

# **ROBOTICĂ DE PRECIZIE**

Lucrare apărută cu sprijinul și sub atenta îndrumare  
a doamnei Gabriela Udrea

**LAURENȚIU ADRIAN CARTAL  
TUDOR CĂTĂLIN APOSTOLESCU**

# **ROBOTICĂ DE PRECIZIE**



**EDITURA UNIVERSITARĂ  
București**

Colecția ȘTIINȚE EXACTE

Redactor: Laura Nicolescu  
Tehnoredactor: Ameluța Vișan  
Coperta: Monica Balaban

Editură recunoscută de Consiliul Național al Cercetării Științifice (C.N.C.S.) și inclusă de Consiliul Național de Atestare a Titlurilor, Diplomelor și Certificatelor Universitare (C.N.A.T.D.C.U.) în categoria editurilor de prestigiu recunoscut.

**Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României**  
**CARTAL, LAURENȚIU ADRIAN**

**Robotică de precizie** / Laurențiu Adrian Cartal,  
Tudor Cătălin Apostolescu. - București : Editura  
Universitară, 2024

Conține bibliografie  
ISBN 978-606-28-1871-5

I. Apostolescu, Tudor Cătălin

62  
681.5

DOI: (Digital Object Identifier): 10.5682/9786062818715

© Toate drepturile asupra acestei lucrări sunt rezervate, nicio parte din această lucrare nu poate fi copiată fără acordul Editurii Universitare

Copyright © 2024  
Editura Universitară  
Editor: Vasile Muscalu  
B-dul. N. Bălcescu nr. 27-33, Sector 1, București  
Tel.: 021.315.32.47  
www.editurauniversitara.ro  
e-mail: redactia@editurauniversitara.ro

Distribuție: tel.: 021.315.32.47 / 0745 200 718/ 0745 200 357  
comenzi@editurauniversitara.ro  
www.editurauniversitara.ro

## CUPRINS

Capitolul 1. Prezentarea generală a programului SolidWorks Motion ...	11
1.1. Elemente de simulare.....	15
1.2. Acționarea cu motoare.....	16
1.3. Utilizarea forțelor.....	23
1.4. Folosirea arcurilor.....	25
1.5. Amortizoare liniare sau torsionale.....	26
1.6. Contactele 3D .....	27
1.7. Forțele gravitaționale .....	29
1.8. Calculul simulării.....	30
1.9. Calculul și afișarea unor parametri cinematici și dinamici ai simulării (rezultate ale simulării).....	33
1.10. Constrângerile.....	37
1.10.1. Constrângerea CONCENTRICITATE .....	38
1.10.2. Constrângerea „punct cu punct” .....	39
1.10.3. Constrângerea „blocare” .....	39
1.10.4. Două constrângeri de tipul „față pe față” .....	39
1.10.5. Constrângerea „universală” .....	39
1.10.6. Constrângerea de tip șurub .....	40
1.10.7. Constrângerea „punct pe axă”.....	40
1.10.8. Constrângerea paralelism.....	40
1.10.9. Constrângerea perpendicularitate .....	40
Capitolul 2. Exemple aplicative .....	41
2.1. Mecanismul piston-arbore cotit .....	41
2.2. Amortizorul de ușă.....	47
2.3. Mecanism bielă-manivelă.....	53
2.4. Mecanism bielă-manivelă-variantă.....	59

2.5. Ansamblu cu camă și tchet oscilant .....	62
2.6. Ansamblu transportor cu împingător - mecanismul .....	68
2.7. Ansamblu transportor cu împingător - mișcare piese .....	75
2.8. Ansamblu robot – Assembly Motion.....	83
2.9. Ansamblu robot – Motion Analysis.....	86
2.10. Ansamblu mână mecanică cu camă.....	92
2.11. Capota rabatabilă a unui autoturism.....	96
Bibliografie .....	104

## CUVÂNT ÎNAINTE

*Niciodată nu vom uita pe cineva important din viața noastră  
ci doar învățăm să trăim fără el*

*Profesorul Udea Constantin nu a încetat niciodată să încerce, să ne învețe, nu s-a temut niciodată de eșec, căci orice realizare începe cu decizia de a încerca. A pus bazele roboticii, cutezător și vizionar, a făcut parte din grupul celor care au înființat și dezvoltat domeniul mecatronicii în România.*

Mecatronics este tehnologia interdisciplinară care unește disciplinele de bază și include deopotrivă domenii care, altfel, normal, nu ar putea fi asociate și “o îmbinare sinergetică” între ingineria mecanică de precizie, controlul electronic și gândirea sistemică în proiectarea produselor și proceselor.

