



Veranstaltungsort:

Heinz Nixdorf MuseumsForum
Fürstenallee 7, 33102 Paderborn

- **Mechatronische Produkte**
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Ressourceneffizienz**
(Energie, Material, ...)
- **Automatisierte Mobilität**
(Konzepte, Modelle, Sensorik)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Smarte Aktoren**
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Serienfertigung mechatronischer Produkte**
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)

www.VDI-Mechatroniktagung.de

Anwendung der Mechatronik zur Umsetzung der kinetischen Skulptur Pendulum

Ing. Martin Bušek, Ph.D., VUTS a.s. Liberec, 46001 Liberec, Czech Republic, martin.busek@vuts.cz

Ing. Jaroslav Antoš, VUTS a.s. Liberec, 46001 Liberec, Czech Republic, jaroslav.antos@vuts.cz

Prof. Ing. Miroslav Václavík, CSc., VUTS a.s. Liberec, 46001 Liberec, Czech Republic, miroslav.vaclavik@vuts.cz

Kurzfassung

Das Projekt befasst sich mit dem Konzeptionsentwurf, Entwicklung und Konstruktion der Skulptur Pendulum, mit der folgenden Fertigung eines funktionalen verkleinerten Modells der Skulptur. Als Skulptur wird im Allgemeinen ein Kunstwerk nach dem Design eines Designers angesehen, das neben grundlegenden ästhetischen Funktionen noch andere, z. B. beleuchtende, beschallende Funktionen im Installationsraum erfüllen kann. Darüber hinaus ist die kinetische Skulptur durch bewegliche Teile und Komponenten ergänzt, die das Erlebnis des Kunstwerks intensivieren und seine Einzigartigkeit und Unwiederholbarkeit schaffen. Die Grundidee der Skulptur Pendulum ist die Schaffung, allmähliche Zeichnung der definierten Muster in eine mit einer Sandschicht gebildete Unterlage mittels einer Design-Massenaufhängung, die einem Pendel ähnlich ist. Ein wichtiger Parameter in der Entwicklung sind die Dimensionen der endgültigen Skulptur, wo der Grundriss und die Höhe der Skulptur in der Größenordnung von mehreren Zehnern Meter und Gewichten von bis zu Hunderten Kilogramm erwogen werden. Ziel ist es, am Modell die mögliche Realisierbarkeit der Konstruktion in der realen Umgebung zu prüfen und das spezielle Prinzip des Antriebs und der Steuerung der Skulptur zu testen und zu verifizieren.

Abstract

The theme of the project is the design, development and construction of the Pendulum sculpture. Furthermore, the production of a functional scaled model of the sculpture. The sculpture is a piece of art designed by a designer for basic aesthetic functions, illumination, sound in the installation area. The kinetic sculpture consists of moving parts and components that enhance the experience of a piece of artwork and creates its uniqueness and unrepeatability. The basic idea of the Pendulum sculpture is the creation and rendering of defined images to a sand area. The rendering provides a design pendant resembling a pendulum. An important parameter in the development is the dimensions of the final sculpture. The ground plan and height of the sculpture is in several meters, weights of up to hundreds of kilograms. The aim is to verify the reliability of the construction in a real environment and to verify the special principle of drive and sculpture control.

1 Einführung

Im Prinzip ist es möglich, das im Sand zeichnende Pendel durch ein einfaches Modell des Massenpunktes an einer Aufhängung, einem Seil zu ersetzen. Das Design der gezeichneten Muster ist jedoch sehr einschränkend, deshalb ist es notwendig, das ganze System als ein vollständig gesteuertes System, das nicht nur die Grundidee der Schwingung der Massenaufhängung ausnutzt, zu konzipieren. Bei der Lösung der Skulptur kann man mehrere mögliche Varianten der Umsetzung der gewünschten Funktion finden.

1.1 Pendel mit Ausnutzung des Magnetfeldes

Zur Erhaltung des Prinzips des Schwingens und des Befestigens des Pendels in einem Punkt kann man das sich bewegende Magnetfeld unter dem Pendel ausnutzen. Durch Einwirkung des Magnetfeldes würde der metallische Endpunkt (Magnet) der definierten Magnetposition unterhalb der Projektionsebene folgen. Die Bewegung könnte unter bestimmten Bedingungen auf Pendelbewegungen reagieren und auch definierte Muster zeichnen.

