

INVERSE KINEMATIK & ROBOTIC
MATHEMATISCHER 3D GELENK-BAUKASTEN
SIMULATION FÜR ROTATIONS- & TELESKOPE-ACHSEN

by DIPL.-ING. NORBERT L. BRODTMANN
14.12.2019 Vers. 16_03

Controller Version 6.0

Der Simulations-Baukasten ist aus der Aufgabe entstanden,
anwenderorientiert und *Hardware neutral*
Rotations- und Teleskopachsen für Knickarm-Robotersysteme beliebiger Bauart & Geometrie
- ggf. auf Portal verfahrbar -
mathematisch zusammenzustellen, um deren Bewegungsbahn 3D zu simulieren.

MANUAL & "KOCHBUCH"

USER- UND SUPERVISOR INFORMATION

TUTORIAL

Unter gleichem Titel ist ein Tutorial erschienen.
Hier finden Sie Hintergrundinformation zu Problemen der Kinematik, theoretische Lösungsansätze und die Mathematik der Winkeltransformation. Für die Nutzung des Gelenkbaukastens ist es nicht unbedingt erforderlich, dieses zu lesen,
– es kann aber hilfreich sein! Mitunter wird ähnliches aus anderer Perspektive beleuchtet.

Systemüberblick

Der Baukasten ist aus der Aufgabe entstanden, **anwenderorientiert** und **Hardware neutral**

- Rotations- und Teleskopachsen für Knickarm-Robotersysteme beliebiger Bauart & Geometrie - ggf. auf Portal verfahrbar - mathematisch zusammenzustellen, um deren *Bewegungsbahn 3D zu simulieren*.
 - Eine gegebene Hardware hierzu produktspezifisch zu parametrieren oder
 - ein optimales Gesamtsystem durch Wahl geeigneter Komponenten zu konfigurieren.
- Gelenk-Winkel und XYZ-Koordinaten wahlweise *direkt* oder *invers* zu berechnen und das Roboter-System im 3D-Raum zu visualisieren.
- Voll kompatibel zur 8-Achsen Bahnsteuerung RoBo-mac's berechnet der Gelenk-Baukasten 12 Achsen mit jeweils 2 Freiheitsgraden (Teleskop-Dreh-Achse). Der Algorithmus ermöglicht beliebig viele kaskadierbare Achsen und ist somit erweiterbar.
- Das Ergebnis steht numerisch (16-stellig / Fließkomma 15 Ziffern) zur Verfügung und wird ergänzend als *3D Grafik* visualisiert.

Direkte Kinematik

Die kinematischen Grenzen werden durch Parametrierung der Achs-Längen, ihrer XYZ-Grundorientierung und der max. Achs-Drehwinkel definiert. An- und Abtrieb jedes Gelenkes kann unter beliebigem Winkel im Raum stehen. Die Werte werden über Schieber verändert und Real-Time visualisiert.

Inverse Kinematik

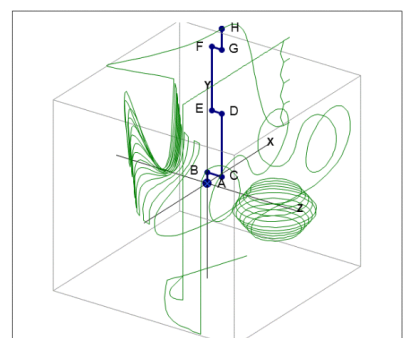
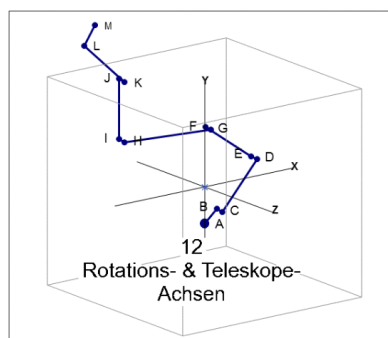
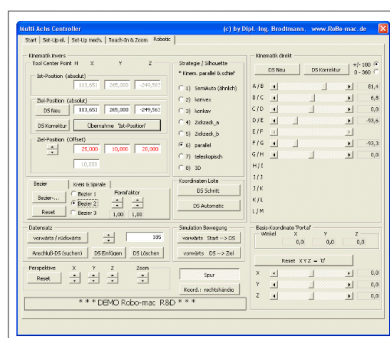
Um trotz Überbestimmung aus theoretisch unendlich vielen Winkel-Kombinationen möglichst geeignete Vektorlagen der Roboterarme zu berechnen verfolgt RoBo-mac mehrere, frei wählbare Bewegungsstrategien. Der Algorithmus basiert auf trigonometrischen und iterativen Elementen. Er arbeitet unabhängig von der Vorwärts Kinematik und nutzt diese für die Ergebnis-Visualisierung sowie die Positionskontrolle.

Die absoluten Positionierfehler Soll/Ist des "End-Effektors" bzw. Tool Center Points (TCP) liegen unter 1/10.000 mm, meist in einer Größenordnung von 10^{-5} bis 10^{-6} mm.

Bahngenerator

Ein interaktiver Bahngenerator erzeugt individuelle Bewegungsbahnen.

Der Baukasten beherrscht Kreise, zylindrische & archimedische Spiralen sowie 3D Bézier-Kurven.



Kartesische Koordinaten und Roboter Kinematik

Legen wir ein Blatt Papier auf den Tisch und zeichnen mit dem Bleistift ein Achsenkreuz – wir können dies auch mit einem CAD-System am Bildschirm tun – so hat der Kreuzungspunkt per Definition die Bezeichnung "0 / 0". X- und Y-Wert sind also beide gleich "0".

Dieser Kreuzungspunkt liegt in einem willkürlichen Versatz zum Papier- bzw. Bildschirmrand, Bildschirm bzw. Papier befinden sich in willkürlichem Abstand und Winkel zum Schreibtischrand, der Schreibtisch steht irgendwo im (Büro-) Raum usw.

- Jeder dieser Gegenstände hat eine Bezugskante, von der üblicher Weise gemessen wird. Und, jeder dieser Gegenstände wird von einem anderen "umhaust", - er hat relative Koordinaten zu dieser Umhausung. Eingebettet ist das System relativer Koordinaten in das Weltkoordinatensystem, auf das allerdings nur selten referenziert werden muß.

Wenn wir vor der Aufgabe stehen, daß ein Roboter gezielt irgendwo hingreifen oder eine Bewegungsbahn fahren muß, müssen wir den Zielpunkt in einem (kartesischen) Koordinatensystem erfassen auf das auch der Roboter-Fußpunkt referenziert. Während das Kartesische System achsparallel ohne Winkelwerte arbeitet sind Winkelwerte, - kaskadisch aneinander gereiht - der einzige Bezug zwischen Roboter-Fußpunkt und dem "End-Effektor / TCP"; dem Teil, das bewegt und in Position gebracht werden soll (vgl. Bild oben mitte, Pkt. "M").

Drehwinkel werden in Grad gemessen – so haben wir es in der Schule gelernt! Ein Vollkreis hat 360° (Grad) – und das hat sich eingepreßt, wenngleich es andere Maß Systeme der Winkelmessung gibt: In der Geodäsie wird der Vollkreis mit 400 Gon (Neu-Grad) gemessen. Die RoBo-mac Algorithmen arbeitet intern im "Bogenmaß"; ein Vollkreis hat den Winkelwert " 2π " – was nicht ganz zufällig dem Kreisumfang bei Radius = 1 entspricht!

Eine Achse kann sich beliebig oft um sich selbst drehen. 2 Umdrehungen entsprechen im (Alt-) Gradsystem einem Drehwinkel von 720° . Mathematisch ist dies unproblematisch, mechanisch ist eine Roboterachse - zumindest bei Gelenk- bzw. Knickarmrobotern - jedoch auf meist eine Vollkreisdrehung – manchmal etwas mehr – beschränkt. SCARA haben meist eine größere Freiheit. Gemeinsam ist diesen Systemen, daß nach Erreichen des maximalen Drehwinkels "zurückgedreht" werden muß. Robotersysteme haben somit zwischen beiden Endlagen einen *Nullpunkt*, der meist als symmetrisch mittig definiert wird. Sind alle Arme gestreckt, so steht das System in "Null-Stellung" (vgl. Bild oben rechts).

Per Definition referenziert jede Drehung eines Armes auf die Stellung des (kaskadisch vorhergehenden) Armes. Gemessen wird der Winkel zwischen den jeweils benachbarten Armen. Eigentlich beträgt der Winkel zwischen gestreckten Armen 180° (im 0° bis 360° System); da andererseits die Streckstellung aller Arme als "Null-Stellung" bezeichnet wird, macht es Sinn, den Bezugspunkt in diese Position zu legen. Das Bezugssystem ist dann als $\pm 180^\circ$ System definiert.

Auf unsere Aufgabe bezogen, den Roboter gezielt "irgendwo" hingreifen zu lassen, bedeutet dies, das "Irgendwo" kartesisch zu definieren und den Roboter im kartesischen System geeignet zu positionieren, den Rest übernimmt der

MATHEMATISCHE 3D GELENK-BAUKASTEN

Mathematischer 3D Gelenk-Baukasten (β-Version)

Themenübersicht:	Seite
• Systemüberblick	
- Direkte Kinematik	1
- Inverse Kinematik	1
- Bahngenerator	1
• An Stelle eines Vorworts	
- Kartesische Koordinaten und Roboter Kinematik	2
• Allgemeine Information	
- Erst-Installation & Lizenz Varianten	5
- Sicherheitshinweis	6
- Bedienerhinweise zur β-Demo	6
- Performance & Kompatibilität	6
- Controller- & Daten-Modul	6
• Funktionsüberwachung und Fehlermeldung	
- EXCEL Fehlermeldung	7
• Hardware konforme Parametrierung	7
• Die ersten Schritte	
- Für Ungeduldige	8
- Für Lernwillige	8
• Bildschirm- und Maskenaufbau	
- Bildschirm	9
- Maske 'Robotic'	9
- Bedienerhinweise	9
- Koordinaten & Datensatz-Liste	13
• Bahnsteuerung	
- CAD Import	14
- Interaktiver Bahngenerator	14
- Bewegungsstrategien	15
- Bézier-Kurven & Bahngenerator	16
- Positionierung & Orientierung	18
- Senkrechte- / Horizontale- & Bézier Orientierung	19
- Kombinierte Portal & Knickarm Robotik	19
- TCP Spur	19
- Positionierfehler & Watchdog	19
• Kinematische Bewegungsebenen	
- Parallel- und Schief Kinematik	20

Supervisor-Information

- Parametrierung & Werks-Reset 21
- Parameter & Datenkonformität 23
- Nur für Experten 24
- Information zum aktuellen Release-Stand 25

Anhang

- "Kochbuch" Inverse Kinematik A 1
 - eine Rezeptesammlung "Schritt für Schritt"
 - Bewegungsübung Direkte & Inverse Kinematik A 1
 - Perspektive und 2D-Projektion A 2
 - Bahngenerator A 3
 - Singularität A 4
 - Orientierung A 5
 - Rückwärtsfahrt A 7
 - Bahngenerator 3D-Bézier Kurven A 8
 - Bahngenerator Kreise & Spiralen (Automatic Mode) A 9
 - Daten-Import & Freie Kreiswahl (Dialog Mode) A 10
 - Vorschau & 3D-Orientierung A 11
 - *Labyrinth von Chartres* A 13
 - Daten Import & Automatic-Bahn A 17
- Ei-Ablage,
 - ein Gedankenexperiment und praktische Kinematik A 19

Impressum

Herausgeber und CopyRight

Dipl.-Ing. Norbert L. Brodtmann
CNC & RoBo-mac
Sattler Str. 16
D 33428 Marienfeld, Germany
Tel. 05247 / 7070 083 Fax ... 085

Feedback & Kritik

sind mir herzlich willkommen.

- Diese Information wird in unregelmäßigen Zeitabständen aktualisiert und fortgeschrieben.
Die jeweils aktuelle Version erhalten Sie im Download:
<http://www.cnc-mac.de/html/download.html>
- Einen Leistungsüberblick in Kürze gibt das Video:
<https://www.youtube.com/watch?v=MJbAxZ3luio>

Erst-Installation & Lizenz Varianten

Das Programm prüft beim Starten, ob es auf dem aktuellen Rechner bereits installiert wurde und informiert Sie über Ihren aktuellen Lizenzstatus.

- Falls das Programm bereits lizenziert ist, können Sie sofort weiterarbeiten.
- Falls es sich um eine Erst-Installation auf Ihrem Rechner handelt, erhalten Sie die Möglichkeit das Programm vor Lizenzierung 7-tägig kostenlos zu testen. Falls Sie dies nicht möchten, wird keine Testversion initialisiert, das Programm schließt automatisch.
- Falls Sie sich in der kostenlosen Testphase befinden, können Sie das Programm (nahezu) vollständig nutzen. Unmittelbar nach Programm-Start wird Ihnen empfohlen eine Lizenz zu beantragen, wenn Sie dies wünschen führt Sie ein Lizenz-Assistent durch die Lizenzierung. Sie erhalten eine Hardware gebundene Einplatzlizenz; mehrere Lizenzvarianten stehen zur Wahl:

Lizenzvarianten:

Kostenlose Testversion 7-Tage

- Version bietet volles Leistungsbild,
 - jedoch wird Arbeitsergebnis weder gespeichert noch ausgedruckt.
- nach Ablauf der Test-Zeit wird nur noch zur Lizenzierung aufgefordert,
 - jedoch das eigentliche Programm nicht mehr aufgerufen.

Limited-Version

- Laufzeit unbegrenzt
- Arbeitsergebnis wird gespeichert
 - jedoch nur "limitiert" ausgedruckt (10 Datensätze).

Professional-Version

- Laufzeit unbegrenzt
 - Arbeitsergebnis wird voll gespeichert bzw. ausgedruckt.
 - (1.000 Datensätze je "Arbeitsblatt").
- Ausdrucke erhalten "Firmen-Name des Lizenznehmers"
- Winkelwerte stehen numerisch (16-stellig / Fließkomma 15 Ziffern)
 - als "Copy & Paste" zu Verfügung.

UpGrade

Sie können ggf. auch zu einem späteren Zeitpunkt ein UpGrade beantragen.

UpDate

Ihre Lizenz beinhaltet einen lebenslangen kostenlosen UpDate-Service. Laden Sie von der Website www.RoBo-mac.de die jeweils aktuelle Version (auch bereits zum Test) herunter.

Freie Weitergabe an Dritte

Jede dieser Versionen kann beliebig kopiert, auf einem weiteren Rechner installiert oder an Interessenten weitergegeben werden, sie installieren sich dort als "Kostenlose Testversion".

Sicherheitshinweis

Diese β -Demo-Version ist direkt aus dem Entwicklungsprojekt abgeleitet,

- sie arbeitet unter Windows[®] ab Version XP und Excel[®] ab Version '97.
 - sie hat noch kein Sicherheitszertifikat. Je nach Release-Stand Ihrer PC Software werden Sie ggf. vor der Demo-Version gewarnt und aufgefordert, das Programm nicht zu nutzen.
- Als Herausgeber dieser Simulationssoftware bestätige ich, daß sich im Quellcode keinerlei Schad-Software befindet und die Entwicklungsmaschinen mit einem aktuellen Viren-scanner (Bitdefender) ausgerüstet sind.
- Die vorliegende β -Version ist ausgiebig getestet, trotzdem sind "Laufzeitfehler" nicht auszuschließen. Sollte ein solcher bei Ihnen auftreten, so wäre ich dankbar, wenn Sie die XLS-Datei in diesem "Fehler-Zustand" abspeichern und mir per Mail zukommen ließen.

Bedienerhinweise zur β -Demo

- Diese β -Demo-Version arbeitet mit einer Bedienermaske, die z.Z. im Freigabetest ist. Sie basiert strukturell auf den Masken des
CNC & ROBO-MAC MULTI-ACHS-CONTROLLERS
Interpolierende Bahnsteuerung für Servos und Stepper,
arbeitet hiervon aber unabhängig.
- In dieser Demo haben die Masken 'Set-Up el. / Set-Up mech. / Teach-In & Zoom' informativen Charakter. Sie arbeiten im Hardware-losen Demo-Mode der 8-Achsensteuerung.

Performance & Kompatibilität

Der mathematische 3D Gelenk-Baukasten läuft unter Excel ab Version '97/2003. Er nutzt dessen mathematische Mächtigkeit und die VBA-Programmsteuerung.

Mit Excel, Version 2007 führte Microsoft grundsätzliche Veränderungen ein, hierdurch werden grafische Funktionen deutlich langsamer abgearbeitet.

Die Visualisierung des Roboterarmes 'auf Schieberbewegung' läuft in den in den älteren Versionen '97 bis 2003 in 'Real-Time', ab Version 2007 sprunghaft mit Verzögerung.

Sie können die sprunghafte Bewegung der Visualisierung vermeiden, wenn Sie den Schieber nicht direkt nutzen.

Clicken Sie für Winkelbewegungen

- (Inkrement: 0,1 Grad) auf die 'End-Pfeile' oder
(Inkrement: 1,0 Grad) in den Bereich zwischen Schieber und End-Pfeil.
Bei Dauer-Click führt dies in eine kontinuierliche Bewegung.

Controller- & Daten-Modul

Das Programm arbeitet ab Vers. 5.0 mit 2 getrennten Modulen, um das Gesamt "Datei-Volumen" zu optimieren. Die Module können in beliebigen Verzeichnissen (Ordner) installiert werden.

- Das Controller-Modul (XLA-Datei) beinhaltet Berechnungsalgorithmen sowie die Masken- und Funktionssteuerung. Es wird insgesamt nur einmal installiert.
- Die Projektdaten (Hardware Parametrierung und Bewegungsbahn) werden in eigenständigen Daten-Modulen (XLS-Datei) verwaltet. Je Projekt sollte eine eigene Datei angelegt werden.

- Zeitgleich darf ein Daten-Modul geladen und aktiv sein (Makro aktiviert), zu Vergleichszwecken können Sie jedoch weitere Projekt-Dateien inaktiv laden (Makro nicht aktiviert).

Funktionsüberwachung und Fehlermeldung

Controller- & Daten-Modul kontrollieren gegenseitig, ob das jeweils andere geladen ist und fordern ggf. hierzu auf.

