikte sensoren zijn respectievelijk een 'resolver' voor de motorsnelheid en een lineaire encoder op basis van magnetische tape. De signalen van deze sensoren vormen de input voor een PD- of PID-regelaar, tesamen met de stap h_m die de motion controller oplegt.

MATLAB-simulaties voor verschillende, extreme waarden van α laten zien dat zelfs met een simpele PD-regeling de bandbreedte van het geregelde systeem voor de x -beweging tussen 45 en 67 Hz ligt. Dat is groter dan de eerder berekende laagste eigenfrequentie van 35 Hz, wat betekent dat het systeem voldoende snel is. Bovendien blijkt de relatieve positiefout met een maximale waarde van 0,0045 ver beneden de eerder gespecificeerde 0,016 te blijven. Voor de y -beweging gelden dezelfde conclusies. Simulaties met een PID-regelaar laten een stabiele regeling zien, zelfs als een random verstrooiing wordt geïntroduceerd.

x- en y-stage

Ten slotte passeert het ontwerp van de x - en de y -stage de revue. Hier zijn wederom de kinematische principes toegepast, zodat alle niet-vrije coördinaten slechts één keer zijn vastgelegd. Afbeelding 19 toont de x -stage met geleidewielen die beweging in de x -richting vrijlaten, maar door hun geometrie en de toepassing van voorspanning, alle andere coördinaten vastleggen zonder overbepaling.

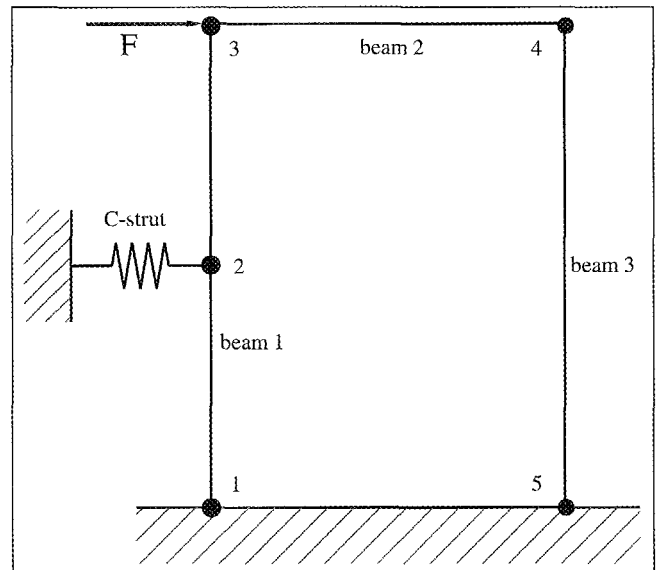


Afbeelding 19 De vrijheidsgraden van de lineaire geleiders voor de x- en de y-beweging.

Het frame

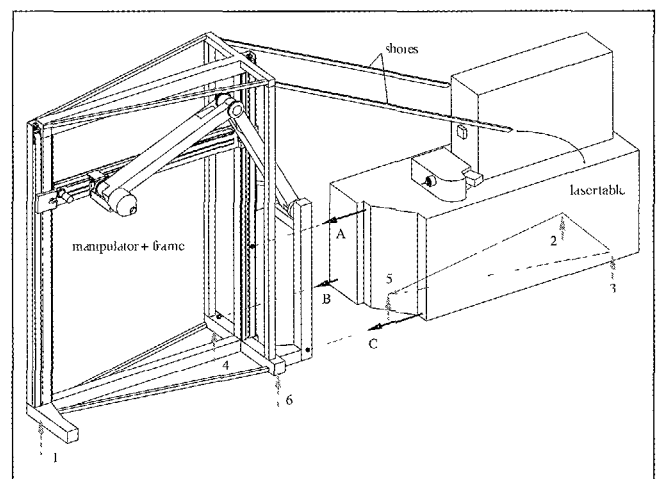
Bij de modelvorming was een grote stijfheid van het frame verondersteld. Dat moet hier nog worden onderbouwd. Uit MATLAB-simulaties blijkt een frame met een massa van 35 kg en een totale stijfheid van $1 \cdot 10^7$ N/m te voldoen. Berekeningen aan het model uit afbeelding 20 leveren echter, zelfs met toevoeging van verstevigingen, een massa van 85 kg bij een stijfheid van $8,3 \cdot 10^5$ N/m op. Deze lage waarde heeft natuurlijk alles te maken met de grote afmetingen van het frame. Omdat het vooral gaat om de stijfheid in het xy-vlak, waarin immers de beweging van de manipulator plaatsvindt, wordt de oplossing gezocht in een dunne plaat in dit vlak. Een glasplaat levert de gewenste hoge stijfheid-massa verhouding, biedt bovendien bescherming tegen eventuele gereflecteerde laserstraling en biedt maximaal zicht op de opstelling. Een glasplaat van $2 \times 2,6$ m² en 7 mm dik levert een stijfheid van $5,57 \cdot 10^7$ N/m, bij een massa van slechts 47 kg. Deze oplossing voldoet dus ruimschoots.