Unterhalb der Ebene der Zeichenfläche würde die Konstruktion eines zweiachsigen Positionierungssystems angeordnet werden, die einen starken Magnet (oder Elektromagnet) tragen würde. Dieser Magnet könnte nur in einer bestimmten Richtung verlegt werden, damit es nicht zur Beeinflussung der Umgebung, ob der Besucher oder anderer Pendel, kommt. Die Kraftkopplung zwischen den Magneten würde dazu führen, dass sich das Pendel entsprechend dem Modellmagneten bewegen sollte.

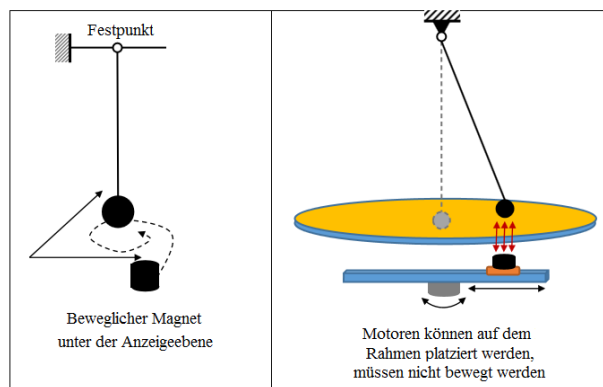


Bild 1 Skulptur mit Ausnutzung des Magnetfeldes

1.2 Gesteuertes Doppelpendel

Ein Pendel, zusammengesetzt aus zwei Teilen, Stange und Seil, kann für eine kontrollierte Pendelbewegung verwendet werden. Ein Teil, eine Stange, wird in der Verdrehung und Rotation gesteuert. Der zweite Teil, das Seil mit der Masse, bewegt sich mit der Zentrifugalkraft. Das Bewegen dieser Teile würde das Pendel zum Schwingen und zur Steuerung der Bewegung und Richtung bringen. Aus diesem Prinzip ist jedoch nicht ersichtlich, ob das Pendel in der Lage sein wird, die notwendigen Bewegungen zur Bildung der Muster und die genaue Umsetzung zu erreichen. Eine andere Variante dieses Konzepts ist das Ersetzen des Seils durch eine feste Stange, die zwar flexibel ist, aber bei fortgeschrittener Steuerung ohne Schwingen würde sie definierte Muster erzeugen. Dies wäre jedoch ein statisch unbestimmtes System, bei dem das System ständig an einen Ort mit null potentieller Energie gelangen müsste.

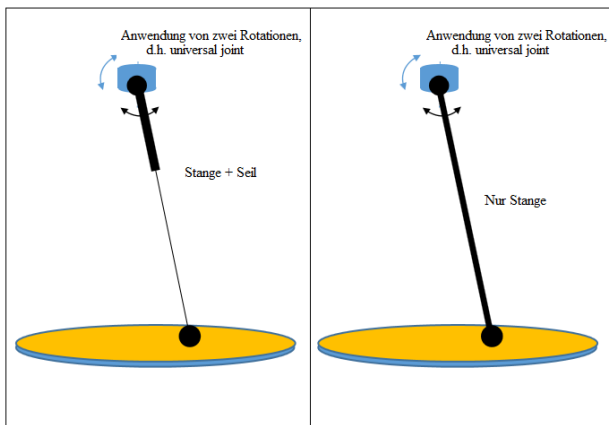


Bild 2 Skulptur auf dem Prinzip des gesteuerten Doppelpendels

1.3 Gesteuertes XY- Bewegungssystem

Solches Bewegungssystem kann die Form eines Portalkranes mit linearen Achsen, senkrecht zueinander oder eines Turmkranes mit Rotation und einer Gleitachse haben. Das System ist ein Gegenpol des konventionellen Pendels, es kommt also zur Unterdrückung des Schwingens während der Massenaufhängung. Als Unterdrückung kann man sich die Betätigung der Massenaufhängung, anschließend das Beiphasen der Bewegung mit der Phase des Systems, Versetzung und anschließende Anhaltung mit Unterdrückung des Schwingens ähnlich wie beim Start vorstellen. Bei dieser Bewegung neigt sich die Massenaufhängung leicht, aber danach bewegt sie sich schon senkrecht. In diesem Fall gibt es also keine dem Schwingen ähnliche Bewegung, aber nur eine Verschiebung – ein nicht schwenkender Kran. Der gewünschte Schwing-Effekt wie beim Pendel wird nicht erreicht, aber man kann das Zeichen nahezu beliebiger Muster sicherstellen. Im Falle der Wahl der durch das Seil und die Masse gebildeten Massenaufhängung kann diese weiter mit einer eigenen Wicklung ausgerüstet werden, damit es möglich ist, die gesamte Massenaufhängung über die Unterlage zu bewegen und somit intermittierende Muster zu realisieren.