Educația inginerescă are la bază dezvoltarea gândirii sistemice și rolul major al informației ce a determinat redefinirea obiectivelor în procesul educațional prin formarea deprinderilor de informare, mentale, de acțiune, sociale și formarea deprinderilor de a lucra în echipă.

*Dedicăm astfel această carte tuturor celor care vor să învețe și să se perfecționeze în domeniul ingineriei mecanice și mecatronice.  
Mulțumim domnule profesor **Udea Constantin***

Autorii





## PREFAȚĂ

Această carte este destinată studenților din anul întâi master ai domeniului inginerie mecanică și mecatronică și robotică, la disciplinele „Robotică de precizie”, „Microrobotică și micro sisteme autonome” și „Roboți de măsurare și control”. Studiul sistemelor de poziționare precisă, al componentelor ce intră în lanțul principal de acționare este un element de bază în dezvoltarea acestor roboți/micro-roboți. Drept urmare, este necesară simularea dinamică și cinematică a acestor structuri.

Ca rezultat al evoluției remarcabile a tehnologiilor, sistemele tehnice au devenit multidisciplinare, fiind proiectate și fabricate produse ce înglobează componente mecanice și electrice, circuite electronice și chiar software, care controlează comportarea sistemului. În ceea ce privește constituenții, un sistem mecatronic/robot este multidisciplinar, dar ceea ce-l deosebește de un sistem electromecanic, de exemplu, este filozofia de proiectare. Abordarea conceptuală integrativă a sistemului constituit din componente mecanice, actuatori, senzori, circuite electronice de control și software este esența definitorie a mecatronicii, care a desființat barierele tradiționale dintre domeniile mecanic, electric și informatic, prin atributul său trans disciplinar. Aceasta este substanța definiției care reclamă o combinare sinergetică a componentelor din domeniile amintite.

Abordarea mecatronică a dezvoltării unor sisteme interdisciplinare implică frecvent modelarea și simularea acestora, în toate etapele de realizare, de la proiectare, la fabricație.

Pentru ca modelarea să fie accesibilă oricărui specialist, este foarte important să se utilizeze medii de simulare și modelare ce permit analizarea acestor sisteme înainte de procesul de fabricație. După o analiză statică a sistemului proiectat, este impetuos necesară o analiză cinematică și dinamică a ansamblului proiectat. Se poate studia comportarea structurii robotice în diferite scenarii de simulare cinematice/dinamice ținând seama de încărcările respective, de frecările din articulații, de jocurile constructive, etc. pentru a obține un rezultat cât mai apropiat de o comportare reală.



## CAPITOLUL 1

### PREZENTAREA GENERALĂ A PROGRAMULUI SOLIDWORKS MOTION

SolidWorks-ul are integrat în pachetul Premium o serie de unelte care pot fi folosite pentru a modela și simula elementele realizate în modulul CAD [1]. Ca unelte putem identifica:

a. CircuitWorks - permite crearea de modele 3D din formatele de fișiere scrise de majoritatea programelor de proiectare asistată de computer a circuitelor electrice (ECAD). Inginerii electrici și mecanici pot colabora pentru a proiecta plăci de circuite imprimate (PCB) care se potrivesc și funcționează în ansamblurile SOLIDWORKS [2].

b. ScanTo3D – folosind această funcție a software-ului SOLIDWORKS, puteți deschide datele de scanare de la orice scanner (fișiere rețea sau nor de puncte) sau curbe din software-ul de matematică, puteți pregăti datele, apoi le puteți converti într-un model de suprafață sau solid.