Het ontwerp voor het laser cleaning station is hiermee voltooid. Om redenen van transporteerbaarheid wordt



Afbeelding 20 Model van het frame.

het geheel in twee delen uitgevoerd. een lasertafel en een manipulatorframe. De twee delen worden aan elkaar bevestigd zoals getoond in afbeelding 21. Na bevestiging worden de ondersteuning 4, 5 en 6 van het laserframe opgetrokken, zodat een kinematisch correct bepaalde plaatsing ontstaat. De schoren zijn toegevoegd om het frame stijver te maken, waardoor trillingen worden gedempt. Een (kleine) overtreding van de regels der kinematica omwille van beheersing van de dynamica.



Afbeelding 21. Verbinding van lasertafel met manipulatorframe.

Tot slot

Met een elegant ontwerp is de in principe verwoestende laserbundel ingetoomd voor het delicate schoonmaken van schilderijen. De hoofdrollen in het ontwerp waren weggelegd voor de disciplines optica, mechanica en regeltechniek. Met een waarlijk mechatronische aanpak is de hoge nauwkeurigheid bereikt die voor deze laser-toepassing absoluut vereist is. Belangrijke aspecten in het ontwerpproces zijn de systematische analyses van vrijheidsgraden, het slim toepassen van voorspanning ter vermindering van speling en andere foutenbronnen en de combinatie van bewezen constructieprincipes [Koster] met soms eenvoudige 'handwerk'-oplossingen. Het tekent de schoonheid van de mechatronische ontwerpbenadering.

Literatuur

M.P. Koster, *Constructieprincipes voor het nauwkeurig bewegen en positioneren* (3^e druk), Twente University Press, Enschede, 2000.

M.P. Koster, W.T.C. van Luenen en T.J.A. de Vries, *Mechatronica*, collegedictaat Universiteit Twente, Enschede, 1994.

J.H. Scholten, *The development of an advanced workstation for controlled laser cleaning of paintings*, afstudeerverslag (incl. appendices) Universiteit Twente, Enschede, 1998.

R. Teule, *Kunstlicht – Schilderijen schoonmaken met lasers*, *Natuur & Techniek* 67, 11 (1999), p. 24-33.

De auteurs

Hans van Eerden is freelance tekstschrijver te Winterswijk, Hans Scholten is directeur van Art Innovation (bureau voor ontwikkeling van hoogwaardige kunstrestauratieproducten te Hengelo (Ov)) en Dennis Schipper is directeur van Demcon, ontwerp-bureau voor hoogwaardige mechatronische producten, productiemiddelen en testapparatuur te Hengelo (Ov)

Met dank aan Rien Koster voor zijn constructief commentaar.

Voor meer informatie over het Laser Cleaning Station kunt u contact opnemen met ir. J.H. Scholten, technisch directeur van Art Innovation, tel. 074-2501239, e-mail hans.scholten@art-innovation.nl, internet www.art-innovation.nl.