- Rufen Sie Daten & Controller-Modul in möglichst dieser Reihenfolge auf.
Falls Sie als erstes das Controller-Modul aufrufen, erhalten Sie "nach der Begrüßung" eine Fehlermeldung, da das Daten-Modul noch nicht geladen ist. Bestätigen Sie mit OK und laden Sie sodann das Daten-Modul.

Während jeder Arbeitssitzung überwachen Algorithmen im Hintergrund Ihre Eingaben auf Plausibilität und geben ggf. Korrekturhinweise. Falls ein Zielpunkt nicht berechenbar oder kinematisch nicht erreichbar ist, wird eine Fehlermeldung generiert – oftmals verbunden mit Korrekturempfehlungen.

EXCEL Fehlermeldung

"Externer Bezug fehlerhaft" (versionsabhängig "so oder so-ähnlich").

- Sie erhalten diese Start-Fehlermeldung normaler Weise nicht, sondern nur, wenn das Simulationsprogramm zuvor nicht "*ordentlich*" beendet wurde (Systemabsturz).
- Klicken Sie "Nicht automatisch korrigieren".
Sobald Daten- und Controller-Modul geladen sind, synchronisieren sie sich gegenseitig.
- Sollten Sie weiterhin Fehlermeldungen dieser Art erhalten, so laden Sie bitte von der Download Seite <http://www.cnc-mac.de/html/download.html> ein "frisches"- Programmpaket; Ihr Lizenzcode behält volle Gültigkeit.

Parametrierung

Die Roboter-Mathematik dieses Baukastens ist entsprechend Ihrer mechanischen Roboter-Hardware individuell parametrierbar.

- Per Button '*Parameter*' rufen Sie den Zugang zu diesem Datenbereich auf. Das Kapitel *Supervisor-Information* zeigt, wie der 3D Gelenk-Baukasten entsprechend der Mechanik-Struktur Ihres Gelenkarmroboters und seiner Maße parametriert wird, so daß die Roboter-Mechanik mathematisch paßgenau simuliert wird. Die Positionierfehler liegen dann mathematisch in einer Größenordnung von 10^{-5} bis 10^{-6} mm - und dies ist gewiß eine Herausforderung an die Robotermechanik!
- Restriktion:
Punkt H (Abtrieb Handgelenk)
 - wird in dieser β -Version als Tool Center Point (TCP) errechnet
 - ist *derzeit* noch fest parametriert.

vgl. hierzu *Supervisor-Information* und *Information zum aktuellen Release-Stand*.

Die ersten Schritte

Wenn Sie sich in die Thematik einarbeiten, werden Sie recht schnell zu dem Schluß kommen:

- Der Gelenkbaukasten bietet kinematische Bewegungsmöglichkeiten die zu beherrschen einige Erfahrung erfordert. Es ist wie beim Klavierspielen: Das Instrument wird vom Pianisten zum Leben erweckt! Und hier macht Übung den Meister.

Üben Sie, Sie können nichts kaputt machen, der Baukasten ist sehr bedien-tolerant. Ich habe bei der Entwicklung hohen Wert auf "Bediener-Komfort" und darauf gelegt, "*Bedienungsfehler*" (*grausame Ausrede inkompetenter Entwickler*) automatisch abzufangen. Vieles von dem was Sie tun überprüft ein Algorithmus im Hintergrund auf Plausibilität – und meldet sich! Stöbern Sie!

Für Ungeduldige

- Die Datei "Demo-Arm" zeigt (nach Initialisierung der kostenlosen Test- und Demo Version) einen Bewegungsablauf.
- Klicken Sie in der Grafik (oben links) '*Control-Center*' eine Maske erscheint;
 - klicken Sie (Maske mitte unten) "Simulation Bewegung / vorwärts";
der Arm fährt eine Bewegungsbahn, deren Spur zu- und abschaltbar ist.
 - Die Bewegungsrichtung läßt sich umkehren (etwas weiter links):
Rasttaste "vorwärts / rückwärts".

Weitere Info: 'Bildschirm- und Maskenaufbau'

Die Datei "Demo-Arm_schief" ist Beispiel einer komplexen Inversen Kinematik *mit in sich gedrehtem Arm*. Die Bewegungsebenen der Achsen liegen zu einander *schief* (vgl. Kinematische Bewegungsebenen / *Schiefe* Bewegungsebenen sowie Tutorial).

- Strategie-Demo
verlassen Sie das '*Control-Center*'. In der 3D Grafik (oben rechts) finden Sie den Button 'Demo-Menü'. Die Demo-Beispiele zeigen mögliche Bewegungs-Strategien – und geben einen Einblick in die Problematik kinematischer Überbestimmung. Mehr hierzu vgl. S. 12.

Für Lernwillige

- führt dieses Handbuch Schritt für Schritt durch die Möglichkeiten des 3D Gelenk-Baukastens. Sie finden eine Vielzahl von Möglichkeiten eine Bewegungsbahn selbst zu generieren oder aus einem CAD-System zu importieren.
- Ein "Kochbuch" im Anhang zeigt (hoffentlich) praxisorientiert, wie die Demo-Datei generiert wurde. Zu Maskenfunktionen finden Sie ein "wie, warum und wozu"!

Über die "normale" Knickarm-Robotik hinaus beherrscht der Programm-Algorithmus
- in der Länge veränderbare Teleskop-Achsen sowie
- kombinierte Portal & Knickarm Robotik

- Parametrierung
Die Roboter-Mathematik dieses Baukastens ist entsprechend der mechanischen Roboter-Hardware individuell parametrierbar; mehr hierzu im Kapitel *Supervisor-Information*.

Bildschirm- und Maskenaufbau

➤ Bildschirm oben links

Grafik: Stilisierte Armstellung im 3D-Raum.

Der 3D-Raum ist kontinuierlich zwischen Maus & Vogelperspektive einstellbar. Die Einstellung hat keinen Einfluß auf die Berechnung.

- In der Grafik oben links der Button 'Control-Center', der die Maske aufruft.

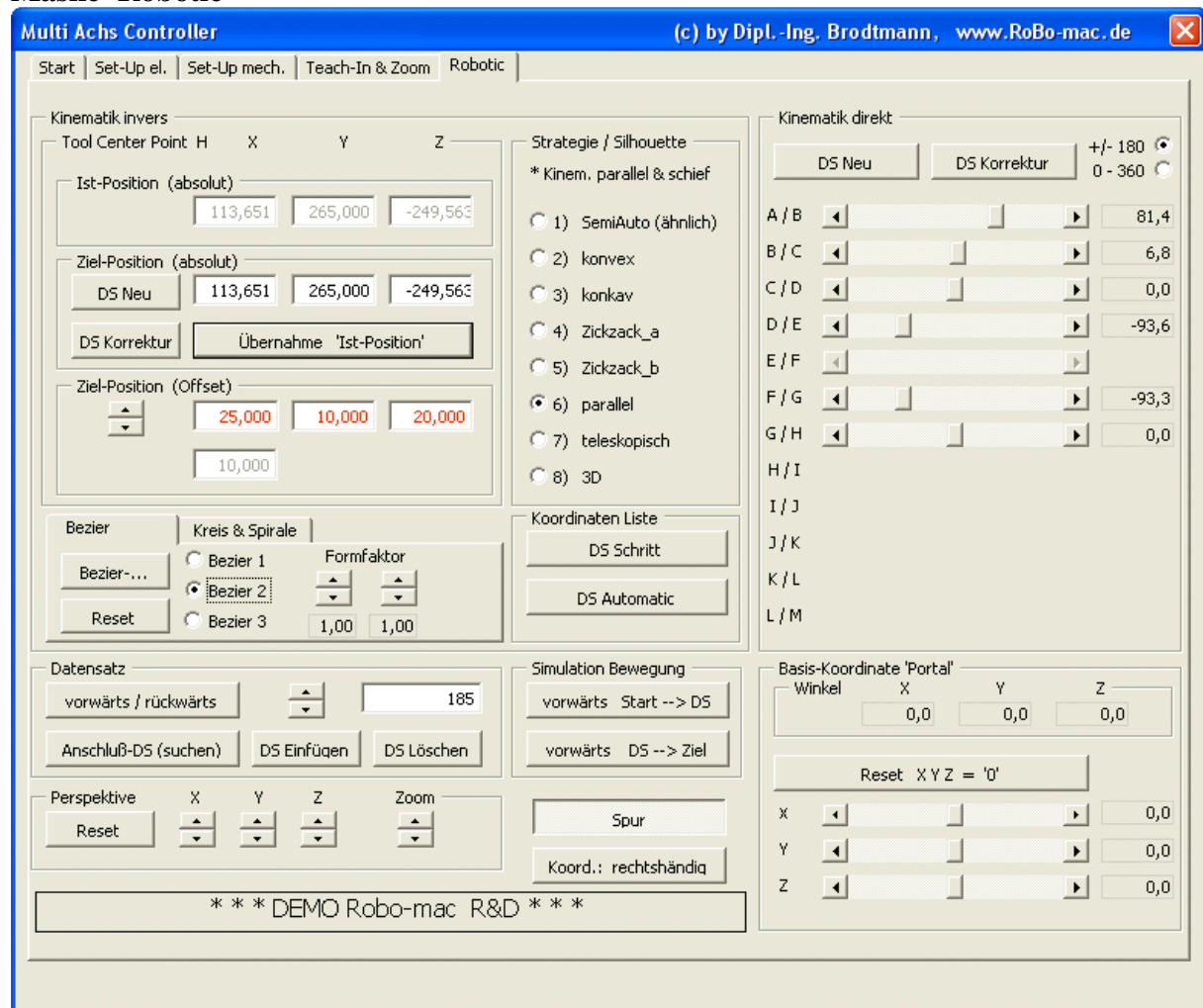
➤ Bildschirm oben rechts

ganz oben *Perspektiv-Schieber*, darunter die *aktuellen XYZ Koordinaten* aller Gelenke.

➤ Bildschirm unten links / rechts

Kinematische Bewegungsdaten

Maske 'Robotic'



Bedienerhinweis

Sprachumschaltung Maske 'Start' (derzeit Deutsch / English, weitere Sprachen möglich).

Die Maske 'Robotic'

mag zunächst "erschlagend" wirken, ermöglicht jedoch ohne Maskenwechsel nahezu alle kinematischen Funktionen und Befehle:

- Direkte (vorwärts) Kinematik,
 - Berechnung der XYZ-Koordinaten des TCP aus Winkelstellung der Knickarme
- Inverse (rückwärts) Kinematik
 - Berechnung der Knickarm-Winkelstellung aus vorgegeben XYZ-Koordinaten des TCP
- freie, interaktive Off-line Entwicklung einer Bewegungsbahn aus
 - linearen, Kreis- & Spiral-Elementen sowie 3D-Bézier Kurven.
- automatische Transformation einer extern vorgegeben Bewegungsbahn
- 8 frei wählbare Bewegungsstrategien der Knickarme
- sowie die Möglichkeit, Knickarm Roboter zusätzlich auf XYZ-Portal zu verfahren.

Last not lease

- 3D-Visualisierung der Roboter Knickarme und einer Bewegungsspur des TCP aus frei wählbarer Maus- bis Adler-Perspektive.

Auch dieses Leistungsspektrum mag "erschlagen"; wir betrachten es schrittweise. Zunächst den Maskenaufbau. Grundsätzlich gilt: Sie können nichts kaputt machen – probieren Sie!

Die Maske zeigt 3 Säulen,

links: *inverse* Kinematik & Bahngenerator, rechts: *direkte* Kinematik, mitte: Zusatzfunktionen

- *Kinematik invers* links oben
 - alle Werte dieses Blocks beziehen sich auf den TCP (Tool Center Point).
 - Die aktuelle Ist-Position wird im XYZ-Koordinatenfenster (ganz oben) angezeigt.

Linear

- Ziel Position (absolut).
Der Wert wird im XYZ-Koordinatenfenster eingegeben.
Falls sinnvoll, kann der Ist-Wert zuvor ins Ziel-Feld kopiert (Übernahme 'Ist-Position') und danach geändert werden. Wahlweise wird diese Ziel Position als Neuer Datensatz (*DS Neu*) hinzugefügt oder der aktuell gewählte Datensatz korrigiert (*DS Korrektur*).

Die Achs-Winkelwerte werden hieraus OnLine errechnet und dem aktuellen Datensatz (s.u.) hinzugefügt.

- Ziel Position (Offset).
Der Offset bewegt den TCP - bezogen auf seine aktuelle Position - stets um den gleichen Wert mit den Doppelpfeil-Tasten wahlweise vorwärts / rückwärts. Er ist entweder
 - als kartesischer Zielwert (XYZ) *oder*
 - als Vektor-Hub führ in eine teleskopartige 'Unter-Arm'-Bewegung definierbar.Der aktive Offset färbt sich 'rot'.

Kurve

- Bézier / Kreis & Spirale (ab Controller-Version 5.6)
Die Bedienerführung wählt aus 2 recht ähnlichen LayOuts.

Ein jeweils einzelner 'Button' führt bei beiden Bahnkurven durch die Prozeßschritte. Die Bahn Stützpunkte werden zunächst errechnet, die Bahn als 3D Vorschau zur visuellen Kontrolle / Korrektur gezeigt und nach Freigabe die Armbewegungen in Inverser Kinematik aktiviert.

3D-Bezier

Die Bézier 3D Funktion verbindet zwei getrennte (lineare Teleskop-) Bahn-Segmente beliebiger Vektorlage mit den "weichen Übergängen" einer 3D-Bézier Kurve. Der Generator schlägt 3 Bezier Lösungen zur Auswahl 'per Click' vor. Diese können "so wie sie sind" akzeptiert oder per Doppelpfeil individuell gestaucht bzw. gestreckt werden.

Der Kreis & Spiral Generator

kennt 3 Modi: Kreise oder Spiralen (archimedisch, zylindrisch bzw. deren Kombination) sind frei parametrierbar. Sie schmiegen sich entweder tangential an (Mod. 1) oder sind im 3D-Raum frei positionierbar (Mod. 2). Per Doppelpfeil können sie wahlweise um ihren Mittelpunkt oder den peripheren Tangentialpunkt gedreht /orientiert werden. Modus 3: Aus einer Datenliste der Segment-Eckpunkten werden die Kreisbahn Stützpunkte berechnet; das ist das Beispiel "Labyrinth von Chartres".

- *Datensatz* links (nicht ganz) unten
wählen Sie den zu bearbeitenden Datensatz mit seiner Ordnungs-Nr. oder den Pfeiltasten. Falls bereits mehrere Datensätze vorhandenen sind und Sie den letzten einer Liste aufrufen wollen, klicken Sie 'Anschluß DS (suchen)'. So Sie einen vorhandenen aus der Liste löschen oder einen zusätzlichen einfügen wollen, klicken Sie: 'DS Neu' / 'DS Löschen'. Es kann sinnvoll sein, die Anfahr-Koordinaten eines Zieles vom Ziel aus gesehen "rückwärts" zu entwickeln. In der Praxis können hierbei zunächst 2 getrennte Bewegungsfragmente (Start-Fragment / Ziel-Fragment) entstehen, die es zu schließen gilt. Die Rast-Taste 'vorwärts / rückwärts' wählt in Zusammenarbeit mit 'Anschluß DS (suchen)' das entsprechende Fragment und dreht die Suchrichtung im 'Ziel-Fragment' um.
- *3D-Perspektive & Zoom* links (ganz) unten
wählen Sie mit den Doppelpfeil-Tasten die 3D-Perspektive. Der Knopf 'Reset' führt aus "unglücklichen" Perspektiven zurück in eine klassische 3D-Perspektive.

Parallel hierzu zeigt das Daten-Modul im Info-Feld – oben rechts neben der Grafik – die gewählten Perspektivwinkel numerisch.

- Bei nicht aktivem Control-Center sind die Schieber des Info-Feldes aktiviert.

Ab Version 5.7 kann das rechtshändige Koordinatensystem (Z-Achse zeigt vorwärts aus der Zeichenebene) in ein linkshändiges 'gespiegelt' werden (Z-Achse zeigt nach hinten). Beachten Sie bitte:

Die Umschaltung der perspektivischen Darstellung hat auf die kinematischen Berechnungen keinerlei Einfluß. Diese '*Spiegelung*' dient lediglich der optischen Anpassung an die perspektivische Erwartung. Merke: '*Spiegelung*' ist nie durch '*Drehung*' erreichbar!

-
- *Bewegungsstrategie / Silhouette* Mitte oben
Mehreren Bewegungsstrategien stehen zur Auswahl. Beispiele, wie diese Strategien arbeiten, finden Sie im Makro-Menü unter "Strategie-Demo...". Die gewählte Bewegungsstrategie bestimmt den Algorithmus der inversen Kinematik.
 - Klicken Sie eine Strategie Ihrer Wahl. Im oberen Fenster-Bereich erscheint eine Info, ob diese für Parallel Kinematik, Schief Kinematik oder beide geeignet ist (vgl. Tutorial).
 - Ein Wechsel zwischen den Bewegungsstrategien ist jederzeit möglich.
 - Die Strategien 6 und 7 erzeugen ab Handgelenk-Punkt lineare Bewegungen und somit konstante Orientierung der Abtriebs-Achse.

 - *Koordinaten Liste* Mitte 'mittig'
Die Liste extern erzeugter XYZ Koordinaten des TCP wird - entsprechend der Bewegungsstrategie - in die Winkel der Knickarme transferiert; schrittweise oder automatisch für die gesamte Liste.

 - *Simulation Bewegung* Mitte (nicht ganz) unten
Die Bewegungssimulation visualisiert im zügigen Durchlauf die einzelnen Datensätze. Die bereits bekannte Rasttaste 'vorwärts / rückwärts' bestimmt die Laufrichtung:
Vorwärts: Start-Punkt bis zum aktuellen Datensatz / aktueller Datensatz bis Zielpunkt
Rückwärts: In umgekehrter Richtung.

 - *Spur* Mitte (ganz) unten
Die Bewegungsspur des TCP läßt sich per Rasttaste zu/abschalten. Angezeigt wird die Spur zwischen Startpunkt und dem (beim Klicken der Taste) aktuellen Datensatz. Sie kann über die Tasten 'Simulation Bewegung' bzw. die Befehlsgruppe 'Datensatz' mit den Doppelpfeil-Tasten frei durchlaufen und so ein gesuchter Datensatz visuell gefunden werden. Mit Aufruf der Maske wird die Spur aktiviert – und kann ggf. abgeschaltet werden.