c. SolidWorks Motion [3] – se pot realiza analize cinematice asupra unui ansamblu ținând cont de acțiuni, reacțiuni, se pot introduce elemente mecanice de baza cum ar fi arc, amortizor și chiar elemente de acționare.

d. SolidWorks Routing – permite crearea un tip special de subansamblu care construiește traseul pentru țevi, tuburi, cabluri electrice sau conducte între componente deja existente (cleme de fixare, racorduri, teuri, conectori electrici, etc.).

e. SolidWorks Simulation – oferă soluții de simulare pentru analize statice liniare și neliniare, de frecvență, flambaj, termice, de oboseală, vas sub presiune, test de cădere, dinamice liniare și neliniare și de optimizare.

f. Flow Simulation – permite analiza transferului de căldură, tipuri de curgere ale diferitelor medii de lucru (lichide, gaze/abur, lichide non-newtoniene și lichide compresibile).

g. Plastics - oferă simulare ușor de utilizat pentru analiza pieselor din plastic și matritelor de injecție. Simulează modul în care curge plasticul topit în timpul procesului de turnare prin injecție pentru a prezice defectele legate de fabricație, astfel încât să puteți evalua rapid fabricabilitatea pieselor în timp ce proiectați.

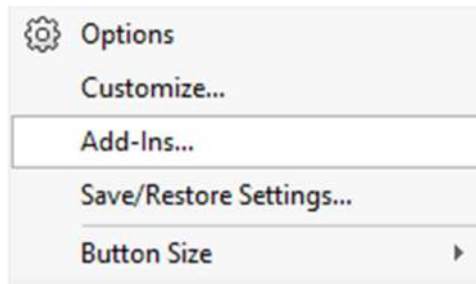


Figura 1.1 Meniul de unelte suplimentare

Analiza cinematică și dinamică a ansamblurilor se poate face în mediul CAD SolidWorks cu ajutorul uneltelor integrate, și anume Motion [5]. Studiile se pot face în trei variante:

- Animation (Assembly Motion) - pentru animație (se pot adăuga motoare pentru a conduce mișcarea uneia sau mai multor părți ale unui ansamblu; se definesc pozițiile componentelor din ansamblu în diferite momente folosind puncte cheie stabilite. Animația folosește interpolarea pentru a defini mișcarea componentelor ansamblului între punctele cheie);
- Basic Motion (Physical Simulation) - pentru o simulare limitată, fără introducerea forțelor și fără a permite afișarea grafică a rezultatelor. Poate fi utilizat pentru aproximarea efectelor motoarelor, arcurilor, contactului și gravitației asupra ansamblurilor. Basic Motion ia în considerare masa în calcularea mișcării. Calculul Basic Motion este relativ rapid, așa că poate fi folosit pentru a crea animații demne de prezentare folosind simulări bazate pe fizică.
- Solidworks Motion - utilizat pentru a simula și analiza cu precizie efectele elementelor de mișcare (inclusiv forțe, arcuri, amortizoare și frecare) asupra unui ansamblu. Analiza mișcării folosește soluții cinematice puternice din punct de vedere computațional și ia în considerare proprietățile materialelor, precum și masa și inerția în calcule. De asemenea, se poate utiliza pentru a reprezenta rezultatele simulării pentru o analiză ulterioară.

Mai jos, se va face o prezentare a modului de lucru în Modulul Solidworks Motion (COSMOSMotion în variante mai vechi de 2008), care este cel mai complex. Motion este inclus în SolidWorks Office Premium și are la bază programul performant ADAMS pentru studiul mecanismelor. Este activ doar după activarea uneltei suplimentare. Celelalte două sunt active și fără activare. Aceste studii sunt simulări grafice ale mișcării pentru modele asamblate. Într-un astfel de studiu, se pot încorpora proprietăți

vizuale, cum ar fi iluminarea și perspectiva camerei. Studiile de mișcare nu modifică un ansamblu sau proprietățile acestuia, doar simulează și animă mișcarea pe care o prescriem pentru un model. Se pot utiliza relații/constrângeri SOLIDWORKS pentru a restricționa mișcarea componentelor dintr-un ansamblu atunci când se simulează mișcarea [4]. Un studiu de analiză a mișcării combină elementele de studiu a mișcării cu pereche în calculele de mișcare. În consecință, constrângerile de mișcare, proprietățile materialului, masa și contactul componentelor sunt incluse în calculele soluției cinematice SOLIDWORKS Motion. Un studiu de analiză a mișcării, calculează și sarcinile care pot fi utilizate pentru a defini tipurile de încărcare în cazul analizelor structurale.