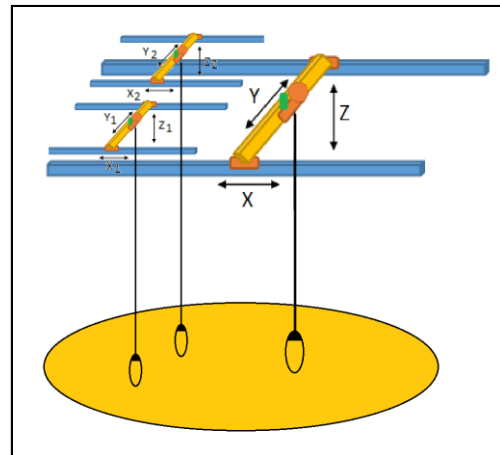


Bild 3 Skulptur mit dem XY-Bewegungssystem

Das System kann erweitert werden und kann auch aus mehreren selbständigen Bewegungssystemen, mehreren Zeichen-Aufhängungen, die sich auf verschiedenen vertikalen Ebenen befinden, kombiniert werden. Das grundlegende Bewegungssystem kann die gesamte Grundrissebene der Zeichenfläche umfassen, während die kleineren Bewegungssysteme auf der höheren vertikalen Ebene es ermöglichen, nur im Teil der Zeichenfläche zu operieren. Die Bedingung ist, dass man nicht kann, zu zeichnende Muster und Bewegungssysteme beliebig wählen – Durchdringung der Massen.

1.4 Seil-Dreibeinstativ (Tripod) mit zentralem Stützrohr

Variante der Skulptur ist auch eine Lösung, bei der die Massenaufhängung zu einer mit drei Freiheitsgraden am Grundrahmen gelagerte Stange befestigt ist. Anschließend wird die Massenaufhängung mit Hilfe von drei Seitenseilen und Seilwinden, die gleichmäßig um den Umfang des Grundrahmens herum angeordnet sind, abgelenkt. Die Ansprüchigkeit der Steuerung beruht auf Komplikationen mit mehrfachen Koordinatentransformationen im Raum, abhängig von der geometrischen Verteilung der einzelnen Elemente, der erregenden Antriebe der Skulptur und insbesondere aufgrund der elastischen Verbindungen und der Befestigung der Betätigungsstangen – Seitenseile und der zentralen Tragbefestigung.

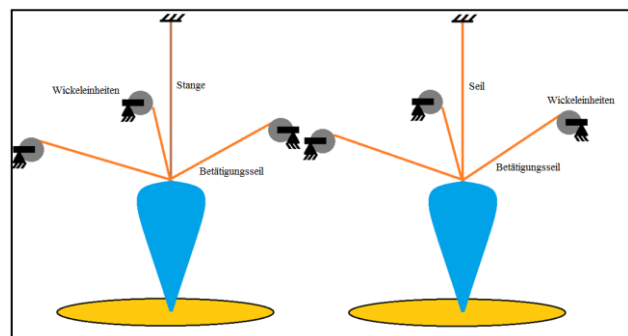


Bild 4 Skulptur auf dem Prinzip eines Seil-Dreibeinstativs (Tripods)

2 Funktionsmodell der Skulptur

Das Konzept eines funktionalen Skulptur-Modells sollte in Betracht bezüglich der zukünftigen Realisierung in einer realen Umgebung gezogen werden. Hier wird davon ausgegangen, dass die endgültige Installation des „Pendels“ sehr wahrscheinlich in der Lobby mit einer Höhe von min. 10 – 15 m über die Zeichenfläche mit einem Durchmesser von min. 5m aufgehängt wird. Die Masse der Aufhängung wird eine Hunderte von Kilogramm wiegende Design-Glaszusammensetzung sein. Bei der zukünftigen Umsetzung ist es notwendig, weiter die Möglichkeit zu prüfen, ob die Strukturelemente des eigenen Gebäudes als den Grundrahmen des Skulptur auszunutzen oder ein selbsttragendes vom Installationsraum unabhängiges System zu entwerfen.

