DOI: 10.14750/ME.2020.011

MISKOLCI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

ROBOTOK HEPTIKUS TULAJDONSÁGÁNAK FEJLESZTÉSE GYÁRTÁSI ÉS SZERELÉSI FOLYAMATOK AUTOMATIZÁLÁSÁRA

PhD ÉRTEKEZÉS

Készítette:

Rónai László

okleveles mechatronikai mérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE TÉMATERÜLET

MECHATRONIKAI RENDSZEREK TERVEZÉSE TÉMACSOPORT

Doktori iskola vezető:

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár

Témacsoport vezető:

Dr. Szabó Tamás
egyetemi docens

Tudományos vezető:

Dr. Szabó Tamás
egyetemi docens

Miskolc

2020

DOI: 10.14750/ME.2020.011

TARTALOMJEGYZÉK

NYILATKOZAT III

TÉMAVEZETŐ AJÁNLÁSA IV

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE VI

Skalár mennyiségek VI

Mátrix mennyiségek IX

Egyéb jelölések X

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK MEGFOGALMAZÁSA 1

1.1. A kutatás célkitűzései 1

2. IRODALOMKUTATÁS 4

3. RUGALMAS, HAJLÉKONY RÚDSZERKEZETEK NUMERIKUS MODELLEZÉSE 10

3.1. Az érintkezési feladat megfogalmazása 15

4. MECHANIKAI EGYENSÚLY STABILITÁSÁNAK VIZSGÁLATA 19

5. NYÚLÁSMÉRŐ BÉLYEGEKRE ALAPOZOTT ERŐMÉRÉS 22

6. EGY TIPIKUS SZERELÉSI FOLYAMAT VIZSGÁLATA MODELLEZÉSSEL ÉS KÍSÉRLETTEL 29

6.1. A cella és a cellatartó modellje 29

6.2. Egyensúlyi pontok stabilitásvizsgálata 35

6.2.1. Egyensúlyi pontok stabilitásának analitikus vizsgálata 35

6.2.2. Numerikus vizsgálata az egyensúlyi pontoknak 38

6.2.3. Dinamikus szerelés közbeni stabilitásvizsgálat 40

6.3. Kvázi-statikus ellenőrző mérések 42

7. ROBOTOS SZERELÉS ERŐ-VISSZACSATOLÁS ALAPJÁN 44

7.1. Az alkalmazott ipari robot ismertetése 44

7.2. Az erőmérőrendszer elemei 45

7.3. A vezérlési stratégia kidolgozása 48

DOI: 10.14750/ME.2020.011

7.4. Mérési eredmények kiértékelése ... 55
8. INTELLIGENS ROBOTMEGFOGÓ TERVEZÉSE ... 56
8.1. Követelmények megfogalmazása ... 56
8.2. A megfogó megtervezése, összeállítása ... 57
8.2.1. Az áramkör megtervezése ... 61
8.2.2. A mikrovezérlő algoritmusa ... 62
9. INTELLIGENS ROBOTMEGFOGÓ ALKALMAZÁSA SZERELÉSI FOLYAMATOKRA ... 64
9.1. Akkumulátor cellák behelyezése ... 64
9.2. Rugalmas csat bepattintási feladata ... 66
9.2.1. Mérési eredmények ... 68
9.3. Finommechanikai szerkezeti elem erő-elmozdulásának mérése ... 69
TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ... 72
ÖSSZEFOGLALÁS ... 74
SUMMARY ... 76
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS ... 78
IRODALOMJEGYZÉK ... 79
DISSZERTÁCIÓHOZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK ... 86
ÁBRAJEGYZÉK ... 87
TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE ... 90

DOI: 10.14750/ME.2020.011

NYILATKOZAT

Alulírott Rónai László büntetőjogi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskolába beadott „Robotok heptikus tulajdonságának fejlesztése gyártási és szerelési folyamatok automatizálására” című PhD értekezés önálló munkám eredménye, az irodalmi hivatkozások egyértelműek és teljesek.

Dátum: Miskolc, 2020. március 23.

……

Rónai László

DOI: 10.14750/ME.2020.011

TÉMAVEZETŐ AJÁNLÁSA

Rónai László 2010 szeptemberében került az egyetemre, mint alapszakos hallgató. A hallgatói általános kötelezettségen felül, már elsőévesként is végzett pneumatikai kutatást a Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszéken. Másodévesen vett részt először TDK munkában. Az eddigi tudományos pályafutása során több TDK dolgozatot adott be, amelyeken sikeresen szerepelt (kétszer lett első helyezett a helyi konferenciákon). Az OTDK konferenciákon is eredményesen szerepelt, 2017-ben szekciójában a 3. helyezést érte el. Az alapszakos- és a mesterszakos képzése során László többször is elnyerte a Köztársasági ösztöndíjat és a Kar által adományozott Tanulmányi emlékérem kitüntetés arany fokozatát.

Hallgatói versenyeken is képviselte az egyetemet, ezek közül kiemelkedő volt a Mérnökbajnokság című országos verseny, ahol a döntőben a 6. helyezést érte el. A tanszéken főként robotos témában végezte az eddigi kutatásait. Számos publikációja jelent meg, amelyet az MTMT adatbázisa is tartalmaz.