Pentru activare se deschide meniul Options Addins (figura 1.1), unde se bifează SolidWorks Motion în ambele căsuțe corespunzătoare (figura 1.2).

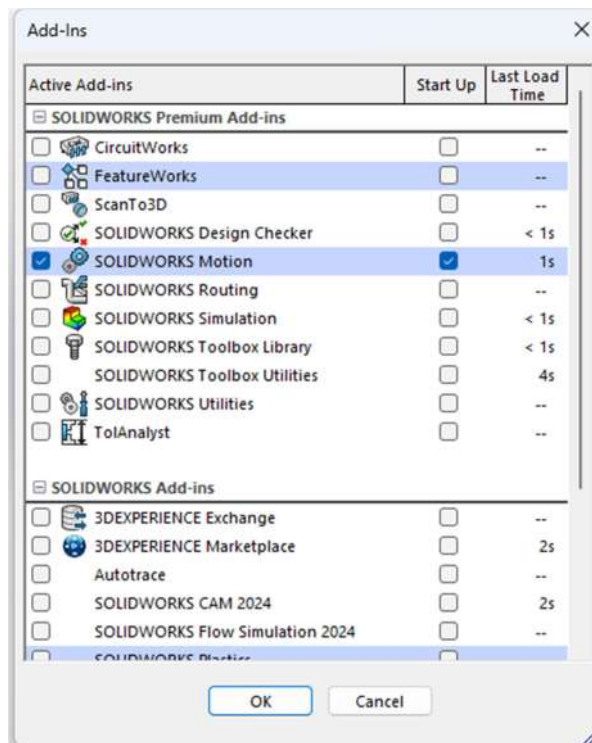


Figura 1.2 Activarea SolidWorks Motion

În cele ce urmează, aspectele legate de animația ansamblului se vor limita la animație după efectuarea calculelor și nu se vor detalia animația vizualizării, a iluminării și animațiile realizate pe baza modificării constrângerilor.

Pentru efectuarea simulărilor este folosit Motion Manager ce apare în partea inferioară a ferestrei programului (figura 1.3). Tipul simulării se modifică de la selectorul 1 (în exemplu: Motion Analysis). Tot de aici se poate introduce un studiu nou sau, eventual, șterge sau copia (este utilă copierea studiului când se dorește analiza diferențială a aceluiași ansamblu dar cu diferiți parametri). După introducerea tuturor elementelor de simulare, calculul se realizează prin apelarea butonului (2) – Calculate. După ce simularea a fost calculată, se poate vizualiza apăsând butonul Play (4) după opțiunea aleasă din selectorul (11), și anume: o singură dată, continuu în buclă sau continuu crescător și descrescător. Se poate rula și pas cu pas prin butonul (3). Oprirea simulării se face din butonul Stop (5). Simulările sunt făcute având la bază parametrul timp. Acesta este contorizat în linia timpului (7). Durata simulării se modifică din punctul cheie din dreapta al axei de timp (22), prin mutarea lui în poziția dorită sau dublu-click pe el (apare o fereastră în care se introduce valoarea). După oprirea simulării, se poate vizualiza rezultatul în funcție de momentul de pe axa timpului prin deplasarea cursorului (6) pe glisorul (9). Viteza de redare se modifică din selectorul 10. De exemplu, în figura de mai jos, redarea simulării se face la viteza normală (1x). Se poate mări sau micșora viteza de două sau patru ori (2x,4x, 0.5x sau 0.25).