Durch den Vergleich der vorgestellten Konzeptionsentwürfe und –Prinzipien wurde für das Funktionsmodell eine Variante gewählt, die es ermöglicht, in der Zukunft eine Skulptur mit größeren Abmessungen mit einem Minimum von Stützkonstruktionen, aber einer wesentlich komplizierteren Steuerung, also einem „Seil-Dreibeinestativ“ mit zentraler Tragstange zu installieren. Das Funktionsmodell der Skulptur wurde im Maßstab von ca. 1:5 entworfen, im Vergleich mit der vorausgesetzten endgültigen Umsetzung mit einer Auswahlmöglichkeit von verschiedenen Modifikationen der Massenaufhängung, unterschiedlicher Geometrie der Seiten-Betätigungsseile und der Kompliziertheit der zu zeichnenden Muster.

2.1 Erregung des Funktionsmodells

Die Umsetzung der eigentlichen Erregung des Antriebssystems der Skulptur erfolgt durch sechs synchronisierte Achsen. Die drei Achsen sind für die Bewegung in vertikaler Richtung, die Betätigung der Seitenseile der Skulptur bestimmt und werden mit Wicklungseinheiten gelöst. Eine andere Achse dient zur Betätigung eines bei der Neigung des Pendels gebrauchten ausziehbaren Zeichendornes, sie ist innerhalb einer Glaskomponente mit einer kleinen Lineareinheit mit Zahnriemen gelöst. Die letzten zwei Achsen sind virtuell, vom Master-Typ und sorgen für die Synchronisation der realen Achsen in Bezug auf die notwendige Transformation der Eingangsdaten des Musters in die drei unsymmetrisch positionierten Bewegungsgesetze der Servo-Antriebe der Wicklungseinheiten der Seitenseile. Bei dem eigenen Zeichnen der Muster wird eine ausreichende Zeitspanne angenommen, die minimale Ansprüche auf die Dynamik der Antriebseinheiten gewährleistet, die weitere Komplikationen in Form von Schwingung der Seiten-Betätigungsseile und damit auch der Massenaufhängung darstellt. Für die Steuerung und den Antrieb des Funktionsmodells der Skulptur wurden die Qualitätskomponenten des japanischen Herstellers Omron ausgewählt. Der Spitzen-Controller NJ301-1200 in der Version 1.14 stellt die eigentliche Steuerung sicher, er hat einen Kommunikationszyklus von 0,5ms, und er ist mit Funktionen für Logik-Sequenz-Steuerung, Steuerung der kontinuierlichen Bewegungen und auch der Robotik ausgerüstet. Die

Kommunikation erfolgt über die industriellen Busse EtherCAT und EtherNet/IP. Als der eigene Antrieb der Wicklungseinheit wurde der Servomotor der Reihe R88M-1M40030T-S2 mit der Frequenzstromversorgung R88D-1SN04H-ECT-400W verwendet. Es war erforderlich, die Regulierung mit ausgeschaltetem Feinabstimmen während der Ausführung der Bewegung einzustellen, das unerwünschte Toneffekte (Pfeifen) und Vibrationen durch Verstärkung der Proportionalkomponente in Folge der Verwendung von Schneckengetrieben in den Wicklungseinheiten verursachte.

2.2 Transformation von Koordinaten

Das grundlegende Problem des ausgewählten Skulpturentyps ist die Transformation von Koordinaten aus dem rechtwinkligen System, in dem das zu zeichnende Muster eingegeben wird, in ein neues Koordinatensystem für Seiten-Betätigungsseile bzw. Wicklungseinheiten, das durch die konkrete Geometrie der Lage der Wicklungseinheiten im Raum und der Anbringung der Seiten-Betätigungsseile an der Massenaufhängung gegeben ist. Das folgende Bild zeigt den Zustand der Transformation in der Ebene, es wird also angenommen, dass die Befestigung der Seiten-Betätigungsseile und Wicklungseinheiten in einer Ebene erfolgt und dass gleichzeitig keine signifikante vertikale Verschiebung der Massenaufhängung aufgrund ihrer Ablenkung stattfindet.