 - *Stop* Mitte (ebenfalls ganz) unten
eine 'Stop-Taste' erscheint, sobald *Simulation Bewegung* oder *Koordinaten Liste automatisch* gewählt ist. Die Funktion bricht ab, der Datensatz wird zum aktuellen Datensatz.

 - *Kinematik direkt* rechts oben
Dieses Feld zeigt Winkelschieber für 12 Achsen (A/B bis L/M) sowie den aktuell eingestellten Winkelwert, wahlweise im 0-360° oder -180° / +180° System. Nur die Schieber, die im Rahmen der Parametrierung aktiviert wurden, sind aktiv.
Die *direkte* Kinematik dient in erster Linie dazu, eine "vernünftige Startposition", die Orientierung des TCP-Trägerarmes als Ausgangspunkt der *inversen* Kinematik oder auch Stützpunkte zur Umfahrung eines Hindernisses manuell zu bestimmen. Man braucht sie selten, aber man braucht sie. Vieles ist hier *Sisyphus & Try and Error*.

Ist in '*Direkter Kinematik*' eine Winkelposition gefunden, so kann sie der Datensatz-Liste über den Button 'DS-Neu' bzw. 'DS-Korrektur' (s. unten) direkt zugeführt werden.

Hat nach dem Gesetz der größten Gemeinheit Murphy zugeschlagen und die Knickarme

stehen völlig daneben, so können die Schieber mit den *Doppelpfeil-Tasten des Bereiches Datensatz* auf die Werte des List-Datensatzes synchronisiert werden.

- *Basiskoordinate Portal* rechts unten
Koordinaten und Winkel-Berechnungen referenzieren auf den Achs-Fußpunkt XYZ. Komplexe Robotersysteme arbeiten mit verfahrbarem Fußpunkt auf XYZ-Portal. Der Algorithmus *inverser* Kinematik berücksichtigt bei der Knickarm Berechnung die in '*Direkter Kinematik*' vorgewählte Portal-Kordinate.

Die Verschiebung der Basiskoordinaten ermöglicht es auch, eine feste Fußpunkt Position entsprechend den kinematischen Möglichkeiten der Roboter-Mechanik zu optimieren.

- *Button 'DS Neu' & 'DS Korrektur'*
Sie finden diese Funktionen in den Bereichen *inverse* sowie *direkte* Kinematik. Per 'DS Korrektur' ändern Sie den aktuellen Datensatz, 'DS Neu' generiert einen zusätzlichen Datensatz am aktiven Ende eines Datensatz-Blocks.

Unter Sicherheitsgesichtspunkten ist 'DS Neu' de-aktiviert, sobald der aktuell gewählte Datensatz sich *nicht* am Block-Ende befindet; gleichsinniges gilt für die Offset Doppelpfeil-Tasten. Wollen Sie größere Änderungen vornehmen, so sollten Sie (im Feld 'Datensatz')

- per 'DS Einfügen' einen Datensatz an aktueller Stelle einfügen,
- per 'Anschluß DS suchen' das aktive Ende des Blockes (vorwärts/rückwärts) aufsuchen.

Die Taste 'DS Neu' wird aktiviert.

Koordinaten & Datensatz-Liste

Im unteren Teil des Bildschirms werden (ab Zeile 51) die Kinematischen Bewegungsdaten zeilenweise gespeichert; links die XYZ-Koordinaten, rechts deren korrespondierende Winkel. Über die Maske haben Sie direkten Zugriff auf bereits erstellte oder entstehende Datensätze sowie deren Korrektur. Die in der Maske angezeigte Ordnungs-Nr. des Datensatzes wird mit dem Cursor ergänzend markiert. Sie finden:

Spaltenbereich 1	/ (A)	Ordnungs-Nr. der Bewegungsstrategie
Spaltenbereich 2 bis 4	/ (B bis D)	Soll-Koordinate XYZ des TCP (absolut)
Spaltenbereich 5	/ (E)	Soll-Vektor-Offset des TCP (relativ)
Spaltenbereich 7 bis 9	/ (G bis I)	Ist-Koordinate XYZ Portal / Fußpunkt *)
Spaltenbereich 14 bis 16	/ (N bis P)	Ist-Koordinate XYZ des TCP (absolut)
Spaltenbereich 39 bis 50	/ (AM bis AX)	Winkelwerte Achsen (A/B bis L/M)

*) Portal / Fußpunkt Ist-Koordinate

- Sind in der Liste keine Fußpunkt-Koordinaten vorhanden, so arbeitet der Algorithmus "mit 0-Wert". Arbeiten Sie mit dem Bahn-Generator, so werden Portal Koordinaten in der Koordinatenliste nur ausgewiesen, wenn sie von 0 abweichen.
- Sind Fußpunkt-Koordinaten in der Liste vorhanden, so werden sie als Offset berücksichtigt.

Bahnsteuerung

CAD-Import

Sind Soll-Koordinaten (z.B. aus einem CAD-Programm) vorhanden, so werden sie zunächst mit den Excel-üblichen Befehlen in den Bereich der Sollkoordinaten (Spalten 2 bis 4 / bzw. B bis D) des Daten-Moduls ab Zeile 50 übertragen. Das Programm generiert aus diesen TCP Soll-Koordinaten entsprechend der gewählten Bewegungsstrategie (s.u.) die Winkelstellung der Knickarme und schreibt sie in das Bewegungsprotokoll. Hierzu werden die Koordinaten entweder über den Button '*DS Schritt*' (Step by Step) aufgerufen oder per '*DS Automatic*' als Datenblock verarbeitet.

Bahngenerator

Sind keine (extern ermittelten) Soll-Koordinaten vorhanden, so müssen sie interaktiv generiert werden (Offline Teach-In). Die TCP-Bahn-Stützpunkte werden wahlweise als XYZ-Wert *Absolut* oder als *Offset* eingegeben und per '*DS Neu*' bzw. '*DS Korrektur*' verarbeitet. Der Bahngenerator

- visualisiert "Real-time" die Bewegung im 3D-Raum
- erlaubt hierbei beliebig "Try & Error" und
- erzeugt die XYZ-Koordinatenliste des TCP sowie das Knickarm-Bewegungsprotokoll.

- Ein 3D-Bézier Kurven Generator (s.u.) verbindet gefundene TCP-Bahn-Stützpunkte. Die vorgeschlagenen Bahnkurven sind individuell anpaßbar.
- Ein Kreis Generator erzeugt frei im Raum positionierbare Kreis- und Spiralbahnen. (Zylindrische & Archimedische Spirale und Kombinationen hieraus – links- rechtsläufig).

CAD-Import und *Bahngenerator* greifen auf die gewählte Bewegungsstrategie zurück und ermöglichen eine kontinuierliche oder schrittweise Kontrollfahrt. Bestimmen Sie ggf. in '*Direkter Kinematik*' eine "vernünftige" Startpositionierung.

Im Rahmen einer interaktiven Arbeitssitzung erzeugt/speichert das Programm ein Bahnprofil mit Koordinaten und Winkelwerten. Wurden diese mit dem Bahngenerator erzeugt, so kann aus den gewonnenen Ist-Koordinaten eine ähnliche "parallel versetzte" Bahn mit den EXCEL-üblichen Befehlen "recht bequem" generiert werden: Die per Bahngenerator erzeugte Ist-Koordinatenliste wird mit entsprechendem Offset in den Soll-Koordinaten Bereich übertragen und über den Button '*DS Schritt*' bzw. '*DS Automatic*' erneut verarbeitet.

- Stellt sich heraus, daß ein Zielpunkt außerhalb der kinematischen Möglichkeiten liegt und daß das Problem durch verschieben des Roboters 'Schulter bzw. Fußpunktes' zu lösen sei, so muß nicht die bisherige Arbeit erneuert werden: Über den Portal-Offset wird eine neue Basisposition gewählt und über den Button '*DS Schritt*' bzw. '*DS Automatic*' ein neues Bewegungsprofil bei geändertem Fußpunkt erzeugt.
- Der Portal-Offset ist im Masken Bereich der '*direkten Kinematik*' korrigierbar.
 - Der hier eingegebene Wert wird für den aktuellen Datensatz in der Koordinaten-Liste gespeichert. Klicken Sie hierzu den Button '*DS Korrektur*' bzw. '*DS Neu*'.
 - Um den bisherigen Portal-Offset beizubehalten, klicken sie den 'Doppelpfeil' "rauf/runter" (im Feld Datensatz) je einmal, der bisherige Offset wird synchronisiert.
- Beachten Sie hierzu die Supervisor-Information '*Parameter & Datenkonformität*'.

Bewegungsstrategien

- *Semi-Automatic* präzisiert manuelle Winkel-Vorwahl aus *Direkter Kinematik* "in ähnlicher Silhouette" (TCP Abweichung Soll/Ist $< 10^{-5}$ mm).
- *Konvex:* Das mittlere Arm-Element liegt oberhalb des Zielpunktes
- *Konkav* arbeitet vice versa zu Konvex
- *Zickzack:* Die Arm-Elemente bilden eine Zickzack Silhouette
- *Parallel,* bewegt den 'End-Effektor' parallel zu sich selbst
- *Teleskop,* bewegt den 'End-Effektor' wie einen "Teleskop-Auszug".

Zwischen den Strategien kann beliebig gewechselt werden.

Semi-Automatic

orientiert sich an der Ist-Position der Gelenke und erreicht die neue Zielposition "in ähnlicher Silhouette". Wird die Arm-Position mit den Schiebern "in etwa" vorgewählt, so ermittelt der Algorithmus die Vektorlagen der Arme mit o.g. Präzision, ein Hindernis kann mit der Halb-Automatic so umfahren werden. Die Stützpunkt-Schrittweite beeinflusst die "Ähnlichkeit" der Silhouette; liegen die Stützpunkte weit auseinander, so geht die Ähnlichkeit verloren. Die Bahnen der Gelenkpunkte sind bei Hin- und Herbewegung selten kongruent.

Konvex, Konkav & Zickzack

sind Voll-Automatic Funktionen, sie generieren die Bahn mit reproduzierbarer Winkelstellung der Gelenke - unabhängig von deren Ausgangs-Position; diese Bewegungsstrategien ermitteln *für alle Gelenkpunkte* stets die gleiche Bahn.

Der Algorithmus eignet sich für Bewegungen, denen genügend Arbeitsraum zur Verfügung steht, er benötigt wenige Stützpunkte.

Innerhalb jeder einzelnen Bewegungsstrategie verlaufen die Armbewegungen konsistent und erwartungsgemäß.

- Ein Strategiewechsel ist jederzeit möglich, führt jedoch über eine im Detail undefinierte Streck-Bewegung des Armes. In dieser Phase besteht erhöhte Kollisionsgefahr! Vgl. Tutorial / Kochbuch: 'Singularität'.

Parallel & Teleskop

ähneln o.g. Voll-Automatic Funktionen. Der "End-Effektor" wird in paralleler Ebene zu sich selbst, bzw. in der Vektororientierung seiner eigenen Achse bewegt.

Die Bewegungsstrategie 'parallel' verwendet hierzu den absoluten bzw. relativen XYZ-Wert. 'Teleskopisch' berechnet aus der Ist-Vektorlage entsprechend dem geforderten Vektor-Hub individuelle XYZ-Bewegungskomponenten, die *per Knickarm-Kinematik* zu einer teleskopartigen Bewegung des "End-Effektors" bzw. "Unterarmes" führen.

- Die Winkelorientierung dem Unterarm ggf. kaskadisch folgender Achsen bleibt bei beiden Strategien erhalten.
- Ein Strategiewechsel Parallel / Teleskop ist jederzeit ohne erhöhte Kollisionsgefahr möglich. Der Arbeitsbereich ist kleiner als der anderer Strategien.

3D-Bézier Generator

Bézier Kurven haben die wunderbare Eigenschaft, nicht nur 2 Punkte zu verbinden:

- Die Kurve läßt sich in weiten Grenzen mit mathematisch gut beherrschbaren "Anfassern" beliebig formen. Besonders hilfreich ist es, daß die Bézier Kurve ihre "Anfasser" punktgenau tangential verläßt bzw. tangential einläuft, vgl. Tutorial.
- Liegen die Anfasser in der Vektor-Orientierung einer anderen, anschließenden Kurve oder Geraden so gehen beide nahtlos ineinander über. Anders ausgedrückt:
- Zwei gegebene Bahn-Segmente, können durch Bézier-Splines "glatt" verbunden werden.

Soweit die Theorie. Mehr hierzu unter: http://www.cnc-mac.de/html/bezier_spline.html.
In der Praxis bedarf es erheblicher Übung, mit den Anfassern eine "vernünftige" Kurve zu generieren. Wir überlassen dies dem Bahngenerator.

Der Bahngenerator fügt eine drei dimensionale Bézier Kurve mit 20 Stützpunkten ein, die Ihnen zur Beurteilung zunächst vorab in der 3D-Grafik gezeigt wird. Im Sinne besserer Übersichtlichkeit werden alle anderen Bewegungsbahnen bis auf diese Kurve ausgeblendet.

- Der Bahngenerator bestimmt aus der Vektorlage der zu verbindenden Bahn-Segmente die Bézier Tangentenlage im Raum und berechnet aus dem Öffnungswinkel 3 Vorschlagsformen der Kurve. Diese können recht ähnlich, aber auch sehr unterschiedlich sein.
 - Per Click wählen Sie eine hiervon.
 - Mit den beiden 'Doppelpfeil-Tasten' ändern sie den Formfaktor (Amplitude) der Kurve. Falls Sie die Kurvenorientierung ändern möchten, korrigieren Sie deren Tangenten-Punkte.

Öffnungswinkel und Abstand zum theoretischen Tangenten Schnittpunkt bestimmen in unterschiedlicher Gewichtung die 3 Basis-Kurven. Bei einem *Öffnungswinkel von 90°* und

- gleichem Abstand zum theoretischen Schnittpunkt erzeugen Kurve 1) und 2) einen exakten $\frac{1}{4}$ Kreis. Kurve 3) bildet eine Sehne.
- unterschiedlichem Abstand erzeugt Kurve 1) ein Oval, Kurve 2) eine Ellipse. Kurve 3) bildet eine Sehne.

Bei anderen Öffnungswinkeln kommt die Vielfalt Béziers zum Tragen:

- Kurve 1) verbindet die Bahn-Segmente bei beliebigem Öffnungswinkel *jedoch gleichem Abstand zum theoretischen Schnittpunkt* mit einem Kreissegment.
- Tendenziell erzeugt Kurve 2)
 - bei flachen Öffnungswinkeln flachere Verrundungen als Kurve 1),
 - bei spitzeren Öffnungswinkeln spitzere Verrundungen als Kurve 1).
- Liegen die Tangenten der zu verbindenden Segmente parallel, so erzeugt Kurve 1) einen Halbkreis, Kurve 2) eine Halb-Ellipse.
- Kurve 3) "reagiert stärker" auf Änderungen des Öffnungswinkels und der Schnittpunktlage als die beiden anderen; dies kann in sehr "elegante" aber auch völlig unbrauchbare Kurven führen.

Liegen die zu verbindenden Bahnsegmente "parallel versetzt" (oder auch "schräg versetzt"), so werden sie mit einem "S-Bogen" verbunden; die Ausprägung des "S-Bogens" ist bei den 3 Kurven recht unterschiedlich.

Bézier "Wunschbahn"

Bézier Kurven laufen hoch präzise in ihren eigenen Tangentenpunkt ein; die Kurve selber ist, wenngleich exakt reproduzierbar jedoch nur bedingt auf eine "exakte Wunschbahn" zu bringen. Für die Bedienung des Bahngenerators bedeutet dies, zwischen '*bestimmter*' und '*unbestimmter*' Bewegungs-Bahn zu unterscheiden. Die '*bestimmte*' Bewegungs-Bahn ermöglicht einen präzis geführten Werkzeugeingriff, die '*unbestimmte*' Bahn dient vorzugsweise einer "eleganten" Werkzeugbewegung im Raum ohne Werkzeugeingriff. Bahnsegmente mit Werkzeugeingriff generieren Sie in '*Inverser Kinematik*' mit den Bewegungsstrategien 1) bis 7).

- Muß die "Wunschbahn" präzise über einen oder mehrere *bestimmte* Raumpunkt geführt werden, so teilen Sie die Bahn in Segmentabschnitte. Mehrere Bézier Kurven verbinden diese Raumpunkte als "Cascadierter Spline". Ein gemeinsames Stützpunkt-Paar bestimmt die Orientierung der ein- und auslaufenden Kurve. CAD/CAE Systeme arbeiten auf dieser Technologie-Basis. Vgl. http://www.cnc-mac.de/html/bezier_spline.html.

Bézier-Bahn & Arbeitsbereich

Der Bézier Kurven Generator prüft, ob die vorgeschlagene Kurve im Arbeitsbereich des Roboters liegt. Ob diese Kurve in '*Inverser Kinematik*' durch den Roboterarm realisiert werden kann, hängt von den parametrisierten Grenzwinkeln ab (vgl. Supervisor-Information). Die Algorithmen der 'Inversen Kinematik' melden ggf. eine '*Winkelwert Überschreitung*'.

Falls die Kurve in eine '*Winkelwert Überschreitung*' führt, haben Sie 2 Korrekturmöglichkeiten:

- Wählen Sie testweise eine andere der vorgeschlagenen Kurven oder stauchen Sie sie mit den Doppelpfeil-Tasten (Formfaktor < 1).
- Fahren Sie den Zielpunkt nicht über den kürzesten Weg an, sondern drehen Sie die Arme über die "Winkelposition 0°" zurück. Führen Sie den Roboterarm hierzu über "Hilfs-" Raumpunkte in die Ziel-Position.

Kreise & Spiralen

wären als Cascadierter Bézier Spline zwar mit hoher Präzision möglich, jedoch ist die klassische Mathematik vorteilhafter, zumal hier ein höherer Bedien-Komfort realisierbar wird. Im Sinne intuitiver Bedienung orientiert sich die Parametereingabe für Kreise & Spiralen an den beschriebenen Bézier-Abläufen.

Kreise erreichen nach einem 360° Umlauf Ihren Startpunkt, Spiralen drehen hierüber hinaus.