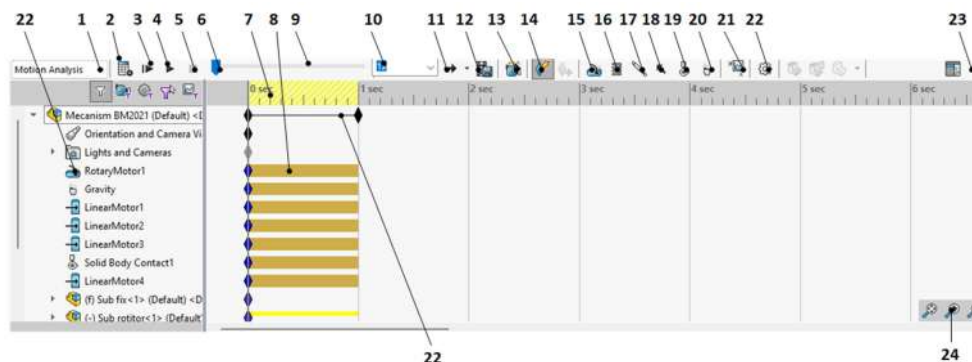


Figura 1.3 Motion manager

Simularea se poate salva într-un format video prin apelarea butonului (12). De aici se pot seta: numărul de cadre pe secundă; rezoluția/calitatea fișierului; etc. Pentru crearea de animații personalizate, se va apela butonul (13).

Extinderea sau micșorarea Motion Manager se face de la butonul 23. Elementele de simulare sunt: 15-motor; 16-arc; 17 - amortizor; 18-forță (cuplu); 19-contact 3D între piese; 20-câmpul gravitațional.

Lista cu elemente este dispusă în partea stângă a Motion Manager și cuprinde elementele ce formează ansamblul, elementele de simulare (în exemplu-22- Rotary Motor 1) și lista cu graficele rezultatelor calculilor.

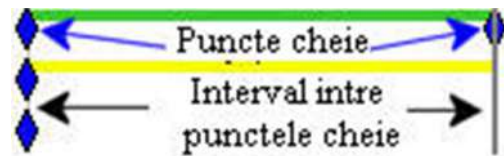


Figura 1.4 Puncte cheie

Barele de acțiune 8 indică timpul de lucru al unui element (în exemplu, Rotary Motor 1 a acționat 1 s). În fig. 4 este redată legenda barelor de acțiune.

Mișcările se produc între punctele cheie de pe barele de acțiune (figura 1.4). Introducerea unui nou punct cheie se face activând iconița 14 pe bara superioară a Motion Manager (figura 1.3). Se pot selecta și deplasa de-a lungul barelor de acțiune. Deplasarea punctului cheie din bara superioară 22 modifică timpul întregii simulări. Dacă se face click dreapta pe un punct cheie se poate face: Cut, Copy, Paste, or Delete.

## 1.1. Elemente de simulare

Pentru realizarea unei simulări cinematice și dinamice este necesară parcurgerea următoarelor etape pregătitoare:

- a) Proiectarea ansamblului ce presupune existența reperelor 3D, a subansamblelor [6];
- b) Gruparea reperelor în subansamble - se recomandă să se facă după mobilitate. Sunt definite și corelările (“mate”). Trebuie evitate redundanțele, atât cele ce sunt exprimări paralele, cât și cele ce conduc la imposibilitatea definirii corelării. Programul transformă corelările în cuple cinematice.

Un corp rigid neconstrâns în spațiu are șase grade de libertate: trei de translație și trei de rotație. Se poate mișca de-a lungul axelor X, Y și Z și se poate roti în jurul axelor X, Y și Z. Când adăugați o constrângere, cum ar fi o pereche concentrică, între două corpuri rigide, eliminați grade de libertate între corpuri. Cele două corpuri rămân constrânse, poziționate unul față de celălalt, indiferent de orice mișcare sau forță în mecanism. Se pot folosi constrângeri pentru a restrânge mișcarea prin eliminarea diferitelor grade de libertate.

De exemplu, o pereche concentrică elimină două grade de libertate de translație și două grade de libertate de rotație între două corpuri rigide. Adăugarea unei distanțe sau a unei perechi coincidente la fețe elimină gradul final de libertate de translație. Dacă fiecare corp rigid are un punct pe articulație pe linia centrală a relației de concentricitate, acele două puncte rămân la aceeași distanță unul de celălalt. Ele se pot roti numai unul față de celălalt în jurul unei axe, linia centrală a perechii concentrice. Această combinație duce la o articulație cu un singur grad de libertate, deoarece permite o singură rotație între corpurile rigide.