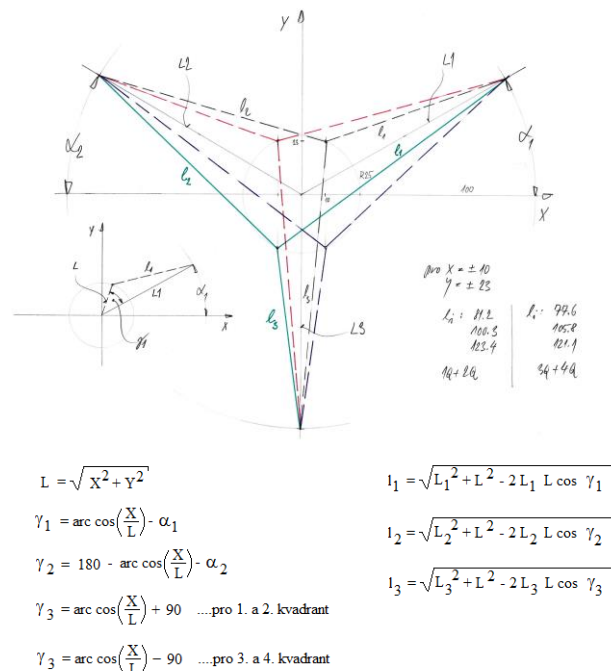


Bild 5 Transformation der Koordinaten in der Ebene

Das zweite Bild vervollständigt dann die grundlegende ebene Transformation mit einer Transformation, die den Einfluss der vertikalen Verschiebung der Massenaufhängung bei ihrer Ablenkung berücksichtigt.

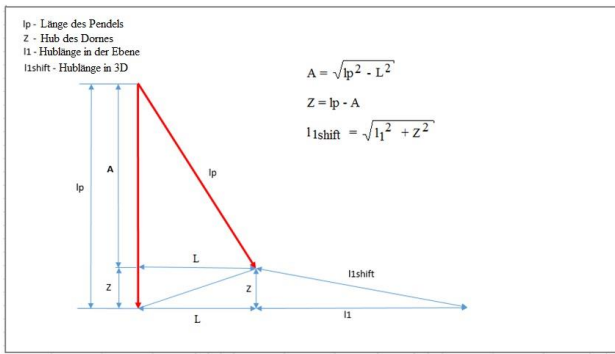


Bild 6 Transformation der Koordinaten im Raum unter Berücksichtigung des Einflusses der vertikalen Verschiebung der Massenaufhängung der Koordinaten in der Ebene

Die Ausgabe der Transformation sind die errechneten Hubfunktionen einzelner Servomotoren der Wicklungseinheiten der Seiten-Betätigungsseile, die durch die Eingangsdefinition der XY- Kurve des zu zeichnenden Musters der Geometrie der Anbringung der Wickeleinheiten gegenüber der Aufhängung entsprechen. Aufgrund der Notwendigkeit einer Softwareprüfung des Durchhangs oder Vorspannung einzelner Seiten-Betätigungsseile wurde auch die Funktion für die Rücktransformation geschaffen. Im Falle einer Abweichung zwischen der Soll- und Ist-Position der Aufhängung, beispielweise aufgrund einer geringen Verstärkung des Regelkreises oder der nicht standardmäßigen Bewegung einer der realen Achsen, wird die Bewegung der Skulptur gestoppt.

2.3 Steuerungsoftware des Funktionsmodells

Das Steuerungssystem des Funktionsmodells der Skulptur ist in einer Entwicklungsumgebung Omron - Sysmac Studio aufgebaut und ist in den Konfigurations- und den Programmteil verteilt.

Mit der Konfiguration wird die anfängliche Initialisierung von Referenzwerten des Systems, wie die Anzahl der ausgewählten/aktiven die Bewegung realisierenden Achsen, der Schritt der Filtration der Bewegungsdaten der Massenaufhängung, Referenz- und Ausgangspositionen einzelner Achsen, Definition der Parameter der realen Geometrie der Skulptur, Differenz der Rückkontrolle des Durchhangs der Seiten-Betätigungsseile, u. ä., gemeint. Teil der Initialisierung ist auch Füllung des Bewegungsdaten-Steuerfeldes mit den XY- Punktwerten des zu zeichnenden Musters und des die Position der Ausschubung/Einschiebung des Zeichendornes der Massenaufhängung definierenden Merkmals.

Der Programmteil wird unter Verwendung eines Zustandsdiagramms mit einer Definition von Zuständen und Bedingungen ihrer Übergänge entworfen. Das Programm State Control stellt Übergänge zwischen den Grundzuständen der Skulptur sicher (Init, PowerOff, PowerOn, Stop, Home, Jog, Data read, and Cam) und von ihm aus wird der Aufruf von Schlüsselfunktionen gesteuert. Das Hauptprogramm Motion Control erzeugt ein Feld einzelner

realen Achsen und steuert die virtuellen Master-Achsen (Refer, Position, Bewegung, Pause). Dies gewährleistet die volle Synchronisation und die einheitliche Steuerung, die beispielweise eine schnelle Pause aller Achsen durch die Verzögerungsrampe oder die Rückwärtsbewegung in einem Kollisionszustand in der Feinabstimmungsphase (Implementierung) ermöglicht. Reale Achsen werden durch den Aufruf von Standard-Befehlen gemäß der Bibliothek PLC Open (MC_PowerServo, MC_HomeWithParameter, MC_MoveJog, MC_SyncMoveAbsolute und MC_Stop) gesteuert.