- Sind für ein Kreissegment der Start und Endpunkt aus vorhandenen Anschluß Koordinaten ableitbar, so erfragt das Programm die Mittelpunktkoordinate und den Drehsinn.
 - Ist nur die Startkoordinate bekannt, so wird ergänzend der Drehwinkel abgefragt.
- Zylindrische & Archimedische Spiralen erfordern zusätzlich die Angabe *Steigung pro Umdrehung*.

Vorschlagswert hieraus sind Kreis Koordinaten für tangentialen Bahn Einlauf, abweichend ist jede beliebige Kreis- / Spirallage im 3D Raum per 'Doppelpfeil-Taste' individuell möglich.

Im Kochbuch Inverse Kinematik

finden Sie eine "Schritt für Schritt" Anleitung zu Bézier, Kreise & Spiralen.

Positionierung & Orientierung

- Die Positionierung bestimmt die kartesische XYZ-Position des "End-Effektors" im Raum,
- die Orientierung unter welchen Winkeln er steht.

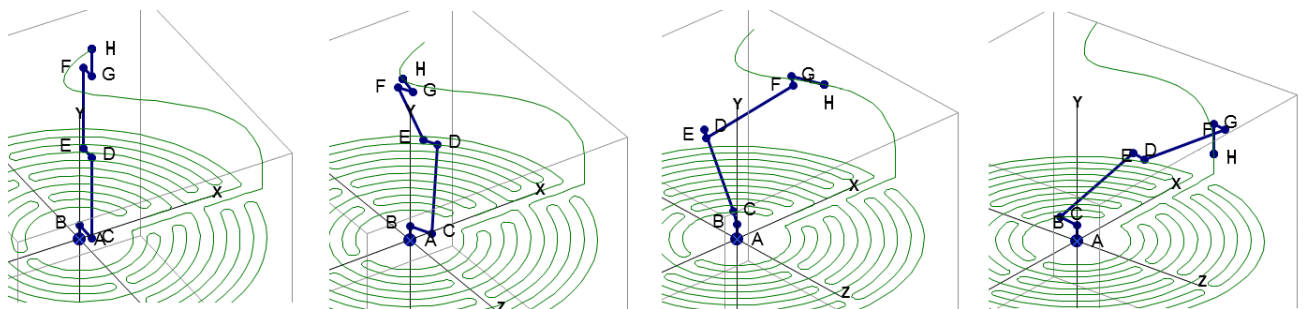
Beide Werte zusammen definieren seine Vektorlage.

- Grundsätzlich wird es nur möglich, Positionierung und Orientierung im 3D Raum ohne Einschränkung frei zu wählen, wenn mindestens 2 x 3 Freiheitsgrade (Arm: X/Y/Z) und (Handgelenk: U/V/W) mechanisch vorhanden und ohne gegenseitige Beeinflussung ansteuerbar sind.

Wird lediglich eine senkrechte, "Haupt-Achsen parallele" Ausrichtung des End-Effektors erforderlich, so bietet RoBo-mac für Roboter "ohne Handgelenk" durch entsprechende Gegen-drehung der Achsen mit den Bewegungsstrategien 6 und 7 eine kostengünstige Lösung:

Im Demo-Beispiel *Labyrinth von Chartres* steht der Roboterarm zunächst senkrecht in 'Home-Position'. Bei Eintritt in das Labyrinth weist der 'End Effector' Arm G/H 'senkrecht nach unten'.

- Er hat während des Durchlaufens der Bezier-Kurve seine Orientierung geändert!
Per Bewegungsstrategie 6) bzw. 7) wird diese Orientierung mit höchster Präzision beibehalten. Im Beispiel liegt der Orientierungsfehler am Bahn-Ende – nach etwa 1000 Bahn-punkten – in der Größenordnung 1/10 Promille.



Orientierungswechsel des End-Effektors während der Bezier-Fahrt.

- Das Demo-Beispiel ändert auch die Betrachtungsperspektive.

Der Bahngenerator berechnet einen Neuen Datensatz stets basierend auf der aktiven / aktuell angezeigten Ist-Position und der hierzu gehörenden Orientierung.

- Soll die Orientierung bei Beibehaltung der Bahn-Position korrigiert werden, so wird zunächst die aktuelle Position per Button 'Übernahme Ist-Position' "vorgemerkt".
- In Direkter Kinematik wird die gewünschte Orientierung 'per Schieber' gewählt.
- Diese Um-Orientierung führt zunächst in eine Änderung der Position!
- Die "zuvor vorgemerkte" Position wird in der neu gewählten Orientierung mit 'Strategie 6) parallel' in 'Inverser Kinematik' angefahren.

Bitte beachten Sie, daß eine Um-Orientierung bei großer Schrittweite (horizontal / senkrecht) über undefinierte Detail-Bewegung führen kann. Legen Sie diese Bewegungsphase in einen unkritischen Bewegungsbereich.

Senkrechte / horizontale Orientierung des End-Effektors

Hilfreich zur Kontrolle ist die Koordinaten-Übersicht unmittelbar rechts neben der Grafik.

- Für eine senkrechte Orientierung der Achse G/H sind deren X und Z-Koordinaten gleich,
- für eine horizontale die Y-Koordinaten.
- Mit den Schiebern B/C, D/E, F/G stellen Sie eine senkrechte / horizontale Orientierung des End-Effektors G/H in beliebiger Position ein:
 - Beträgt die Winkelsumme 0° bzw. 180° , so steht er senkrecht, bei $90^\circ/270^\circ$ horizontal.

"Bézier"- Orientierung des End-Effektors

Der Bahngenerator erzeugt tangential in die Anschlußsegmente einlaufende 3D Bézier-Kurven. Wurden die Anschlußsegmente mit 'Strategie 7), teleskopisch' erzeugt, so steht der End-Effektor in diesem Datensatzbereich ebenfalls tangential. Die 'Strategie 6) parallel' übernimmt diese "auslaufenden Orientierung" – und behält sie bei. Allerdings wird diese Orientierung nur selten die Orientierung des Anschlußsegmentes der einlaufenden Bahn sein!

Das *Kochbuch Inverse Kinematik* führt "Schritt für Schritt" durch diesen Themenkreis.

Kombinierte Portal & Knickarm Robotik

Ist ein Knickarm Roboter auf Portal verfahrbar, so überlagern sich beide Bewegungskomponenten. Dies erhöht die Anzahl der Freiheitsgrade enorm. Um trotzdem gezielt Einfluß auf die Kinematik nehmen zu können, referenziert die Berechnung der Knickarm-Winkel auf die aktuelle Fußpunkt Position.

- Wählen Sie eine *Fußpunktposition* in '*Direkter Kinematik*' und die *XYZ-Zielkoordinate* des TCP im Maskenbereich der '*Inversen Kinematik*'.
- Beide Bewegungskomponenten lassen sich so zu einer komplexen Gesamtbewegung kombinieren – und bestimmen die Orientierung des TCP.

Soll die TCP Position bei geänderter Fußpunkt Koordinate beibehalten werden, so

- klicken Sie zunächst den Button 'Übernahme Ist-Position' (Feld 'Zielposition absolut'),
- korrigieren Sie die Fußpunkt Koordinate,
- klicken Sie 'DS Neu' (Bereich *direkte* Kinematik)
- klicken Sie 'DS Korrektur' (im Feld 'Zielposition absolut').

Diese Orientierungsänderung bei gleicher XYZ-Position führt in eine "Biege-Bewegung".

TCP Spur

Die Grafik visualisiert aus beliebiger Perspektive die aktuell errechnete Winkelstellung der Knickarme im 3D-Raum, ergänzend (zu-/abschaltbar) die Bewegungsspur des TCP. Die Perspektiv-Einstellung hat keinen Einfluß auf die kinematische Berechnung.

Positionierfehler & Watchdog

Unabhängig davon, wie die Soll-Werte erzeugt wurden, werden die Datensatz Ist-Werte in *inverser* Kinematik entsprechend der gewählten Bewegungsstrategie berechnet und als korrespondierende Knickarm-Winkel gespeichert. In '*Direkter Kinematik*' wird aus diesen Knickarm-Winkeln der XYZ-Wert des TCP errechnet. Das Verfahren mag umständlich sein, er-

möglicht jedoch einen Soll/Ist Vergleich. Die absoluten Positionierfehler Soll/Ist des TCP liegen unter 1/10.000 mm, meist in einer Größenordnung von 10^{-5} bis 10^{-6} mm.

Ein Watchdog-Algorithmus überwacht intern die Soll/Ist-Abweichung und schlägt ggf. Alarm. Falls der Zielpunkt nicht berechenbar oder kinematisch nicht erreichbar ist, wird eine Fehlermeldung generiert.

Kinematische Bewegungsebenen

Parallele Bewegungsebenen

Die Algorithmen der bisher besprochenen Bewegungsstrategien erwarten, daß sich die Schwenkachsen zwischen Schulterpunkt und Ellbogen bzw. dem Übergangspunkt "Arm/Handgelenk" in parallelen Ebenen bewegen. Die An- und Abtriebsachsen A/B bzw. 'G/H' dürfen Drehachsen sein. Diese Parallel-Kinematik (vgl. Tutorial) erreicht jeden beliebigen Raumpunkt (XYZ).

Schiefe Bewegungsebenen

Die zusätzliche Drehmöglichkeit einer Schwenkachse zwischen Schulterpunkt und Handgelenk erhöht die Bewegungsvielfalt enorm. Dieser Vorteil wird mit einer komplexen Mechanik, einer nochmals gesteigerten kinematischer Überbestimmung und *parasitären Bewegungskomponenten* erkauft:

- Jede schiefwinklige Bewegung eines Armsegmentes beinhaltet neben einer zielführenden Bewegung eine nicht gewünschte Vektorkomponente, die durch Gegenbewegung anderer Armsegmente kompensiert werden muß; der Rechenaufwand steigt extrem – und führt in wahrnehmbare Rechenzeit. Es müssen 3D- Näherungsalgorithmen verwendet werden (vgl. Tutorial).

Näherungsalgorithmen haben stets einen Gültigkeitsbereich, der hier von Start- & Zielposition sowie der Bewegungsstrategie abhängt. Nicht jede Zielposition ist aus jeder Startposition erreichbar, ggf. muß die Bewegungsstrategie geändert bzw. die Startposition im Rahmen der Bahnoptimierung (Interaktiver Prozeß) zuvor korrigiert werden. Der Gültigkeitsbereich bildet sich aus Schnittmengen vorgenannter Parameter. Ein "Watchdog"-Algorithmus überwacht, daß sich die Näherungsalgorithmen im Gültigkeitsbereich bewegen; - ggf. generiert er eine *Fehlermeldung & Korrekturempfehlung*.

- Mit Version 6.0 wird ein gegenüber den ältern Versionen deutlich schneller und präziser arbeitender Schief-Algorithmus eingeführt, Positionierfehler liegen nunmehr in der Größenordnung 10^{-4} – und besser. Der Algorithmus beherrscht alle Bewegungsstrategien.
- wird die Schwenkachse 'C/D' als *Kombi-Dreh- & Schwenkachse* derart berechnet,
 - daß die Orientierung des End-Effektors *Raumlage-stabil* gehalten wird.
 - Wählen Sie mit den *Schiebern 'C/D'* eine *Orientierung des End-Effektors ('H/I')*.
 - Wählen Sie im Bereich *Tool-Center-Point* dessen Zielposition.Der Winkelwert der Achse 'C/D' wird in *Inverser Kinematik* entsprechend eingedreht.

Das Programm prüft selbstständig, ob der rechenintensive Schief-Algorithmus erforderlich wird oder der schnellere & präzisere Parallel-Algorithmus geeignet ist.

Supervisor-Information

Parametrierung & Werks-Reset

- Ein erweiterter Bildschirm - über den User-Mode hinaus - wird durch klicken des Buttons '*Parameter*' zugänglich. Sie verlassen diesen Bildschirm über den Button '*Reset*'.
- Beantworten Sie die Frage nach einem '*Werks-Reset*' zunächst mit "nein".

Im rechten Bildschirmbereich werden Parameter-Einstellungen in '*Direkter-Kinematik*' möglich, die das '*Control-Center*' im User-Mode nicht freigibt; "spielen" Sie zunächst einmal mit den Schiebern – es ändern sich die "roten" Werte in den "gelben" Feldern. Alternativ können Sie hier einen Zahlenwert direkt eingeben.

- Für die Vektoren "*Achs-Winkel, Länge und Portal-Basis*" finden Sie (blau) Reset-Werte, - im User-Mode wird das Layout per Button '*Reset*' auf diese Werte (zurück) gesetzt.
- Die Auflösung der 3D-Grafik orientiert sich an der (ggf. geänderten) Baugröße des Roboters; '*Reset*' stellt zum Zoom-Wert 50° eine Format-füllende Visualisierung ein.

Clicken Sie '*Reset*' & '*Parameter*' im Wechselspiel.

- Wenn alles etwas chaotisch aussieht, rufen Sie erneut "Parametrierung / Werks-Reset" auf, bestätigen Sie diesmal die Frage nach einem '*Werks-Reset*' mit "ja" – das bringt Ordnung, der Roboterarm steht senkrecht in "Null-Position".

Die Wirkung Ihrer Parameter-Eingaben auf das '*Control-Center*' können Sie jederzeit prüfen indem Sie es aufrufen; hierzu müssen Sie den Supervisor-Bereich nicht verlassen. Bei jeder Aktivierung des '*Control-Centers*' werden Ihre bisherigen Parametrierungen eingearbeitet. Ist das '*Control-Center*' aktiviert, so sind Parallel-Eingaben im Supervisor-Bereich nicht möglich. Verlassen Sie das '*Control-Center*' – Sie kehren automatisch in den Supervisor-Bereich zurück. Die Winkel-Schieber übernehmen den Datensatz, den Sie im '*Control-Center*' zuletzt aufgerufen hatten.

Hardware konforme Parametrierung

- Alle Eingaben erfolgen in den '*gelben Feldern mit roter Schrift*'.
- Die 3D-Grafik visualisiert Ihre Eingabe sofort.
- Legen Sie für jede unterschiedliche Roboter-Hardware eine MASTER Daten-Datei an!
- Wenn die die Parametrierung abgeschlossen ist, müssen Sie die Daten-Datei speichern!

Parametrieren Sie zunächst die Fußpunkt-Konstruktion.

Der Fußpunktwinkel bestimmt, ob eine Rotation um die (theoretische) Fußpunktachse (A/B) körperlich in dieser Achs-Ebene liegt (Winkelwert 0°) oder sich der Arm auf einer Kreisbahn bewegt.

- In Feld '*Zeile 21 / Spalte 22*' bzw. '*V21*' geben Sie den Bauart bedingten Winkel gegenüber der Senkrechten ein,
- parametrieren Sie die Länge der Achse "A/B" mit dem Schieber.
- Ein '*Werks-Reset*' setzt die Schulter-Achse auf 45° (Kreisbahn)!

Legen Sie nun fest, welche Länge die Arm-Elemente haben und welchen Winkelbereich sie überstreichen.

Länge der Bewegungsarme und deren Achsversatz durch die Drehgelenke

- Diese Werte müssen sehr genau mit den echten Werten der Mechanik übereinstimmen, sonst ergeben sich Abweichungen zwischen mathematischer Simulation und Wirklichkeit.
- Beträgt der Achsversatz "0" so geben Sie als Länge "0" ein.

Winkel

Mit Controller-Version 5.5 wurde das 'plus/minus' Winkel-Bezugssystem eingeführt. Es ermöglicht einen individuellen, vom Standard-Drehwinkel $\pm 180^\circ$ abweichenden 'min/max' Wert, der die Endlagen der Schieber bestimmt. Das System verarbeitet symmetrische und asymmetrische Grenzwinkellagen.

- Kleinere Winkel führen somit in eine Spreizung der Schieber Werte.
- andererseits können ebenfalls Werte über $\pm 180^\circ$ hinaus parametrisiert werden, so die Mechanik dies ermöglicht.
- Für jede Achse/Schieber sind individuelle Winkel (auch asymmetrisch, z.B. $-40^\circ/+120^\circ$) frei wählbar.
- Werden die 'min/max' Winkel einer Achse beide auf $-0/+0$ gesetzt,
 - so wird der Drehwinkelbereich 0° als "Fix-Arm" interpretiert.
 - Im 'Control-Center' wird der Schieber "in grau und ohne Handgriff" angezeigt!

Abwärts-Kompatibilität des Winkel-Systems

Der Controller ab Vers. 5.5 verarbeitet auch Daten-Module, denen das ältere *Festwinkel-Bezugssystem* ($0-360^\circ$ – *Mittelstellung* 180°) zugrunde liegt.

- Für einen "Fix-Arm" mit Drehwinkelbereich 0° setzen Sie die 'min/max' Winkel jeweils auf $+180 / +180$.

"Nicht vorhandene" Hardware

Der RoBo-mac 3D Gelenk-Baukasten beherrscht z. Z. 12 Achsen, A/B bis L/M. Sie werden voraussichtlich nicht alle benötigen..

- Falls Sie eine Achse im 'Control-Center' ausblenden wollen, müssen Sie
 - als Achsenlänge "0" eingeben, sowie
 - den 'min/max' Winkel Bereich dieser Achse für beide Werte ebenfalls auf "0" setzen.

Reset-Parametrierung

Parametrieren Sie nun die per 'Reset' aufzurufende Startposition.

- Stellen Sie mit den Schiebern die gewünschten Winkelwerte ein.
- Sie müssen lediglich die Werte der Spalte 31 (AF) (*gelbe Felder mit roter Schrift*) in Spalte 32 (AG) wiederholen.
- Ihre Eingabe wird interaktiv auf Plausibilität geprüft, klicken Sie hierzu 'Control-Center'. Liegt die Start-Position im zulässigen Winkelbereich so nehmen die Schieber eine analoge Position ein, liegt sie außerhalb, werden die Bewegungswerte auf 'min/max' gesetzt.
 - Prüfen Sie, ggf. ob der Reset-Winkelwert oder 'min/max' falsch eingegeben waren.

Parametrierung verlassen & Datei speichern

- Klicken Sie den Button 'Reset'. Sie verlassen den Bildschirm, die Werte werden aktiviert.
- Speichern Sie Ihre Parametrierung im Daten-Modul mit den Excel üblichen Befehlen.

Parameter & Datenkonformität

Allen kinematischen Berechnungen liegen die im jeweiligen Daten-Modul festgelegten Parameter zu Grunde. Die im Daten-Modul erfaßten Datensätze basieren auf dieser Parametrierung und beschreiben *Bahnpunkt und Knickarm-Winkel* in gegenseitiger Gültigkeit.