Când se utilizează un studiu de analiză pentru a calcula mișcarea, acesta calculează numărul de grade de libertate din mecanismul și elimină perechi redundanțe pe măsură ce determină și rezolvă ecuațiile de mișcare pentru ansamblu. Când un mecanism are o buclă închisă, cum ar fi o legătură cu patru bare, pot exista perechi redundanțe. Există trei perechi redundanțe într-o legătură cu patru bare când toate perechile sunt concentrice. Acest lucru se datorează faptului că fiecare parte a buclei (începând de la sol) constrânge biela să rămână în planul ansamblului. Software-ul încearcă să rezolve automat constrângerile impuse de partenerii redundanți și poate face acest lucru cu ușurință pentru o legătură cu patru bare.

Majoritatea aplicațiilor presupun mecanisme cu cuple cinematice închise, la care numărul de grade de libertate ale ansamblului va fi egal cu cel al sistemelor de acționare (de exemplu motoare). La ansamblurile ce conțin contacte 3D, fie se mențin cuplele în contact cu arcuri, fie prin forță gravitațională.

În cadrul simulărilor pot exista elemente de acționare: motoare, arcuri, forțe gravitaționale și elemente pasive: amortizoare, contacte 3D.

## 1.2 Acționarea cu motoare

Acționarea cu motoare se face activând butonul 15 din Motion Manager (figura 1.3). Meniul ce se deschide este redat în figura 1.5.



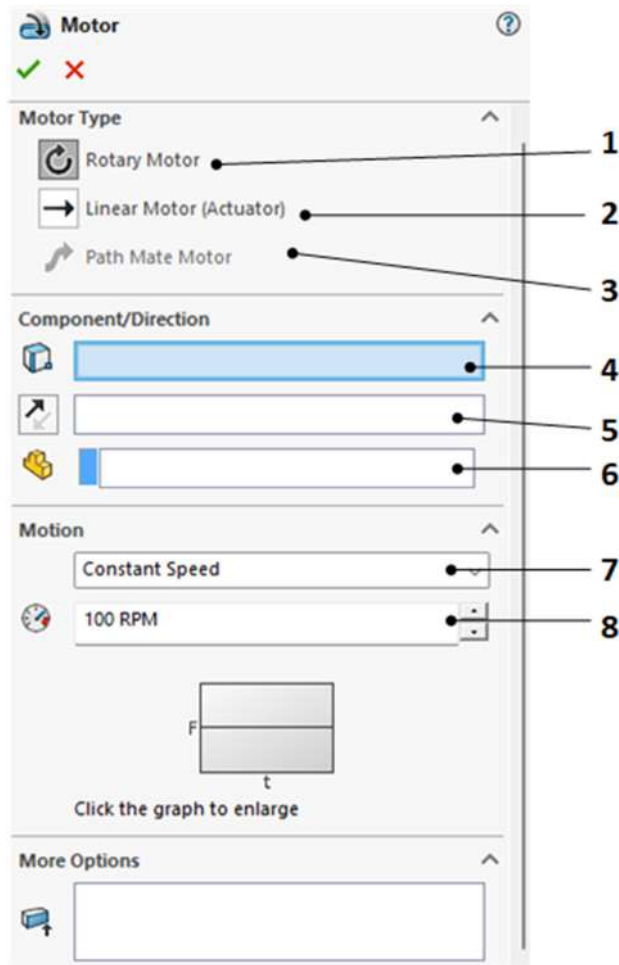


Figura 1.5 Definirea unui element de acționare

Selecția 1 reprezintă un motor rotativ, în selecția 2 un motor liniar iar în selecția 3 un motor definit prin calea de rulare. În fereastra 4 este indicată suprafața în contact cu elementul de acționare, fereastra 5 este de definire a direcției rotației prin selectarea unei suprafețe cilindrice sau a unui cerc ce mărginește suprafața uneia din piesele în rotație. Se poate alege și axa de simetrie a acelei componente. Dacă acea mișcare se definește ca una relativă față de alt element al ansamblului, atunci în fereastra 6 se alege componenta. În caz contrar, se definește ca mișcare absolută (față de originea ansamblului). Parametrii elementului de acționare sunt selectați din fereastra 7, iar valorile se introduc în fereastra 8. În exemplul din figura 1.5 se realizează simularea cu viteză constantă cu valoarea de 100 de rotații pe minut, ce corespunde unui regim de mișcare stabilizată. Celelalte opțiuni sunt prezentate în figura 1.6.