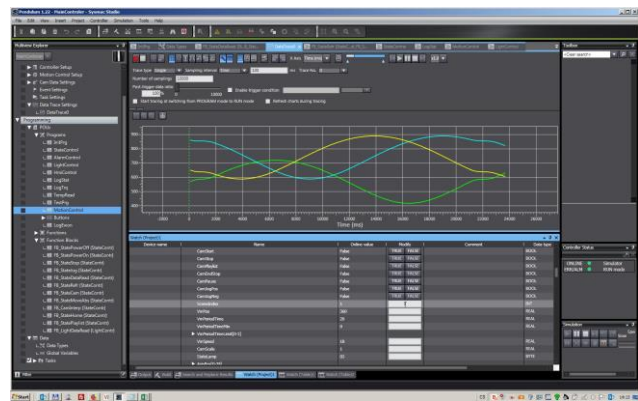


Bild 7 Sysmac Studio Entwicklungsumgebung, Aufzeichnung der Positionen einzelner Wickler von Seiten-Betätigungsseilen

Die Funktion MC_MoveLinearAbsolute löst die lineare Interpolation von zwei bis vier Achsen. Die Achsen werden zuerst in einer Gruppe verbunden und die Ausgangsposition wird ihnen definiert. Es folgt die Positionseinstellung für alle Achsen in der Gruppe. Diese Positionen werden als Feldvariablen eingegeben. Basierend auf den eingegebenen Geschwindigkeits- und Beschleunigungseingangsparameter bestimmt das System die Kombination des Übergangs zwischen der vorherigen und der nächsten Interpolationsoperation. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten des Durchgangs durch die Position. Die erste Option besteht darin, die Lage der Position auf Kosten des Stopps zu halten, die zweite Option bedeutet, die Kontinuität der Geschwindigkeit zu halten, jedoch für den Preis der Abweichung von der Soll-Position. Um Vibrationen und Schwingungen zu vermeiden, wird die Kontinuität der Geschwindigkeit für das Funktionsmodell der Skulptur bevorzugt. Die erste Situation ist in Bild 8 in dem linken Teil, hier ist die Einhaltung der Position und die Sprungänderung der Geschwindigkeit zu sehen. Die zweite Situation ist in dem gleichen Bild rechts, der Punkt P2 ist nicht erreicht, aber der Geschwindigkeitsablauf ist kontinuierlich [1].

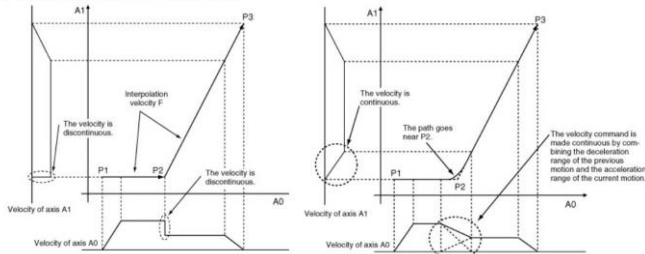


Bild 8 Ausüben der Bewegung MC_MoveLinearAbsolute

Die Geschwindigkeitskontinuität wird durch ein geeignetes Ersetzen der Rampe der Verzögerung und der Beschleunigung der vorhergehenden beziehungsweise aktuellen Bewegung erreicht. Das Ergebnis ist eine sanfte Bewegung der Aufhängung der Skulptur.

Ein separates Problem, das dieser Beitrag nicht löst, ist auch die Vorbereitung und Bearbeitung von Bilddaten des Originals für die eigene Musterzeichnung durch die Skulptur.