- Die Parametrierung muß hierzu vor Erfassung kinematischer Bewegungsdaten abschließend festgelegt worden sein.
- Innerhalb desselben Daten-Moduls darf die Parametrierung nach Erfassung der Bewegungsdaten nicht mehr geändert werden!
- Beliebig viele Daten-Module mit unterschiedlichen, jeweils Hardware konformen Parametern sind hingegen problemlos möglich.

Ab Version 6.0 prüft der Controller bei Aufruf, ob der letzte, zuvor angelegte Datensatz mit den aktuellen Parametrierungswerten datenkonform ist. Detektiert er hierbei einen Fehler, so erscheint ein Fehlerhinweis, das 'Control-Center' wird deaktiviert angezeigt. Eine Kontaktaufnahme mit dem *Supervisor* wird dem User empfohlen.

Die folgende Prozedur führt durch die Korrektur:

- Verlassen Sie das 'Control-Center'
- Starten Sie das 'Control-Center' erneut!
 - Das 'Control-Center' erscheint zunächst nicht,
 - alle Datensätze werden gescannt,
 - fehlerhafte Datensätze werden zur Korrektur angezeigt,
 - korrigieren Sie den Datensatz,
 - verlassen Sie das 'Control-Center' und starten Sie es erneut.
- Wiederholen Sie diese Prozedur bis der Scan fehlerfrei läuft.

Hinweis

- Diese Prüfprozedur wird automatisch nur gestartet, falls bei Aufruf des 'Control-Center' der letzte, zuvor angelegte Datensatz mit den aktuellen Parametrierungswerten nicht datenkonform ist;
- Um die Datenkonformität eines Daten-Moduls gezielt zu testen, geben Sie in dessen Feld 'Zeile 51 / Spalte 1' bzw. 'A51' an Stelle des dort stehenden Steuerwortes 'Start' das Steuerwort 'Test' vor Aufruf des 'Control-Centers' ein; alle Datensätze werden gescannt, mögliche Abweichungen zum Korrekturprozeß angezeigt. Falls Sie an Stelle des Steuerwortes 'Test' eine Datensatz-Nr eingeben, beginnt der Scan dort.

Nur für Experten:

Sie haben Zugang zur "Normierten Vektorlage" – dies ist eine "Operation am offenen Herzen". Die "Normierte Vektorlage" bestimmt, unter welchen realen Winkeln (im 3D-Raum) die Arm-Elemente in "Nullstellung" zueinander stehen

- Falls Sie lediglich den Fußpunktwinkel ändern möchten,
 - geben Sie in Feld 'Zeile 21 / Spalte 22' bzw. 'V21' den entsprechenden Winkel ein,
 - die Vektorlagen werden entsprechend einer Schablonenstruktur errechnet.
- Ändern Sie die im folgenden beschriebene Schablonenstruktur nur,
 - *wenn Sie wirklich wissen, was Sie tun.*
 - Hilfreich ist es, als Grund-Koordinate die Null-Position "senkrecht nach oben" zu wählen und die Drehachsen der "Schwenkarme" in die Z-Koordinate (Weltkoordinatensystem) zu legen. Erfasst wird die Orientierung jeder Achse für sich mit Start- und End-Punkt Vektor im Einheitssystem (0 bzw. 1) entsprechend ihrer Kaskadierung.
 - Bei Fußpunktwinkel '0' also z.B. für die dritte "Senkrecht"-Achse die Y-Werte '2 bzw. 3').
 - Die eigentliche Länge der Achse wird getrennt parametrisiert (s.o.). Dies ermöglicht es, baugleiche Konstruktionen unterschiedlicher Dimension aus derselben Vektorlage abzuleiten.

Die Parametrierung der Fußpunkt-Koordinaten wird hier beispielhaft erläutert:

- Bei zentrisch geschnittener Schulterpunkt-Achse erhält das Schulterelement den End-Punkt Vektor " $X = 0$ ",
 - rotiert die erste Schwenkachse auf einer Kreisbahn um die Senkrechte; so erhält der End-Punkt Vektor des Schulterelementes die der Geometrie entsprechenden X- und Y-Werte,
 - erforderlich ist es, die gemessenen Werte auf Vektor-Länge '1' zu skalieren; die sich ergebende XY-Werte gehen als Basis-Offset in die XY-Parametrierung aller Achsen ein.
- Ändern Sie die "Normierten Vektorlage" nur wenn Sie wirklich wissen, was Sie tun,
 - *ein Werks-Reset führt auch hier aus ungewolltem Chaos.*

ACHTUNG:

- Die Algorithmen der direkten Kinematik arbeiten auch bei veränderter Vektorlage erwartungsgemäß.
- Die Algorithmen der inversen Kinematik erfordern eine "Normierte Vektorlage" gemäß Werks-Reset, abweichende Werte führen in fehlerhafte Ergebnisse.

Alle Achsen des Gelenkbaukastens rotieren mit Ausnahme der Schulter-Achse entsprechend Ihrer Vektor-Orientierung; die Schulterpunktachse rotiert um ihre "Senkrechte".

Rotationsrichtung für positive Winkelwerte ist "mathematisch positiv" (CCW)!

Information zum aktuellen Release-Stand (β-Version 6.0)

- Mit Version 6.0 wird ein gegenüber den älteren Versionen deutlich schneller und präziser arbeitender Schief-Algorithmus eingeführt (vgl. **Kinematische Bewegungsebenen**).
- Ab Version 6.0 prüft der Controller bei Aufruf, ob der letzte, zuvor angelegte Datensatz mit den aktuellen Parametrierungswerten datenkonform ist (vgl. **Parameter & Datenkonformität**).

Quadranten & Oktanten

Die mit Version 5.7 eingeführte Wahlfreiheit einer 'links-/rechtshändigen' Laufrichtung führte dazu, daß die Vorzeichen Struktur von Koordinaten und Knickarmwinkeln nicht durchgängig "Quadranten-konform" ausgegeben wurde; Schieberbewegungen ergaben nicht immer erwartungsgemäße Drehbewegung.

- Ab Version 6.0 ist die Systematik "erwartungskonformer"; hierzu gehört, ein Vorzeichentausch horizontal liegender Drehachsenwerte. Rotationsrichtung für positive Winkelwerte ist nunmehr durchgängig "mathematisch positiv" (CCW)!
- Beim Laden von Daten-Modulen bis einschließlich Version 5.9 werden Sie gefragt, ob Sie die Vorzeichen konvergieren oder im alten Logik-System weiterarbeiten wollen.

Ab Version 6.0 wird im Koordinatentableau des Datenmoduls für den Punkt 'H' (TCP) die Quadranten / Oktanten-Lage ausgegeben. TCP-Lagen 'Y \geq 0' durchlaufen die Quadranten 1 bis 4, TCP-Lagen 'Y < 0' die (jeweils um 4 erhöhten) Oktanten 5 bis 8.

Datenschutz

(Nicht im Sinne der Datenschutz Grundverordnung)

Parametrierung sowie Bewegungsdaten werden jeweils im Daten-Modul gespeichert.

- Das Daten-Modul ist in kritischen Bereichen gegen eine unbeabsichtigte Veränderung geschützt.
- Die eigentlichen Bewegungsdatensätze sind nicht geschützt, sie können mit den Excel-üblichen Befehlen geändert werden.

Ein Teil der Excel-üblichen Befehle unterliegt jedoch ebenfalls dem Schutz, so daß versierte Excel Nutzer nicht ihr volles Wissen einsetzen können und sich ggf. durch den Schutz behindert fühlen.

- Ab Version 6.0 kann dieser Schutz sporadisch frei geschaltet werden. Sie werden hierzu nach dem Paßwort gefragt. Dieses Paßwort lautet **12345**.
- Sobald Sie das Control-Center aufrufen, wird der Schutz mit diesem Paßwort automatisch reaktiviert; ggf. müssen Sie das Paßwort für weitere Änderung erneut eingeben.
- **ACHTUNG!**
Sie können dieses Paßwort nicht ändern! Falls Sie ein eigenes Paßwort eingeben, wird das Daten-Modul unbrauchbar, es kann nicht automatisch zurückgesetzt werden!

Restriktionen

Programm

- Controller- und Daten-Module können in beliebige Verzeichnisse (Ordner) installiert werden. Zeitgleich darf ein Daten-Modul geladen und aktiv sein (Makro aktiviert), zu Vergleichszwecken können weitere Projekt-Dateien inaktiv "zugeladen" werden (Makro nicht aktiviert).

Algorithmen

- Direkte Kinematik
 - Keine Restriktion.
Der Algorithmus beherrscht derzeit 12 Achsen (A/B bis L/M).
Mit allen Schiebern können beliebige Werte eingestellt werden.
- *kombinierte Dreh- & Schwenkachsen* sind möglich.
- Inverse Kinematik
 - Restriktion:
Der Algorithmus beherrscht die Achsen (A/B bis G/**H**); invers- sowie ergänzend in direkter Kinematik Achsen **H**/I bis L/M
Punkt H (Abtrieb Handgelenk)
- wird in dieser β -Version als Tool Center Point (TCP) / End-Effektor errechnet und von Achse G/H gebildet, er ist *derzeit* noch fest parametrisiert.
 - Inverse *Parallel* Kinematik
Der Algorithmus erreicht jeden beliebigen Raumpunkt (XYZ), die absoluten Positionierungsfehler Soll/Ist des TCP liegen unter 1/10.000 mm, meist in einer Größenordnung von 10^{-5} bis 10^{-6} mm. Kombinierte Dreh- & Schwenkachsen sind weitgehend möglich. Der Algorithmus erwartet lediglich, daß, die "überbestimmten" Achsen / Arme sich in parallelen Ebenen bewegen, die Schwenkachsen C/D & E/F also keine *Kombi-Dreh- & Schwenkachsen* sind. Der Algorithmus ist schnell, er bietet Real-Time Bewegung 'per Click'.
- Inverse *Schief* Kinematik
Die Schwenkachse E/F ist *derzeit* noch keine *Kombi-Dreh- & Schwenkachse*.
- SCARA
Unter kinematischen Gesichtspunkten sind die Bewegungsmöglichkeiten des SCARA eine Untergruppe des Gelenkarm-Roboters. Sie werden demgemäß vom RoBo-mac Algorithmus abgedeckt - wenn gleich die β -Version noch keine "Standard" Parametrierung beinhaltet.
- Kollisionskontrolle
Die in Inverser Kinematik erzeugten Bewegungen werden für parallel Kinematik auf Eigenkollision überwacht und ggf. nicht ausgeführt (vgl. Tutorial).
 - Die Demo-Version überwacht derzeit noch nicht alle Arme auf potentielle Eigenkollision.

Kochbuch Inverse Kinematik

ab Controller Version 5.5

Praktische Übung

ACHTUNG: *Das Programm speichert nicht automatisch, sondern nur auf Ihren Befehl!*

Neu-Datei

- Wählen Sie das Daten-Modul " Master..", oder
- Generieren Sie zunächst eine Neu-Datei aus einer anderen, vorhandenen.
- Laden Sie hierzu eine beliebige Daten-Datei des
MATHEMATISCHEN 3D GELENK-BAUKASTENS,
speichern Sie diese sofort unter einem Neuen-Namen und beginnen Sie:
- Löschen Sie mit den Excel-üblichen Befehlen alle Datensätze im Arbeitsbereich (Zeile 50 bis Zeile max.)
- Klicken Sie in der 3D-Grafik den Button '*Control-Center*',
der erste Datensatz (mit Ordnungs-Nr. = Zeilen-Nr. "51" wird automatisch angelegt.
Da Sie alle Datensätze zuvor gelöscht haben, greift der Bahngenerator entweder
- auf den letzten, in der zuvor aktuellen Arbeitssitzung erzeugten Datensatz zurück,
- oder auf die von Ihrem Supervisor hinterlegte Start-Position.
- Über den Button '*Reset*' (in der 3D-Grafik unten rechts) aktivieren Sie die Start-Position.
- Klicken Sie erneut in der 3D-Grafik den Button '*Control-Center*'.
- falls DS 51 nicht belegt war, wird die hinterlegte Start-Position übernommen.
- Der Start-Datensatz wird Ihnen angezeigt.
- Die Maske '*Control-Center*' können Sie jederzeit verlassen und ggf. erneut aufrufen.
- Speichern Sie die Datei.

Falls Sie eine andere Start-Position festlegen möchten, finden Sie Hinweise hierzu unter Supervisor-Info.

Perspektive & 2D-Projektion

Wesentlicher Bestandteil des Baukastens ist die 3D-Visualisierung.

Im Tutorial wurden mentale Wahrnehmungs-Täuschungen erläutert; hier einige Experimente:

- Wählen Sie mit den Perspektiv-Schiebern $X = 35^\circ$ / $Y = 45^\circ$ / $Z = 0^\circ$. Sie erhalten eine (nahezu) klassische Isometrie (Exakter Isometrie X-Wert $\arctan(1/2^2) = \text{ca. } 35,26439^\circ$). Eine Draht-Isometrie läßt kaum unterscheiden, "was vorne und was hinten" liegt!
- Ändern Sie hierzu "Z". Eine 3D-Bewegung ist meist wahrnehmungs-fördernd.
- Wählen Sie $X = 325^\circ$ / $Y = 315^\circ$ / $Z = 0$; ein Blick 'von unten'! Unser Gehirn ist hierauf meist nicht trainiert und interpretiert dies als *Sinnestäuschung 'gespiegelt / von oben'*.
- Die Visualisierung des Baukastens kennzeichnet daher als Orientierungshilfe die Ecke des 1. Oktanten mit einem Kreis. Bei Drehung des Würfels wandert dieser Kreis betrachtungskonform; eine Umschaltung des mathematischen Drehsinns (positiv/negativ) tauscht die Quadrantenlage drehrichtungskonform.

Bewegungsübung

Direkte Kinematik

Nach Generieren der Neu-Datei kennt der Roboter-Arm nur die Start-Position (DS 51). Sie können mit den Schiebern im rechten Maskenbereich die Roboter-Arme winken lassen; Rechts neben dem Schieber wird Ihnen der Winkelwert des Armes angezeigt.

- Evtl. werden im Direktbereich nicht alle der 12 möglichen Winkel-Schieber angezeigt. Welche angezeigt werden und welche Drehwinkel je Arm max. zulässig sind, wird im Supervisor-Bereich festgelegt. Wird der Schieber "in grau und ohne Handgriff" angezeigt, so wurde dieser Roboterarm als "Fix-Arm mit Drehwinkel 0°" parametrier.

Falls Sie Parameter ändern möchten, finden Sie Hinweise hierzu unter Supervisor-Info.

Wenn Sie die Maske etwas verschieben, wird neben der 3D-Grafik ein Info-Feld sichtbar. Hier werden die Koordinaten der Roboterarm-Gelenke im Kartesischen Koordinatensystem angezeigt, (gelb unterlegt, die Koordinate des Tool Center Points / End-Effektors).

Die Schieber weiter unten, im Feldbereich *Basis-Koordinate 'Portal'* verschieben den Roboter gegenüber dem Null-Punkt des Koordinatensystems. Beobachten Sie diese Bewegungen im Koordinaten-Info Feld.

Vermutlich stehen die Roboter-Arme und Schieber inzwischen "etwas chaotisch".

Im Maskenbereich "unten links" finden Sie einen Bereich *'Datensatz'*. Da Sie mit einer "Neu-Datei" arbeiten, wird hier die Datensatz-Nr. "51" angezeigt. Direkt links neben dem Anzeigefeld finden Sie ein Doppelpfeil-Paar, klicken Sie einmal *nach unten* und danach, *nach oben*. Angezeigt wird wieder der 'DS 51' – und zwar so, wie er ursprünglich geladen wurde.

- Ein Click *'unten/oben'* führt also immer in den Ausgangs-Datensatz zurück!

- Falls Sie sich die Roboter-Armstellung aus anderer Perspektive anschauen möchten: Etwas weiter unten finden Sie die Einstellungen für eine 3D Umrundung und Zoom!

Wenn Sie möchten, können Sie die in *'Direkter Kinematik'* erarbeitete Armstellung als Datensatz ablegen. Klicken Sie oberhalb der Schieber *'DS Neu'*. Falls Sie *'DS Korrektur'* klicken, werden Sie gefragt, ob Sie den vorhandenen Datensatz überschreiben wollen.

Inverse Kinematik

Wenn Sie in *'Direkter Kinematik'* versuchen, eine bestimmte Koordinate anzufahren, so ist dies ein mühseliges Unterfangen, warum das so ist, zeigt eine *'Strategie-Demo'*:

- Verlassen Sie das *'Control-Center'*, klicken Sie den Button *'Demo'* in der Grafik. Sie werden sehen, daß die *Inverse Kinematik* mehr als eine Lösung kennt.

Der Baukasten berechnet die Winkel der Gelenkarme entsprechend der Ihrerseits vorgewählten *'Strategie'* bzw. *'Silhouette'*. Die gewünschte Koordinate wird mit hoher Genauigkeit erreicht. Die absoluten Positionierfehler Soll/Ist des TCP liegen unter 1/10.000 mm, meist in einer Größenordnung von 10^{-5} bis 10^{-6} mm.

Bahngenerator

- Wählen Sie eine der Bewegungsstrategien 2) bis 7).
- Alternativ haben Sie die Möglichkeit, mit den Schiebern zunächst in '*Direkter Kinematik*' eine individuelle Armstellung zu finden, die Ihnen besser gefällt und den TCP "halbwegsgenau" positioniert. Wählen Sie im "Mittelfeld oben" als Bewegungsstrategie: '*1) SemiAuto (ähnlich)*'. Ihre von Hand halbwegsgenau vorgewählte Position wird in *ähnlicher Silhouette* der Knickarme auf Ihrer Wunschkoordinate (*Ziel-Position absolut*) mit o.g. Präzision bewegt. Auch hier haben Sie die Wahl, ob Sie Ihre von Hand vorgewählte Position überschreiben (*DS Korrektur*) oder als zusätzlichen Datensatz (*DS Neu*) anlegen wollen.
- Der Bahngenerator erlaubt es Ihnen, mathematisch jederzeit die Bewegungsstrategie / Silhouette zu ändern; mechanisch führt dies jedoch über eine Steckung des Armes - verbunden mit den im Tutorial erläuterten Problemen der Singularität! Setzen Sie diese Möglichkeit nur "sehr bewußt" ein.