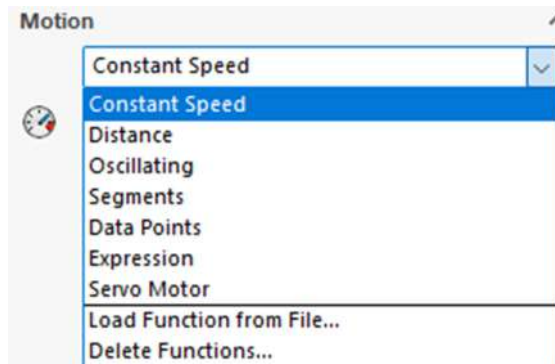


Figura 1.6 Opțiunile elementului de acționare



Figura 1.7

Celelalte opțiuni posibile descriu cazurile:

- “Distance” - unghiul parcurs și timpul aferent;
- “Oscilating” – mișcare oscilatorie pentru unghiul parcurs, frecvență și fază date;
- „Segments”- mișcarea se definește prin segmente (figura 1.7). Pentru fiecare segment se stabilește valoarea de început și sfârșit a timpului sau incrementului de simulare și valoarea parametrului pentru care se

dorește segmentarea mișcării. După introducerea datelor, în partea dreaptă a figurii se pot vizualiza graficele deplasării, vitezei și accelerației pentru mișcarea prescrisă prin aceste segmente.

• “Data points” – mișcare ce se calculează prin interpolarea unor puncte pentru care se dau poziția și timpul la care este atins punctul. În figura 1.8 sunt redate opțiunile pentru acest caz. Parametrul care se interpolează poate fi: deplasarea, viteza sau accelerația (aici este adoptată interpolarea deplasării). Datele punctelor pentru interpolare (timp, deplasare unghiulară) sunt completate în tabelul ce urmează. Metoda de interpolare poate fi Akima, cubică sau liniară. După introducerea datelor, în partea dreaptă o să apară ilustrările grafice ale datelor introduse (deplasare, viteză și accelerație).