2.4 Steuerung des Funktionsmodells

Die Steuerung des Funktionsmodells der Skulptur ist mit dem Omron NA5-7W001 HMI Touchpanel (Bedienfeld) möglich. Auf dem Bedienfeld kann man die anfänglichen Grundpositionsinitialisierungen, Anzeigen der aktuellen Positionswerte der Aufhängung, Geschwindigkeiten und prozentuale Momentlast für einzelne reale Achsen einstellen. Aufgrund der nicht perfekten Ebenheit der Zeichenoberfläche wird das System durch eine Korrektur der vertikalen Position des Zeichendornes der Massenaufhängung ergänzt. Das Bedienfeld enthält auch eine Bewertung des eventuellen Alarms, seine Codemarkierung und die Möglichkeit, diesen Fehler rückzusetzen. Die Reihenfolge der Steuertasten im rechten Teil des Bildschirms ist dazu bestimmt, die Bewegung der Massenaufhängung zu starten und zu stoppen.

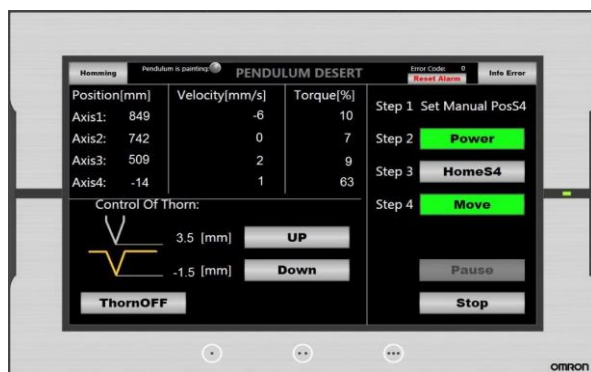


Bild 9 Bedienbildschirm des Skulptur-Funktionsmodells

2.5 Implementierung des Funktionsmodells

Das Funktionsmodell ist im Verhältnis 1:5 in Bezug auf die angenommene Größe der tatsächlichen Skulptur umgesetzt. Es besteht aus einem aus Holzprismen zusammengesetzten Hilfsrahmen, zu dem die Wickeleinheiten

der Seiten- Betätigungsseile und das eigene Festhalten der Massenaufhängung befestigt sind.

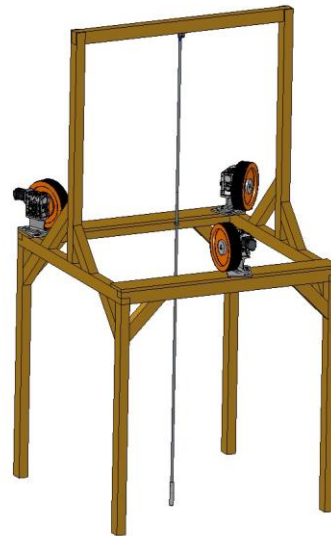


Bild 10 Modell der Skulptur

Dies wird mit einem Kugelszapfen gelöst. Als eine eigene Aufhängung wurde ein massives steifes Aluminiumprofil von Item angewendet, an dessen Ende ein den zukünftigen Glasbestandteil und den ausziehbaren Zeichendorn ersetzendes Gewicht installiert ist.

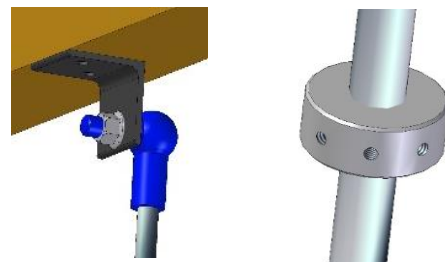


Bild 11 Modell der Befestigung der Aufhängung, der Seiten-Betätigungsseile

Dieses sollte bei der tatsächlichen Skulptur aus einem beständigen Material mit einer hochwertigen Linearführung und einer eigenen Antriebseinheit bestehen. Die Seiten-Betätigungsseile der Massenaufhängung sind am Drehring im unteren Drittel der Länge der Massenaufhängung befestigt und es ist möglich, sie in der vertikalen Richtung zu verstellen.

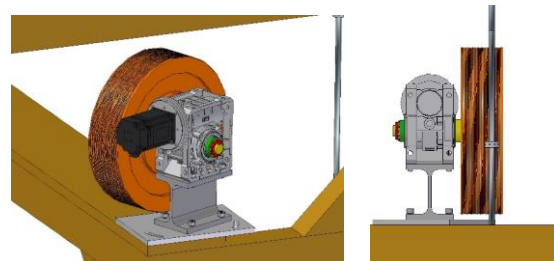


Bild 12 Modell der Wickeleinheit der Seitenseile

Die Enden der Seiten-Betätigungsseile sind auf Wickeleinheiten aufgewickelt, die aus einer Wickeltrommel mit einer Spiralnute, einem Getriebe und einem Servo-Antrieb mit Abmessung bestehen. Diese werden dann auf dem Tragrahmen des Modells der Skulptur installiert, der es ermöglicht, deren Anbringung zu modifizieren und dadurch auch die Geometrie zu verändern. So ist es möglich, das System für unterschiedliche Konfigurationen der geometrischen Position der Seiten-Betätigungsseile bzw. Wickler, nicht nur in der vertikalen sondern auch in der horizontalen Ebene, zu testen.