Nehmen wir an, die Arme zeigen die gewünschte Silhouette.

Nun gilt es, die Arme zu bewegen; hier hilft der Bahngenerator.

- Da es etwas mühsam ist, immer wieder neue Arm-Koordinaten einzugeben, bewegen wir den Arm 'per Click' um einen Offset. Dieser berechnet die Neu-Position relativ zur Ist-Position.
- Der Offset ist als Wert vorwählbar. Hier sind die Strategien 1) bis 6) geeignet, Strategie 6 bewegt den TCP-Tragarm parallel zu sich selbst- (wie der Kellner das Tablett). Strategie 7 bewegt den TCP-Tragarm "teleskopisch", also in seiner 3D Vektor-Lage.
- Für die Strategien 6) und 7) sollten Sie in '*Direkter Kinematik*' eine "vernünftige" Ausgangslage vorwählen.
- Ab Version 5.6 verbindet ein 3D-Bézier-Kurven Generator weiter entfernte Stützpunkte mit einer "eleganten" Kurven Fahrt, auch präzise Kreise und Spiralen sind als Bewegungsbahn möglich.

Der Bahngenerator generiert die Stützpunkte der Bewegungsbahn interaktiv. Sie haben die freie Wahl ob Sie eine kontinuierliche Bahn mit kleinem Stützpunktabstand generieren oder lediglich "Pick & Place" Endpunkte anfahren wollen.

Singularität und Silhouette

Singularität wird mitunter als Horror-Szenario der Robotik beschrieben. Die RoBo-mac Algorithmen beherrschen das "Problem" (vgl. Tutorial) recht souverän. Der Bahngenerator überwacht die Gelenk-Arm Silhouette, erlaubt jedoch gezielte Änderung:

- Soll bei Beibehaltung der End-Effektor Orientierung und Position die Arm-Silhouette von 'Konkav' in 'Konvex' oder umgekehrt überführt werden, so wird der entsprechende Datensatz angefahren. In direkter Kinematik wird der Winkelwert 'D/E' negiert, (also der Absolutwert mit umgekehrtem Vorzeichen per Schieber eingestellt) und die Winkel der Achsen 'B/C' sowie 'F/G' um exakt diesen Winkelwert (also die halbe Winkel-Differenz 'D/E') mit 'original' Vorzeichen korrigiert. Beispiel: 'D/E' 'ist' = -3° . 'D/E' Korrektur = $+3^\circ$. Achsen 'B/C' sowie 'F/G' jeweils 'Ist-Wert' -3° .

Führt die Soll-Bahn durch Singularität, so generiert der Algorithmus *Inverser Kinematik* einen Warnhinweis. Um den Singularitätsbereich zu minimieren, fahren Sie die Knickarme in Richtung 'Streckung'.

- Kurz vor Eintritt der Singularität werden Sie die Fehlermeldung '*Position nicht erreichbar / Zielpunkt wird nicht angefahren*' bekommen. Wählen Sie eine geringere Distanz, nähern Sie sich dem Singularitätspunkt mit einer immer geringer werdenden Schrittweite an.

Singularitätspunkt außerhalb der Bahn

Das ist bitter! Falls der Roboter auf Portal verfahrbar ist, läßt sich der Bahnfehler kompensieren, vgl. 'Kombinierte Portal & Knickarm Robotik', ansonsten müssen Sie diesen Punkt außerhalb des Werkstück-Eingriffs legen

Orientierung des TCP bzw. End-Effektors

Meist ist es erforderlich, das Werkzeug nicht nur zu *positionieren*, sondern auch seinen Arbeits-Winkel präzise zu *orientieren* (vgl. Tutorial zur Begriffsdefinition).

- Grundsätzlich wird es nur möglich, Positionierung und Orientierung im 3D Raum ohne Einschränkung frei zu wählen, wenn mindestens 2 x 3 Freiheitsgrade (Arm: X/Y/Z) und (Handgelenk: U/V/W) mechanisch vorhanden und ohne gegenseitige Beeinflussung ansteuerbar sind.
- Wird lediglich eine senkrechte Ausrichtung des End-Effektors erforderlich, so bietet RoBo-mac für Roboter "ohne Handgelenk" durch entsprechende Gegendrehung der Achsen mit den Bewegungsstrategien 6 und 7 eine einfache Lösung:

In den Manual-Beispielen wird der End-Effektor / TCP von der Achse G/H gebildet, deren Orientierung durch die vorhergehenden Achsen bestimmt wird. Mit den Bewegungsstrategien 6) und 7) wird die Orientierung der Achse G/H beibehalten, wenn Sie eine neue Position wählen.

Senkrechte / horizontale Orientierung

- Hilfreich zur Kontrolle ist die Koordinaten-Übersicht unmittelbar rechts neben der Grafik.
- Für eine senkrechte Orientierung der Achse G/H sind deren X und Z-Koordinaten gleich,
- für eine horizontale die Y-Koordinaten.
- Wählen Sie den zu korrigierenden Datensatz oder fahren Sie den End-Effektor in '*Direkter Kinematik*' in seine "in etwa" Zielposition,
 - Speichern Sie das Zwischenergebnis per Button 'DS-Neu'.
 - Klicken Sie '*Übernahme Ist-Position*'
- Fügen Sie 3 Leer-Datensätze unter dem zu korrigierenden Datensatz ein.
- Erzeugen Sie einen "Hilfsdatensatz". Wählen sie hierzu den obersten Leer-Datensatz. Mit den Schiebern B/C, D/E, F/G stellen Sie eine senkrechte / horizontale Orientierung des End-Effektors G/H in beliebiger Position ein.
 - Beträgt die Winkelsumme 0° bzw. 180°, so steht er senkrecht, bei 90°/ 270° horizontal (Synchronisieren Sie die Schieber zuvor im jeweiligen Endanschlag auf Null, ansonsten sind Winkelabweichungen im "1/100 Bereich" nicht auszuschließen).
- In '*Direkter Kinematik*' klicken Sie mit diesen Winkelwerten 'DS Neu'.
- Wählen Sie '*Strategie bzw. Silhouette 6), parallel*'.
- In '*Inverser Kinematik*' klicken Sie 'DS Neu'.
- Sie erhalten einen neuen Datensatz mit der Position des Original Datensatzes bei senkrechter / horizontaler Orientierung des End-Effektors G/H.
- Löschen Sie den Original Datensatz, den Hilfsdatensatz, sowie den verbleibenden "Leer-Datensatz"; - er diene lediglich der Kennzeichnung des Korrekturbereiches!

"Bézier"- Orientierung

Der Bahngenerator (s.u.) erzeugt tangential in die Anschlußsegmente einlaufende 3D Bézier-Kurven.

- Tangenten berechnet der Bahngenerator aus der Differenz der Raumpunkte. Wenngleich der Algorithmus die Problematik "Division durch 0" beherrscht, sollten mindestens 2 von 3 Differenzwerten (X/Y/Z) den Betrag von 'einigen Zehntel' aufweisen. Werden 2 Differenzwerte "0" so kann dies in sehr unerwartete Kurven führen.
- Achten Sie darauf, daß für den Startpunkt der Bézier Kurve das Werkzeug vom Werkstück entfernt, für den Zielpunkt das Werkzeug dem Werkstück zugeführt werden muß. – Ansonsten läuft die Kurve in der falschen Richtung! Siehe hierzu auch: 'Positionierung & Orientierung'.

Wurden die Anschlußsegmente mit '*Strategie 7*), *teleskopisch*' erzeugt, so steht der End-Effektor in diesem Datensatzbereich ebenfalls tangential. Die '*Strategie 6*) *parallel*' übernimmt diese "auslaufenden Orientierung" – und behält sie bei. Allerdings wird diese Orientierung nur selten die Orientierung des Anschlußsegmentes der einlaufenden Bahn sein!

Um die Orientierung des Anschlußsegmentes auf die einlaufende Bézier-Bahn zu übertragen:

- Fügen Sie (zur Markierung) im unteren Drittel der Bézier-Bahn eine Leer-Zeile ein.
- Verlassen Sie das Control-Center, Sie befinden sich jetzt im Excel® Datenblatt.
- Löschen Sie mit den Excel üblichen Befehlen unterhalb der Leerzeile bis unmittelbar vor den Datensatz des Anschlußsegmentes die Werte der Spalte 1 (A).
- Rufen Sie das Control-Center auf.
- Klicken Sie die "vorwärts/rückwärts" Rast-Taste
- Wählen Sie '*Strategie bzw. Silhouette 6*), *parallel*'.
- Suchen Sie den Datensatz des Anschlußsegmentes auf.
- Klicken Sie im Bereich '*Koordinatenliste*' den Button 'DS-Schritt' bzw. 'DS-Automatic'.

Bei gleichbleibender Bézier-Bahn ändert diese Prozedur die Orientierung des End-Effektors. Im Übergangs-Bereich des "mittleren/letzten Drittel" der Bézier Kurve wird sich ein Orientierungssprung aus der Start-/Ziel Orientierung ergeben. "Verschleifen" Sie diesen Sprung durch einen kontinuierlichen Übergang der Orientierung im mittleren Kurvenbereich.

Rückwärtsfahrt

Sie haben soeben gesehen: Es kann Hilfreich sein, die Anfahrt eines Zielpunktes von diesem aus gesehen "rückwärts" zu generieren; - dies, in Kombination mit Bézier ermöglicht sehr elegante, zielführende Bewegungen des TCP / End-Effektors.

Nehmen wir an, der Zielpunkt läge um 100 mm in Y-Richtung versetzt über dem Startpunkt.

- Fahren Sie zunächst den Start-Punkt an. Sie haben 2 Möglichkeiten:
Entweder Sie geben die Datensatz-Nr. direkt in das Feld ein und klicken OK, der Datensatz wird angesprungen, oder Sie fahren ihn mit dem *Doppelpfeil-Paar 'oben/unten'* an.
- Nun werden die Koordinaten des TCP im Feld *'Ist-Position (absolut)'* angezeigt.
- Im Feld *'Ziel-Position (absolut)'* finden Sie den Button *'Übernahme Ist-Position'*, klicken Sie ihn und erhöhen Sie den Wert im Feld 'Y' um 100.
- Klicken Sie im Feldbereich *Datensatz* den Button *'Anschluß suchen'*.
- Aufgesucht wird der letzte Datensatz der bereits angelegten Datensatzgruppe.
- Klicken Sie im Feld *'Ziel-Position (absolut)'* den Button *'DS Neu'*.
- Sie erhalten den 'Start-Datensatz' mit um 100 versetzter Y-Koordinate.
- Klicken Sie im Feldbereich *Datensatz* den Button *'DS Einfügen'* mehrfach (z.B. 10-mal).
Zwischen dem Ziel-Datensatz und der bereits angelegten Datensatzgruppe haben Sie jetzt die Möglichkeit Datensätze vom Ziel aus gesehen rückwärts zu generieren:
- Klicken Sie im Feldbereich *Datensatz* die Rast-Taste *'vorwärts – rückwärts'*.
- Die Bedienerführung ändert einige Funktionstasten und Anzeigen in der Maske!
- Klicken Sie im Feldbereich *Datensatz* den Button *'Anschluß suchen'*.
- Aufgesucht wird jetzt der Ziel Datensatz.
- Der nächste Datensatz, den Sie "rückwärts" anlegen, wird jetzt unmittelbar vor die Ziel Datensatzgruppe gesetzt. Naturgemäß müssen die Daten, die Sie hier verwenden sich in Richtung "Start Gruppe" bewegen,
– kontrollieren Sie die Armbewegung mit den Datensatz *Doppelpfeil-Tasten 'oben/unten'*
- Sie werden 2 Datensatzgruppen (Startgruppe/Zielgruppe) generieren, zwischen denen noch einige Datensätze nicht genutzt wurden.

Sie haben nun 2 Möglichkeiten:

Entweder generieren Sie mit dieser Methode "zu Fuß" eine Verbindungsbahn zwischen den beiden Datensatz Blöcken der Start- und Zielgruppe oder Sie nutzen den Bézier Kurven Generator. Zur Bézier Vorbereitung löschen Sie alle leeren Datensätze bis auf einen, der Start- und Zielgruppe trennt.

- Falls mehrere leere Datensätze vorhanden sind, suchen Sie mit den *Doppelpfeil-Tasten 'oben/unten'* einen dieser leeren Datensatz auf. Klicken Sie im Feldbereich *Datensatz* den Button *'DS Löschen'*. Falls Sie einen Datensatz angesteuert haben, der Daten enthält, werden Sie gewarnt, diesen zu löschen.

Falls Sie die Verbindung selbst generieren wollen, müssen sie ggf. noch vorhandene Leer-Datensätze vollständig löschen.

Bahngeneratoren

Die Generatoren verbinden einen hohen Automatisierungsgrad mit der Möglichkeit interaktiver Korrektur. Sie beherrschen Kreise, zylindrische & archimedische Spiralen sowie 3D Bézier-Kurven. Prinzipiell ist die Bedienung beider Generatoren ähnlich. Den Generatorbereich finden Sie im Control-Center "mitte links", wählen Sie 'Bézier' bzw. 'Kreis & Spirale'.

Bahngenerator 3D-Bézier

Bézier Kurven laufen hoch präzise in ihren eigenen Tangentenpunkt ein;

- Mit lediglich jeweils 2 Stützpunkten am Ende/Anfang der zu verbindenden Segmente bestimmen Sie – vorzugsweise per '*Bewegungsstrategie 6) oder 7)*' die Orientierung der aus- bzw. einlaufenden Bézier Kurve.

Falls Sie, wie zuvor beschrieben die Start- und Zielgruppe "rückwärts" generiert haben, werden diese bereits durch eine Leerzeile getrennt, falls nicht:

- Bestimmen Sie zunächst die beiden Startpunkte, danach die beiden Zielpunkte. Die 3D-Grafik wird zwischen End- und Zielpunkt eine gerade Linie spannen.
- Prüfen Sie die richtige Position, fahren Sie den Roboterarm mit den Doppelpfeilen "Datensatz". Korrigieren Sie ggf. die Position und positionieren Sie den Cursor auf dem 1. Ziel-Datensatz. Klicken Sie den Button 'DS einfügen'.

Im Feld 'Bézier' finden Sie einen gleichnamigen Button, er führt als "Ein-Knopf-Bedienung" durch den Bézier Prozeß. Werden Dialogfragen jeweils mit 'Ja' beantwortet, so werden Bahn- und Knickarm-Berechnung in wenigen Sekunden fertiggestellt. Falls Sie 'Nein' klicken, wird der Prozeß beendet und die Ausgangssituation wieder hergestellt. Die dritte Möglichkeit 'Abbruch' unterbricht die Bézier Automatic. Klicken Sie den Button 'Bézier' erneut, um einen unterbrochenen Prozeß mit individuell geänderten Parametern fertigzustellen.

Der Bézier Prozeß ist zweigeteilt in eine *Vorschau*- sowie eine *Aktivierungs*-Phase, die durch den Click 'Abbruch' getrennt werden. Das Control-Center wird nun "inter-aktiv":

Vorschau

- Sie erhalten 3 Bahn-Vorschläge, aus denen Sie per 'Click' auswählen können. Jeden Vorschlag können Sie sich zunächst aus beliebiger Perspektive im Vergleich anschauen.
- 2 Doppelpfeil-Tasten ermöglichen es, die jeweils vorgeschlagene Bahn durch partielles *strecken und stauchen* Ihrer Wunschform individuell anzunähern. Beide Tastenpaare haben Einfluß auf die Gesamtkurve, das *linke* stärker auf den *Start*-Bereich, das *rechte* stärker auf den *Ziel*-Bereich der Kurve. Für beide Bereiche wird ein 'Formfaktor' angezeigt. Stehen beide Werte auf '0', so erhalten Sie eine Gerade, 1 entspricht dem Basis-Wert.
- Falls die Korrektur nicht gefällt und Sie den Original-Vorschlag wieder aufrufen wollen, klicken Sie 'Reset'.
- Prüfen Sie die Vorschau visuell am 3D-Modell. Ändern Sie ggf. Ihre Perspektive.
 - Die Perspektiv-Werte sind ohne Einfluß auf die generierte Bahn Bewegung.

Im Rahmen der Vorschau wird die "kinematische Realisierbarkeit" der vorgeschlagenen / interaktiv erzeugten Bézier-Bahnen *prognostiziert*. Sie erhalten detaillierte Rückmeldung.

- Diese Prognose ist (noch) keine präzise Durchrechnung! Diese erfolgt in der nachfolgenden Aktivierungs-Phase,
 - die jedoch nicht mehr "automatisch" zurückgesetzt werden kann.
- Falls Sie eine als "kritisch" prognostizierte Bahn im kinematischen Grenzbereich (probenweise) aktivieren wollen, so wird Ihnen empfohlen, den bisherigen Datensatz-Status vor der Aktivierung zu speichern;
 - Der Button 'Abbruch' führt direkt ins Control-Center zurück.

Aktivierung

Wird die Bahn in der gewählten Form aktiviert, so werden, - in '*Inverser Kinematik*' hieraus die Knickarm Bewegungen (20 Stützpunkte) berechnet.

- Meldet die Aktivierung, daß die Bahn nicht realisierbar ist, so ist es zielführend, die Datei "ohne Speichern" zu verlassen und den zuvor gespeicherten Status wieder aufzurufen.

Bahngenerator Kreise & Spiralen

Kreise erreichen nach einem 360° Umlauf Ihren Startpunkt, Spiralen drehen hierüber hinaus.

- Kreise werden durch 3 Punkte bestimmt – so lesen wir oft. Letztendlich wird ein Kreis durch seine Mittelpunktslage, seinen Radius und seine Orientierung im Vektorraum \mathbb{R}^3 definiert. Ein Kreissegment wird ergänzend durch seine "von bis" *Peripherie-Koordinaten* beschrieben. Diese Daten benötigt der Bahngenerator.
- Die "von bis" Koordinaten sind die (unter *Daten-Import*, s.u. beschriebenen) Datensätze (Spaltenbereich 2 bis 4).
Die Mittelpunktkoordinate wird in Ergänzung des Datensatzes "von" im Spaltenbereich 52 bis 54 (AZ bis BB) hinterlegt.
- Der Y-Wert der Mittelpunktslage entspricht dem des Start-Datensatzes (TCP); Abweichungen werden automatisch korrigiert. Parameter einer zylindrischen Spirale beziehen sich auf diesen Wert. Gleichsinniges gilt, wenn der Y-Wert des Zielpunktes von dem des Start-Datensatz abweicht: Der Höhenwechsel erzeugt ein zylindrisches Spiral Segment.
- Schrittweite und Drehrichtung bestimmt der Wert in Spalte 56 (BD). Eine positive Schrittweite (in Grad) kennzeichnet einen mathematisch positiven Drehsinn, ein negatives Vorzeichen einen negativen Drehsinn (Uhrzeiger Sinn).