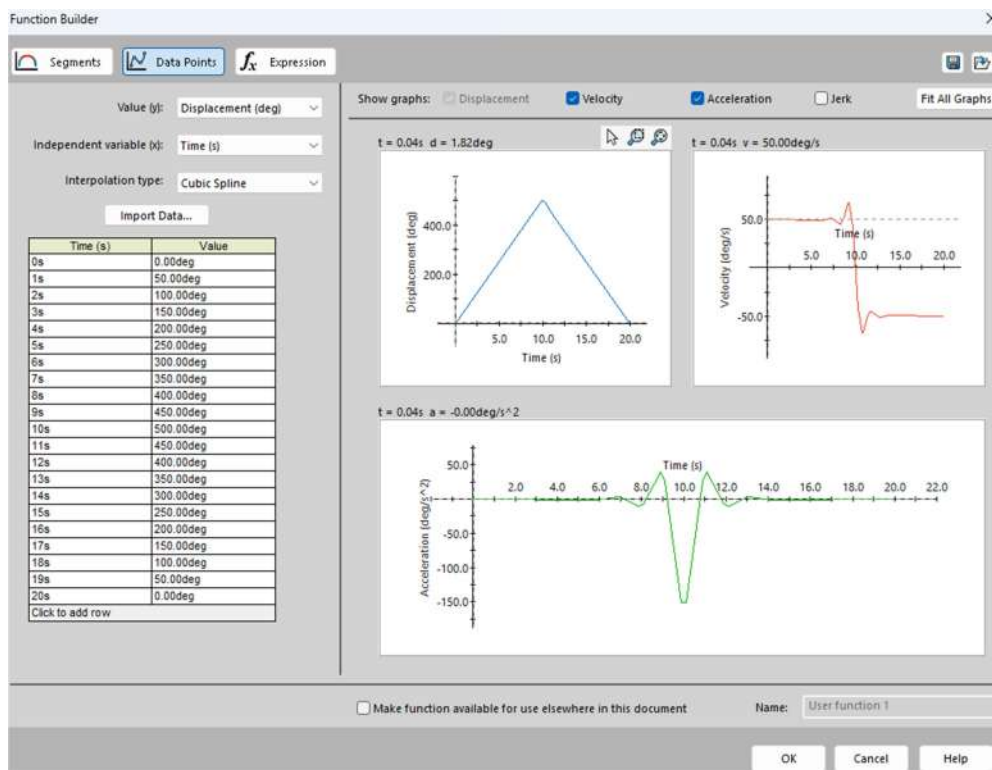


Figura 1.8

• “Expression” - Poziția curentă este calculată pe baza unei formule având ca argument timpul (“TIME”) sau rezultate efectuate anterior (figura 1.9).

• “Servomotor” – bucla de reacție se poate închide prin poziție, viteză sau deplasare.

Funcțiile clasice acceptate sunt: ABS, ACOS, AINT, ANINT, ASIN, ATAN, ATAN2, COS, COSH, DIM, EXP, LOG, LOG10, MAX, MIN, MOD, SIGN, SIN, SINH, SQRT, TAN, TANH.

O funcție specială ce se poate folosi **pentru un parcurs** este: STEP (TIME,t1,P1,t2,P2). Sunt notate cu t1 și t2 timpul de început și de sfârșit, cu P1 și P2 poziția inițială și finală. Aceasta funcție generează o cinematică fără salturi de accelerație. Pentru ilustrarea cinematicii în figura 1.10 este redată o astfel de cinematică (cu t1 = 0, t2 = 1s, P1 = 0°, P2 = 180°). Sunt redată variația vitezei unghiulare și a accelerației unghiulare. Se observă continuitatea accelerației. Între valorile extreme accelerația variază liniar iar viteza-parabolic.

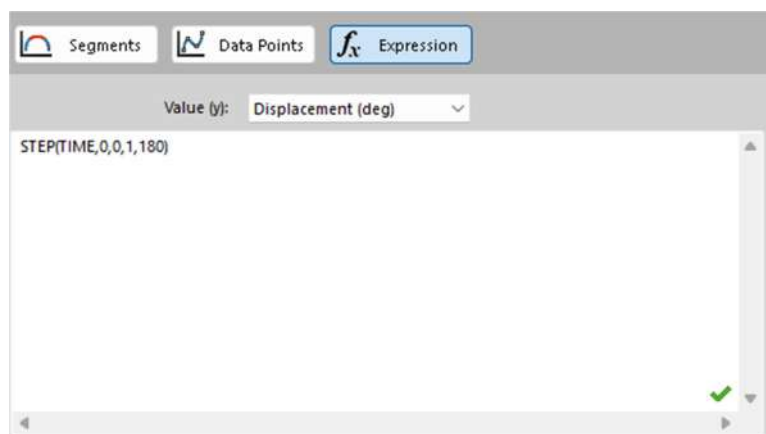


Figura 1.9

Cinematica antrenării unui mecanism cu motor, în opțiunea “Expression” poate fi definită și prin parcursul vitezei. O modalitate simplă de variație a vitezei este cea “trapezoidală” (figura 1.11). Exemplificarea se face pentru un motor de rotație. Parcursul are o timp de accelerare  $t_{ac}$ , când viteza crește liniar până la  $\omega_{max}$ , o perioadă de mișcare uniform  $t_{reg}$  și un timp de frânare  $t_f$  până la oprire. Pentru o poziționare finală precisă se adoptă o perioadă de frânare mai lungă decât cea de accelerare, adică:

$$k = \frac{t_f}{t_{ac}} = \frac{\epsilon_{ac}}{|\epsilon_f|} > 1 \quad \# (1.1)$$