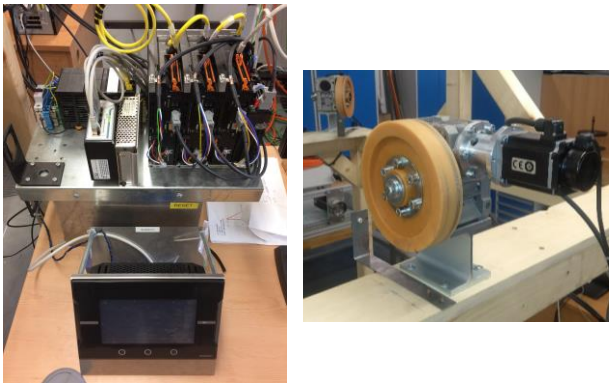


Bild 13 Steuer- und Versorgungselektronik, Detail der Wickeleinheit



Bild 14 Gesamtansicht des Funktionsmodells der Skulptur



Bild 15 Gezeichnete Muster

Nicht weniger wichtig ist die Problematik mit der Technologie des Zeichens der Muster mit einem Dorn auf ei-

ner Zeichenoberfläche, die aus einer Sandschicht besteht. In diesem Bereich spielen mehrere Faktoren zusammen eine Rolle, insbesondere die Endform des Dorns, dessen Neigung, die Versenkungstiefe in die Sandschicht und die Geschwindigkeit der Verschiebung. Andere Faktoren sind die Eigenschaften der Sandschicht, d.h. ihre Rauigkeit, Farbe und der Schlüsselparmeter scheint die Belichtung des zu zeichnenden Musters zu sein. Der Kontrast zwischen dem beleuchteten Teil und dem durch die Spur im Sand entstandenen Schatten spielt hier eine große Rolle. Diese erwähnten Parameter wurden schrittweise verfeinert, mit dem Ziel, die bestmögliche Qualität und Lesbarkeit der Details der Muster hinsichtlich der Zeitaufwendigkeit und der ruhigen Bewegung des Pendels zu erhalten. Aus diesen Gründen ist dies eine einzigartige Aufgabe, die auch weitere notwendige Schritte für die Wiederholbarkeit des Zeichnens erfordert. Die Sandschichtausrichtung, das automatische „Löschen“ der Muster, bevor ein neues Muster gezeichnet wird, können Beispiele dazu sein.

5 Zusammenfassung

Das Projekt beschäftigt sich mit der Lösung einer kinetischen Design-Skulptur, die optisch definierte Muster auf eine Unterlage einer bestimmten Dimension mit seiner Massenaufhängung zeichnenden klassischen „Pendel“ ähnelt. Nach der Grundbilanz der möglichen Prinzipien und eventuellen Realisierungsweisen wurde die Variante mit einer kleineren Konstruktions- und Herstellungskomplexität ausgewählt, jedoch mit der ausgeklügelten Steuerung. Diese Variante, genannt „Dreibeinstativ“ (Tripod), mit einem zentralen Stützrohr wurde die Grundlage für die Umsetzung eines funktionalen Skulptur-Modells. Das Modell wurde im Verhältnis 1:5 zu der angenommenen realen Größe der Skulptur konstruiert und hergestellt. Das Modell besteht aus einer Rahmenkonstruktion, drei Wickeleinheiten, Seiten-Betätigungsseilen und einer Massenaufhängung mit einem Beschrifter, einer Elektronik mit einer SPS-Steuerung und einem HMI-Bedienfeld. Am Modell wurden grundlegende regulatorische Prozesse, Transformationen abgestimmt und erste Tests durchgeführt. Das funktionelle Model der kinetischen Skulptur befindet sich also noch immer in der Entwicklungsphase und seine Fertigstellung erfordert auch zusätzliche Design-Modifikationen, Software-Änderungen und viel Test- und Tuning-Zeit.

6 Literatur

- [1] *Help, Sysmac Studio Ver. 1.23* [offline]. s. 1 [cit. 2018-08-06].