Clicken Sie die Überschrift des Feldes 'Kreise & Spiralen'; der Button 'Kreis' erscheint, er führt als "Ein-Knopf-Bedienung" durch den Prozeß. Der Bahngenerator prüft mit dem ersten Click des Button 'Kreis' vorhandene Daten auf Vollständigkeit und Plausibilität.

Voll-Automatic-Mode

- Formales Kriterium für das Erkennen eines vollständigen Datensatzes ist es, daß o.g. Daten verfügbar sind und eine Leerzeile zwischen Start- und Zielkoordinaten das zu generierende Segment kennzeichnet.
- Vollständige & plausible Datensätze werden ohne Rückfrage / Vorschau verarbeitet.

Dialog-Mode

Sind die Daten unvollständig oder inplausibel, so wechselt der Bahngenerator in den Dialog-Modus. Zum Abschluß des Dialoges wird eine 3D-Vorschau gezeigt.

Der Dialog-Mode fragt nicht etwa die fehlenden Daten "1 zu 1" ab, sondern berechnet diese aus anderen Parametern bzw. klärt Inplausibilitäten.

- Bei nicht zentrischem Mittelpunkt werden Sie beispielsweise gefragt, ob Sie eine *Archimedische Spirale* generieren wollen oder der *Mittelpunkt zentriert* werden soll.
- Ist der Mittelpunkt unbekannt, so wird ersatzweise der Radius abgefragt. Aus den zwei sich rechnerisch ergebenden Mittelpunktlagen wird die gewählt, die der Hauptachse (A/B) näher liegt.
- Sind nur der *Start- und Mittelpunkt* nicht jedoch der *Zielpunkt* bekannt, so befinden sich mehrere Leerzeilen unter dem bereits fertiggestellten Datensatzblock. Der Generator berechnet den fehlenden Zielpunkt aus dem im Dialog abgefragten *Segmentwinkel*.
- Ist auch der Mittelpunkt nicht bekannt, so "*greift der Generator in die Trick-Kiste*": Aus dem *aktuellen* und dem *vorhergehenden* Datensatz wird eine Sehne gebildet.
 - Die Sehnenpunkte sollen nahe bei einander liegen, um einen "Quasi-tangentiellen" Einlauf in das Segment zu erreichen.
 - Für ein ebenes Segment, müssen die Höhenwerte der Sehnenpunkte auf demselben Niveau liegen, divergierende Werte generieren eine Spiral-Bahn.
- Die vom Bahngenerator vorgeschlagene Mittelpunktslage errechnet sich aus der Sehne sowie dem im Dialog festgelegten Radius. Der Vorschlag kann im Rahmen der Vorschau weiter bearbeitet werden.

Vorschau und 3D-Orientierung

Zum Abschluß des Dialoges wird eine Vorschau gezeigt. Sie können wahlweise die Bahn so akzeptieren, wie sie in der Vorschau gezeigt wird oder frei umorientieren. Der Generator erzeugt zunächst eine Basisorientierung: Kreise und archimedische Spiralen sind horizontal orientiert; zylindrische Spiralen stehen senkrecht. Diese Basisorientierung ist während der Vorschau visuell kontrolliert und interaktiv per 'Doppelpfeil-Taste' beliebig im Raum veränderbar.

Die Leistungsfähigkeit des Generators ist komplex,
sie wird daher stichpunktartig hier nochmals aus anderer Perspektive erläutert:

Kreisparameter per Datenimport

Nehmen wir an, Ihnen liege lediglich eine Koordinatenliste mit den Endpunkten der Kreis-segmente vor. Kopieren Sie diese wie unter 'Daten Import' beschrieben (s.u.) in den Spaltenbereich 2 bis 4 bzw. B bis D.

- Da die Daten nur die Endpunkte ausweisen, müssen zur Kreiskonstruktion dessen Mittelpunktslage, die Drehrichtung (mathematisch positiv/negativ) sowie die Schrittweite der Stützpunkte erfaßt werden. Der Bahngenerator wechselt in den Dialog-Modus:

Kreisparameter im Dialog

Nicht bekannte Kreisparameter werden in einem interaktiven Dialog abgefragt, Inplausibilitäten aufgezeigt. Ggf. werden Ihnen im zweiten Durchgang ihre bisherigen Angaben zur Bestätigung / Korrektur angezeigt.

Kreissegment,

gekennzeichnet durch eine Leerzeile zwischen Start- und Zielkoordinaten

- Das Programm erfragt ggf. Schrittweite und Drehsinn. Eine unbekannte Mittelpunktordinate wird aus dem Radius errechnet.

Freie Kreiswahl,

gekennzeichnet durch mehrere Leerzeilen unterhalb der Startkoordinaten

- Ist lediglich der Startpunkt, nicht aber der Zielpunkt des Kreissegmentes bekannt, so werden weitere Konstruktionsdaten,
- für eine Spirale zusätzlich die Steigung pro Umdrehung erfaßt.

Der Kreisgenerator informiert über hieraus errechnete Vorschlagskoordinaten. Sie können diese akzeptieren, korrigieren oder den Dialog abbrechen.

- Der Button 'Abbruch' kehrt stets in das Control-Center zurück.
- Der Button 'Ja' setzt den Prozeß fort. Er fügt die errechneten Datensätze der Kreisbahn entsprechend Ihrer Parameter ein.
- Der Button 'Nein' eröffnet entweder einen vertiefenden Dialog bzw. löscht die Bahn.

Auch dieser Prozeß ist zweigeteilt in eine *Vorschau*- sowie eine *Aktivierungs*-Phase, die durch den Click 'Abbruch' getrennt werden, um Parameter interaktiv zu ändern. Klicken Sie den Button 'Kreis' erneut, um mit Ihren geänderten Parametern den Prozeß fertigzustellen. Der Bahngenerator weiß, in welchem Prozeß-Schritt Sie sich befinden.

Vorschau Kreissegment

- Sind die Werte plausibel, so wird keine Vorschau angezeigt, sondern die Bahn unmittelbar aktiviert.

Vorschau Freie Kreiswahl & 3D-Orientierung

Zur visuellen Kontrolle wird zunächst eine Vorschau in horizontaler "Basis-Orientierung" gezeigt, die Sie per 'Doppelpfeil-Taste' beliebig im Raum "umorientieren" können.

- Drehpunkt des Bahnsegmentes ist stets der "Kreis-Einlauf" mit der Koordinate des TCP. Wahlweise wird das Segment um die X/Y/Z Orientierung, alternativ "*Bahn-spezifisch*" gedreht. Die Bezeichnungen der Doppelpfeil-Tasten ändern sich entsprechend.

Eine *Bahn-spezifische* Drehung wird von der horizontalen Vektorlage der Drehachse im \mathbf{R}^2 bestimmt. Die Bahn beschreibt Vektor abhängig wahlweise eine *Kugel* oder einen *Halbmond*.

- Die Doppelpfeil-Taste 'Höhe' bestimmt den Höhenwinkel,
- die Doppelpfeil-Taste 'Vektor' die horizontale Orientierung der Drehachse.
- Der Start-Wert '0' spannt einen Vektor zwischen TCP und Kreis Mittelpunkt, um den das Segment als "Groß-Kreis einer Kugel" beliebig gedreht werden kann.
- Ein 'Doppel-Click' auf den Button '*Bahn Lage*' spannt den Vektor zwischen Start- und Endpunkt des Segmentes, - die Segment-Drehung wird als "Halbmond" orientiert. Es gibt 2, jeweils um 180° versetzte "Halbmond" Vektoren; weitere 'Doppel-Clicks' wechseln zwischen beiden Vektoren.

- Hiervon bzw. von '0' abweichende Vektor Werte sind wählbar, führen jedoch in Kurvenlagen deren Orientierung *nicht sofort eingängig* nachvollziehbar ist:
Zusätzlich zur erwartungsgemäß horizontalen Bewegung aus horizontaler Vektor Umorientierung führt das Kreissegment eine *überlagerte Drehung um den TCP* aus.

Gedankenexperiment:

Wir nehmen einen (Hula Hoop)-Reifen in beide Hände und lassen ihn nach unten hängen. Je nach Abstand der Hände krägt ein unterschiedlich großes Teil des Reifens nach oben, das andere nach unten. Bei Maximal-Abstand bilden sich 2 Halbkreise (Vektorage "0").

Nun Halten wir den Reifen mit *zwei Fingern* der einen Hand fest (*Fest-Lager*) mit der anderen lose (*Los-Lager*). Wir bewegen das *Los-Lager* auf das (ortsstabil gehaltene) *Fest-Lager* zu bzw. von ihm weg:

Der Reif wird sich (zwischen den beiden Fingern) um das *Fest-Lager* (TCP) drehen, "Antrieb" ist die Änderung der Sehnenlänge.

Das Ganze in der Horizontalen:

Ein von 0 abweichender Vektor Wert ändert nicht nur die Orientierung der Drehachse, sondern verkürzt ebenfalls die Sehnenlänge zwischen TCP und Los-Lager, dem "Antrieb" der *überlagerten Drehung um den TCP*.

- Der "Halbmond" Vektor ist ein besonders markanter Wert.

Testen Sie studienhalber ein mit 358° nahezu geschlossenes Kreissegment

- Wählen Sie eine perspektivische Betrachtung senkrecht von oben,
- Wählen Sie einen nicht ganz senkrechten Höhenwinkel, z.B. 80° oder 100°, Sie sehen das Kreissegment in einer "elliptischen Kontur".
- Ändern Sie den Vektor Wert bei konstant gehaltenem Höhen Winkel:
Das Kreissegment bewegt sich "Lasso-artig" um den TCP.

- Hinweis:
 - Archimedische Spiralen drehen wie die oben beschriebenen Kreissegmente.
 - Zylindrische Spiralen drehen erwartungsgemäß um den Mittelpunkt (Vektor Wert 0°), nicht jedoch als "Halbmond".
- 'Reset' ruft die "Basis-Orientierung" auf.
- Falls das Ergebnis nicht Ihren Vorstellungen entspricht, kann es in der Vorschau-Phase, - nicht jedoch nach Aktivierung - "automatisch" zurückgesetzt werden.
- Die Prozeß-Führung empfiehlt Ihnen daher ggf., den bisherigen Datensatz-Status vor der Aktivierung zu speichern.

Aktivierung

Sollte sich erst nach Aktivierung der Vorschau zeigen, daß die Ergebnisse nicht Ihren Vorstellungen entsprechen, so kann die Bahn nicht "automatisch" zurückgesetzt werden.

- In diesem Fall ist es zielführend, die Datei "ohne Speichern" zu verlassen und den vorherigen Status wieder aufzurufen.

Das *Labyrinth von Chartres*

Das *Labyrinth von Chartres* fasziniert mich, weil es zwar symmetrisch wirkt, aber nicht ist!

Das Übungs-Beispiel '*Labyrinth von Chartres*' zeigt die Kreisbahnberechnung aus einer bereits aufgearbeiteten Koordinatenliste. Die Koordinaten der Kreissegmente werden nacheinander "Segment für Segment" aufgerufen und der *Ariadnefaden* Schritt für Schritt verlegt. Aus 70 Konstruktionspunkten berechnet der Bahngenerator zunächst die Laufbahn und hieraus in Inverser Kinematik die Winkel der Gelenkarme (Demo-Datei im Download Paket).

Unter <https://bloggermymaze.wordpress.com/2018/12/30/ein-roboter-zeichnet-den-ariadnefaden-im-labyrinth-von-chartres/> zeigt der Labyrinth-Profi, Herr Erwin Reißmann eine kontinuierliche Verlegung des Fadens.

Begriffsdefinition

- Der Generator errechnet aus den Zielkoordinaten der Koordinatenliste die kinematischen Bewegungsdaten und fügt zusätzliche Datensätze ein. Aus Sicht *Inverser Kinematik* sind beide – unabhängig von ihrem Ursprung – gleichwertig. Um im Folgenden die Begriffe auseinanderhalten zu können, führen die Zielkoordinaten der Koordinatenliste den Begriff *Zielkoordinate* (ZK ...)

Die im Beispiel generierte Labyrinth Bahn besteht bei 34 Mittelpunkten aus 64 unterschiedlichen Kreissegmenten und wenigen Geraden mit jeweils tangentialem Übergang. Sie wird mit ca. 950 Bahnpunkten beschrieben, zentrische Kreissegmente werden mit größerer Schrittweite als nicht zentrische durchlaufen, vgl. Tutorial *Linearität & Oberwelle*. Die Labyrinthfahrt erfordert rund 360° Drehwinkelfreiheit der Hauptachse A/B. Vor Eintritt in das Labyrinth wird sie daher aus der Null-Stellung (Home) um ca. 180° in die Winkel-Endlage gedreht. Diese Drehung sowie Umorientierung des End-Effektors erfolgen während der Bézier-Anfahrt.

Sie finden im Datenpaket das Beispiel der vollständigen Labyrinth-Fahrt sowie eine Übung, um "Chartres" aus den vorbereiteten Koordinaten selbst zu generieren.

- Im Übungsbeispiel sind die Bézier-Bahn und die Einlaufgerade in das Labyrinth bereits fertiggestellt. Zwischen diesen fertigen Datensätzen und den zu generierenden befindet sich eine Leerzeile. Klicken Sie im Control-Center den Button 'Kreis'. Der Programmgenerator sucht diese Leerzeile auf. Aus den Koordinaten des vorhergehenden und des folgenden Datensatz sowie den Mittelpunkt-Koordinaten und einer Dreh- / Laufrichtungs-Information berechnet er Segmentwinkel und Schrittweite 'per Click'. Klicken Sie!

Nach Fertigstellung eines Segmentes wird eine neue Leer-Zeile automatisch eingefügt, um die bereits fertig gestellten Datensätze von den noch zu bearbeitenden zu trennen.

Die Benutzerführung ermöglicht einen kontinuierlichen Prozeß durch wiederholtes Drücken der *PC-Tastatur-Taste 'Return'* nach jedem Arbeitsschritt.

Wenn Sie die Zielkoordinate 7 erreichen, erhalten Sie eine Fehlermeldung. Diese Koordinaten kennzeichnen kein Kreissegment, sondern eine Gerade. Schauen wir uns dies näher an: Im Fall der Geraden sind naturgemäß keine Kreis-Koordinaten hinterlegt. Die Antwort 'Abbruch' verläßt den Kreis-Bahngenerator.

Nun gibt es zwei Möglichkeiten

Zunächst der konventionelle Ansatz:

Weiter geht es in Inverser parallel Kinematik (Strategie 6)

- Der Cursor kennzeichnet den Start Datensatz der Geraden, er steht unmittelbar über der automatisch eingefügten Leer-Zeile. Falls Sie zwischendurch einen anderen Datensatz gewählt hatten, klicken Sie den Button 'Anschluß DS suchen'!
- Suchen Sie die Leer-Zeile auf, fügen Sie ca. 10 Leerzeilen für die zu generierende Gerade ein und klicken Sie erneut 'Anschluß DS suchen'. Die Koordinaten des Start-Datensatzes der Geraden werden als Ist-Position ausgewiesen.
- Übernehmen Sie in Inverser Kinematik die Start-Koordinate, korrigieren Sie den X-Wert auf '300' und klicken Sie 'DS-Neu'.
- Wählen sie in Inverser Kinematik einen Offset von $X = 25 / Y = 0 / Z = 0$, klicken Sie (um den Offset vom Istwert abzuziehen) die Pfeiltaste 'nach unten' 5 mal (Alternativ: $X = -25 /$ Pfeiltaste 'nach oben'). Der End-Effektor steht jetzt in Position $X = 175$
- Wählen Sie die Leer-Zeile unter den soeben fertiggestellten Datensätzen.
- Klicken Sie 'DS-löschen' mehrmals bis die Koordinaten des anschließenden Bogen-segmentes (Koordinatensatz 8) unmittelbar an die fertig gestellten Datensätze anschließen.
- Vermutlich steht der Arm jetzt in 'Home-Position' (senkrecht nach oben),
- klicken Sie 'Anschluß-DS (suchen)', - das synchronisiert Datensatz und Kinematik.
- Klicken Sie den Button 'DS-Schritt', die Armstellungen werden berechnet.

Fast geschafft.

Hört sich schlimmer an, als es ist. Mit etwas Übung brauchen Sie hierfür eine knappe Minute.

Wenn Sie jetzt den Button 'Kreis' klicken, erhalten Sie den Hinweis der Bedienerführung, daß Sie zwischen dem aktuellen, soeben fertiggestellten Datensatz (8) der Geraden und dem Folgenden (9) eine Leer-Zeile einfügen müssen.

Es geht – ab Version 6.0 – aber auch einfacher,

wenngleich etwas tricky und etwas weniger präzise:

"Gerade-Kurzstrecken" lassen sich als Kreissegment annähern, wenn der Radius im Verhältnis zur Sehne sehr lang wird.

- Wird der Einfachheit halber der Radius mit "1000 x Sehne" angesetzt, so beträgt der absolute Fehler: $1000 - (1000^2 - 0,5^2)^{-0,5} = \text{ca. } 0,00025 \times \text{Sehnenlänge}/2$.
- Der Fehlerwert ist von der gewählten Radiuslänge direkt abhängig.
- Die Längen Differenz aus Zielkoordinatenpaar (ZK 7/8) beträgt $X = 327,6 - 162,5 = \text{ca. } 165$. Bei einem Radiuswert von 165.000 liegt die max. Fehlerabweichung entsprechend bei ca. 0,02. Bei einem Radiuswert von 165.000.000 bei 0,00002!

- Geben Sie als Schrittweite den Wert "1" als Platzhalter ein.
 - Der Wert ist falsch und wird automatisch radiusabhängig korrigiert,
 - die "richtige" Drehrichtung wird ebenfalls automatisch ermittelt.

Die Drehrichtungsautomatic hat eine sehr hohe (im Chartres-Beispiel eine 100%) Trefferquote. Eine falsche Drehrichtung führt jedoch in eine ebenfalls falsche Orientierung der Geraden. Im Rahmen der Vorschau wird Ihnen das Ergebnis visuell angezeigt. Verändern Sie ggf. über die XYZ Korrektur die Y-Orientierung um 180°, die Gerade steht nun in der erforderlichen Ausrichtung.

Im weiteren Generierungsprozeß des Labyrinths werden Sie *Fehlermeldungen* und *Korrekturempfehlungen* (Zielkoordinate 47 / 53 / 57) erhalten.

- Der Generator hat (im Fehler-Beispiel) eine zum Segment nicht zentrische Mittelpunktslage detektiert. Entscheiden Sie, ob Sie den Mittelpunkt zentrieren oder eine archimedische Spirale erzeugen wollen. Testen Sie "zum kennenlernen" beide Varianten.

Im Focus der Zielkoordinate 47 lernen Sie einige Prüfdialoge kennen, bei ZK 53 bzw. 57 geht es schneller. Wenn Sie im Chartres Beispiel die Zielkoordinate 63 erreichen, führt hier eine Gerade durch das Labyrinth. Der Kreisgenerator meldet erneut einen Fehler.

- Sie hatten weiter oben gelernt, wie eine Gerade erzeugt wird. Jetzt ist es etwas komplizierter, denn der Fußpunkt des Roboters steht im Zielpunkt des TCP. Der Fußpunkt muß daher in '*Portal-Kinematik*' verfahren werden. Es überlagern sich 2 Bewegungen!

Wir lösen die Aufgabe in mehreren Schritten.

- Arbeiten Sie zunächst einmal weiter wie bisher. Wenn Sie die aus dem Zielkoordinatenpaar (ZK 69/70) generierten Datensätze aktivieren, erhalten Sie eine Fehlermeldung.
- Verlassen Sie das '*Control-Center*' und speichern Sie die Datei ab.
- Mit den Excel üblichen Befehlen löschen Sie unterhalb Zielkoordinate 63
 - im Spaltenbereich 5 bis 50 (E bis AX) alle bisher erzeugten Bewegungsdaten
 - sowie ebenfalls die Silhouetten-Kennung in Spalte 1 (A).
 - Es verbleiben also lediglich die Sollkoordinaten im Spaltenbereich 2 bis 4 (B bis D)
 - sowie die Mittelpunktskoordinaten und Schrittweite, Spalten 52 bis 56 (AZ bis BD).
- Mit den Excel üblichen Befehlen generieren Sie jetzt den *Portal-Offset*.
 - speichern Sie die Datei zunächst unbedingt; unter "Fehler Falle" lesen "*warum*"!
 - Geben Sie im ersten, *teilgelöschten* Datensatz unter ZK 63 die *Portal-Kordinate* XYZ in Spaltenbereich 7 bis 9 (G bis I) ein.
 - Beginnen Sie mit -5/0/0. Der nächste Datensatz erhält -10/0/0, es folgt -15/0/0 etc.

Der Portalschlitten erhält also eine von Datensatz zu Datensatz inkrementierende Bewegung mit dem X-Wert *minus* 5. Sobald Sie den Wert -280/0/0 erreicht haben, (das ist nach 56 Inkrementen) behalten Sie den Offset (-280/0/0) für die folgenden Datensätze bei.

- Wahlweise können Sie jeden dieser Datensätze mit dem Offset (-280/0/0) kennzeichnen oder den Bereich vollständig frei lassen. Der Generator füllt freie Offset-Daten automatisch mit den Daten des Vorgängers, wenn der Offset von 0/0/0 abweicht.

Fehler-Fälle

- Achten Sie darauf, daß der erste Portal-Offset (-5/0/0) im ersten, zuvor in Teilbereichen gelöschten Datensatz beginnt.
- Falls Sie den Offset im letzten, bereits fertiggestellten Bewegungsdatensatz eintragen stimmen die kinematischen *Ist*-Winkelwerte nicht mehr mit den *nachträglich geänderten Soll* Daten überein. Die Koordinatenprüfung detektiert bei Aufruf des *Control-Centers* diesen Fehler.
- Einschließlich der Lösungsprozedur ist diese Sicherheitsprüfung im Supervisor Bereich des Manuals unter '*Parameter & Datenkonformität*' beschrieben.

Um ggf. ohne diese Prozedur weiterarbeiten zu können, verlassen Sie die Datei ohne zu speichern und greifen auf den zuvor gespeicherten Arbeitsstand zurück

Rufen Sie jetzt das '*Control-Center*' (ggf. erneut) auf.

Das Labyrinth wird gezeigt, der Roboterarm steht am Ende der bisher erzeugten Bahn.

- Klicken Sie im Bereich 'Koordinaten Liste' (Mitte des '*Control-Centers*' den Button 'DS-Automatic'.

Diese Funktion liest Ziel- und Portal Koordinaten der Spaltenbereiche 2 bis 4 (B bis D) sowie 7 bis 9 (G bis I). Falls Sie (im Beispiel ab Portal-Koordinate X = -280) den Spaltenbereich 7 bis 9 (G bis I) leer gelassen haben, wird die Koordinate des vorherigen Datensatzes automatisch übernommen.

- In Inverser Kinematik wird unter Berücksichtigung des *Portal-Offsets* die Winkelstellung der Arme aus dem TCP Ziel-Wert als *überlagerte Bewegung* für alle Datensätze des gestammten Datensatzblocks berechnet.

Programmtechnisch entspricht diese Prozedur den Optionen "Daten-Import" & "Automatic-Bahn".

Daten Import

Nehmen wir an, Ihnen stehen die Soll-Koordinaten einer Bewegungsbahn aus einem CAD/CAE Programm zur Verfügung.

- Kopieren Sie diese in den Spaltenbereich 2 bis 4 bzw. B bis D.
- Wählen Sie in '*Direkter Kinematik*' eine "vernünftige" Startposition - sowie eine Bewegungsstrategie. Der Rest ist bekannt:
- Klicken Sie im Bereich Koordinaten-Liste '*DS Schritt*' bzw. '*DS Automatic*'. Die Armwinkel werden aus der CAD/CAE Bewegungsbahn generiert.

In die zweite Hälfte der Datei "Demo-Arm" (Datensätze ab 400) wurden per 'copy & paste' Bewegungskurven importiert, die ein externer Bézier-Spline Generator erzeugt hat (vgl. http://www.cnc-mac.de/html/bezier_spline.html).

- In der Demo wird der X-Achsen Fußpunkt des Roboters auf Portal verfahren, da die Kurven ansonsten außerhalb des Roboter-Arbeitsbereiches lägen. Die Werte der Portal X-Achse wurden aus den X-Werten der Splines abgeleitet.

Automatic-Bahn

Nehmen wir an, Sie haben eine Bewegungsbahn generiert, die Sie räumlich versetzt mehrfach nutzen wollen:

- Die Ist-Koordinaten der generierten Bahn werden vom Programm im Spaltenbereich 14 bis 16 (N bis P) je Datensatz abgelegt.
- Verlassen Sie das '*Control-Center*' – speichern Sie Ihr Zwischenergebnis.
- Mit den Excel-üblichen Befehlen erzeugen sie aus den *Ist*-Koordinaten weitere *Soll*-Koordinaten unterhalb der bereits generierten Datensatz Gruppe (Spaltenbereich 2 bis 4 bzw. B bis D). Um z.B. dieselbe Bewegung "in Y um 100 versetzt" zu generieren, addieren Sie per Formel zu den Y-Ist-Daten den Wert 100, für eine weitere Parallel-Bahn 200 etc.
- Rufen Sie erneut das '*Control-Center*' auf. Ihr letzter Datensatz, der bereits Ist-Koordinaten und Winkel enthält wird aktiviert.
- Klicken Sie (unterhalb des Bereiches zur Wahl der Bewegungsstrategie) im - Feldbereich *Koordinaten-Liste* den Button '*DS Schritt*' bzw. '*DS Automatic*'.
 - Die zur Ist-Bewegungsbahn parallelversetzte Soll-Bahn wird automatisch generiert.

Die erste Hälfte der Datei "Demo-Arm" ist in einigen Minuten nach diesen Verfahren generiert worden.

Zu guter letzt

Üben Sie! Diese Zeilen hören sich komplexer an, als das Ganze ist.

- Klavier spielen, Motorrad fahren und der Bahngenerator haben eins gemeinsam:

Übung macht den Meister!

Schauen Sie sich die Datei '*Demo-Arm_Bezier*' aus mehreren Perspektiven an, klicken Sie die Stop-Taste und fahren Sie die Armbewegung mit den Doppelpfeil-Tasten des Bereichs Datensatz schrittweise nach.

- Oder gehen Sie mutig die kinematischen Stolperfallen der "Ei-Ablage" an.

Tip:

Wenn Sie das Daten-Modul unmittelbar nach Verlassen des Control-Centers speichern, wird die aktuell angezeigte Spur "sichtbar" gespeichert und sofort nach erneutem Aufruf der Datei angezeigt, - das kann u.U. hilfreich sein.

Falls Sie (auf Aufforderung Excels®) die Datei danach erneut speichern, wird die Spur "unsichtbar" gespeichert und erst mit Aufruf des Control-Centers aktiviert.

Ei-Ablage,

- ein Gedankenexperiment und praktische Kinematik

Sie finden hier Stolperfallen und Lösungen!

Nehmen wir die etwas theoretische Übung, Eier aus einem klassischen Eier-Karton (5 auf 6 im Rechteck), mehrere Kartons (übereinander gestapelt) horizontal liegend zu entnehmen und "Fach für Fach" in ein an der Wand befestigtes Regal zu schieben. Wir werden feststellen:

- Als Greifer erscheint (vermutlich) ein Vakuum-Sauger geeignet.
- Die Eierkartons liegen horizontal, die Eier einer Lage somit in der Ebene.
So der Arbeitsbereich der kaskadierten Knickarme die Fläche der Eierkartons abdeckt, muß der Greifer zunächst oberhalb des Eies mittig in der XZ Koordinate platziert und danach abgesenkt werden. Eine "Schräganfahrt" erscheint Ei-kritisch!
Kinematisch ist dies mit einem SCARA oder einem Knickarm-Roboter "in Parallelen Bewegungsebenen" möglich.
- Problematischer erscheint die Ei-Ablage:
 - Im einfach beherrschbaren Fall stehen im Regal lauter Eierbecher die "von oben" beladen werden. Da das Regal aus mehreren Etagen besteht, muß der Roboterarm lediglich zwischen die Regalböden greifen – ohne zu kollidieren.
 - Schwieriger wird es, wenn das Regal aus kleinen Fächern besteht, die exakt "von vorne, *senkrecht zur Arbeitsebene*" angefahren werden müssen. Um diese Bewegung kinematisch zu beherrschen müssen alle *Schwenkachsen kombinierte Dreh-Schwenkachsen* sein. Nur so können Winkel-Drehungen in transversale Parallel-Bewegungen überführt werden.
- Das ist teuer!
 - Kostengünstiger ist es, den Roboter auf Portal zu verfahren; dies führt uns zum klassischen Regal-Bediengerät!

Wir konzentrieren uns auf den Lösungsansatz mit Portal und wir nutzen den Bahngenerator. Die Eier haben im Palettenkarton einen Achs-Abstand von ca. 48,7 mm (um unser Übungsexperiment besser mental nachvollziehen zu können, runden wir auf 50,00 mm auf)

- Der Roboter-Fuß auf Portal stehe in Position $X = 0 / Z = 0$
- Das "Start-Ei" in Position $X = 50 / Y = 200 / Z = 50$ entsprechend $XYZ = 50/200/50$

Als Basis unserer Bewegungsübung nehmen wir die Datei "Demo-Arm_EI-Ablage", die bereits einige Start und Übungs-Datensätze enthält oder die Datei "Demo-Arm_Bezier" und speichern sie unter "Demo-Arm_Ei". Bis auf Datensatz 51 löschen wir alle übrigen und rufen das Control-Center auf. Die 3D Grafik zeigt die bekannte Grundstellung.

- In 'Direkter Kinematik' verstellen wir den Winkel 'F/G' auf -53° , Arm 'G/H' steht jetzt senkrecht nach unten (Die -53° ergeben sich aus den übrigen Armstellungen, im Beispiel: $-90^\circ + 37^\circ$). Der Button 'DS Neu' speichert diesen Datensatz (DS 52).
- In Inverser Kinematik geben wir als Zielposition absolut $XYZ = 50/250/50$ ein und klicken, diesmal im Feld-Bereich 'Inverse Kinematik' den Button 'DS Neu'. Die Plausibilitätsprüfung merkt, daß wir noch keine Bewegungsstrategie eingegeben haben und fordert hierzu auf. Wir wählen 'Strategie 6) parallel' und klicken erneut im Feld-Bereich 'Inverse Kinematik' den Button 'DS Neu'; – und erhalten schon wieder eine Fehlermeldung:

- Zielposition außerhalb der Reichweite.
- Das Problem ist der kartesische Z-Wert '50'. Erreichbar wäre z.B. ein Z-Wert '75'. Ein "Sprung" über diese Distanz führt jedoch in die Überschlagsproblematik der Singularität (vgl. DS 53). Zu vermeiden ist ungewollte Singularität durch eine kinematisch enger geführte Bahn höherer Stützpunktzahl. Beispielsweise *relativ* berechnet mit einem Offset $X = -100 / Y = +50$ und daran anschließender absolut Positionierung (vgl. DS 58).
- allerdings steht der End-Effektor im Beispiel jetzt 25 mm daneben!
- Die Lösung: Schieben Sie den Eier-Karton weiter weg oder geben Sie einen Portal-Offset. z.B. -375 ein. Jetzt werden Sie Erfolg haben! Der Arm 'G/H' steht weiterhin senkrecht!
- Das Demo Beispiel zeigt beide Lösungswege:
DS 54 und DS 60 wiederholen jeweils die Ausgangsposition DS 52.
DS 61 zeigt dieselbe kinematische Position wie DS 59, jedoch "schneller"!
- Endlich: Der Arm 'G/H' steht in Greifposition 50 mm über dem Ei. Wählen Sie die '*Strategie 7) teleskopisch*' und einen Hub von 20 mm, klicken Sie den Doppelpfeil 2 mal. In diesem Fall den Pfeil nach oben, weil der Arm Vektor nach unten zeigt.
 - Der Pfeil 'nach oben' bewegt den Arm 'G/H' in positiver Vektor-Richtung, der Pfeil 'nach unten' entgegengesetzt.
- Der Arm 'G/H' steht in Greifposition 10 mm über dem Ei, verringern Sie den Hub (auf z.B. 7 / 3 mm) und klicken erneut Pfeil 'nach unten'.
- Der Arm 'G/H' steht in Greifposition 0 mm über dem Ei, schalten Sie den Vakuum-Sauger ein (Diese Funktion ist nicht Bestandteil des kinematischen Simulationsprogramms).
- Der Arm 'G/H' steht 0 mm über dem Ei – und saugt.
- Um das Ei sicher zu übernehmen bewegt sich der Sauger horizontal +/- 1 mm hin und her.
- Fahren Sie in Strategie 7) zunächst mit kleinerem, dann größerem Hub nach oben.
 - Die Bewegungsrichtung liegt diesmal entgegen der Vektor-Lage des Arms G/H, Sie müssen den Pfeil 'nach unten' klicken!

Sobald das Ei hoch genug gehoben wurde und sich außerhalb des Kollisionsbereiches mit den anderen Eiern befindet, können Sie die Zielfahrt einleiten. Wir wollen das Ei in einer senkrecht stehenden Regalwand ablegen. Jede Zielposition legen wir kartesisch fest.

- Die Basis-Kinematik eines Knickarm-Roboters beruht auf kreisförmigen Bewegungen. Um das Regal "exakt von vorne, senkrecht zur Arbeitsebene" anfahren zu können, benötigen wir entweder einen Roboter mit mehreren '*kombinierten Dreh-Schwenkachsen*' oder einen kostengünstigeren auf Portal. Für diese Lösung hatten wir uns entschieden.

Die Datei "Demo-Arm_EI-Ablage" endet hier mit DS 75.

Unser Ei schwebt noch über dem Karton. Per Portal fahren wir in '*Direkter Kinematik*' den Fußpunkt des Roboters in die kartesische Position, die eine senkrechte Orientierung des Roboters- "End-Effektors" vor der Regalwand ermöglicht, speichern diese Position aber nicht. In Inverser Kinematik geben wir den kartesischen Absolutwert ein und klicken '*DS Neu*'.

- Zeitgleich bewegen sich die Gelenkarme und das Portal den Fußpunkt. Aus der Überlagerung beider Bewegungen wird die Kartesische Ziel Position angefahren.

Sie haben das Ei mit '*Strategie 7) teleskopisch*' aus dem Karton gehoben, um es nun in Richtung auf das Ziel zu bewegen, sollten Sie '*Strategie 6) parallel*' wählen. Die Vektorlage des Arms 'G/H' wird parallel zu sich selbst bewegt. Der Arm zeigt weiterhin senkrecht nach unten.

- Die Befehlsfolge zur "Ei-Ablage" verlaufen wie oben beschrieben, "nur umgekehrt".

Das nächste Ei

- Der leere Roboterarm fährt in '*Strategie 6) parallel*' über die nächste Position des Eierkartons.
- Die Senkrecht-Bewegung zur "Ei-Aufnahme" hatten Sie mit '*Strategie 7) teleskopisch*' generiert. Natürlich können Sie dies jetzt genauso wiederholen.
- Einfacher ist es, das 'Control-Center' zu verlassen und mit den Excel-üblichen Befehlen aus den "Ist-Bewegungen des ersten Eies" – gespeichert im Datensatzbereich der Spalten 14 bis 16 bzw. 'N/P', Zeilen 62 bis 76 eine parallelversetzte Soll-Bewegungen im Spaltenbereich 2 bis 4 bzw. 'B/D' per Formel zu generieren.

Clicken Sie den Button 'DS Schritt' bzw. 'DS Automatic'. Die Bewegungsstützpunkte Ihrer Soll-Datenliste werden gelesen und hieraus die Bewegung zur Aufnahme des 2-ten Eies berechnet. Da die Soll-Daten Absolutwerte sind, wählen Sie: '*Strategie 6) parallel*'.

Viel Erfolg.