A doktori képzésre 2016/17 I. félévében nyert felvételt. A kutatási témájának a címe: Robotok heptikus tulajdonságának fejlesztése gyártási és szerelési folyamatok automatizálására.

Az eddigi tevékenysége során számos eredmény született a kiírt témában, amelyekről publikációk formájában adott számot. Ezek konferencia kiadványokban és minőségi folyóiratokban jelentek meg.

A doktori képzés első két évében egy mérőrendszert alakított ki, amellyel, a robottal történő stabilitásvesztéssel járó szerelés során meghatározza a végrehajtás során fellépő erőket az idő függvényében. A kísérletileg vizsgált feladatot teoretikusan is tanulmányozta, ehhez szimulációs programot fejlesztett ki. A PhD. kutatás igényeinek megfelelően összehasonlítás is történt az eredmények vonatkozásában. A stabilitásvesztéssel járó szerelési műveletek esetére elméletileg megalapozott módon meghatározta a munkadarab elengedési pontját, amely lényeges része a PhD. dolgozatának. A kutatási fázisba lépve László további irodalom feldolgozásokat végzett, valamint az előzetes mérések során kapott eredmények alapján kifejlesztett egy intelligens robotmegfogót is, amellyel a szerelési irányú erőt lehet mérni. A konstrukciója tartalmaz két párhuzamos lemezből álló mechanizmust, amellyel eliminálni tudja a nem kívánt erőkomponenseket.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

A főbb eredményeket Q2, illetve Q3 minőségű folyóiratokban publikálta. A Cambridge Egyetem által gondozott Robotica című folyóiratban megjelent egy akkumulátor beszerelésének feladata egy műanyag cellatartóba 20 oldal terjedelemben, amely a disszertációjának lényeges részét foglalja magában. Ennél a feladatnál a stabilitásvizsgálat kapta a fő hangsúlyt. A Pollack Periodica című folyóiratba publikálta egy bepattanó csat feladatán keresztül a tervezett és legyártott intelligens megfogó eredményességét.

Az oktatásban is aktívan részt vett az elmúlt 4 évben. A tanszéki tantárgyak gyakorlatának vezetése, valamint hallgatók szakdolgozatának, diplomamunkájának, illetve projektfeladatának konzultálása mellett több oktatási segédletet is készített alap-, illetve mesterszakos hallgatók részére. Munkáját többek között az is dicséri, hogy több hallgatója is ért el helyezést a hely a helyi TDK konferencián: egy I. helyezés a 2016/17 II. félévében, egy III. helyezés a 2018/19 I. félévében. Robot- és PLC programozási tanfolyamok tartásában, illetve az oktatáshoz szükséges segédanyagok kidolgozásában is közreműködött.

A doktori kutatómunkáján felül László több projektekben is részt vett. Egy autonóm, elárasztott bányák feltérképezésére alkalmas robot vízmintavevőjének fejlesztésében működött közre az UNEXMIN H2020 projektben. Egy GINOP projekt keretén belül pedig egy súrlódásmérésre alkalmas berendezés elektronikai rendszerének tervezését és kivitelezését végezte el.

A doktori képzésben eltöltött ideje során László bebizonyította, hogy alkalmas az önálló tudományos kutatómunkára a mechatronika területén. Az értekezésének elkészítése gondos munkát tükröz, az eddig elért tézis értékű eredmények jól mutatják az ipari robotos téma iránti elkötelezettségét.

Miskolc, 2020. március 23.

.....

Dr. Szabó Tamás

témavezető, egyetemi docens,
intézeti tanszékvezető

DOI: 10.14750/ME.2020.011

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Skalár mennyiségek

u_n	Normális irányú elmozdulás	$[mm]$
F_a	Szereléshez szükséges erő	$[N]$
x, y	Globális kartéziuszi koordinátarendszer	
x_L, y_L	Lokális kartéziuszi koordinátarendszer	
α	Merevtestszerű elfordulása a rúdnak	$[rad]$
Θ_1, Θ_2	Globális csomóponti szögelfordulások 1. és 2. csomópontnál	$[rad]$
Θ_{1l}, Θ_{2l}	Lokális csomóponti szögelfordulások 1. és 2. csomópontnál	$[rad]$
β_0	Kezdeti konfiguráció orientációs szöge	$[rad]$
β	Deformálódott konfiguráció orientációs szöge	$[rad]$
u_L	Lokális axiális elmozdulás	$[mm]$
L_0	Rúdelem kezdeti hossza	$[mm]$
L	Rúdelem pillanatnyi hossza	$[mm]$
P	Húzóerő a rúdban	$[N]$
A	A rúd keresztmetszete	$[mm^2]$
I	Másodrendű tehetetlenségi nyomaték	$[mm^4]$
E	Young modulus	$[GPa]$
V_1, V_2	Nyíró erők az 1. és a 2. csomópont vonatkozásában	$[N]$
M_1, M_2	A rúd lokális nyomatékai az 1. és a 2. csomópontoknál	$[Nmm]$
$\delta W_{ext}, \delta W_{int}$	A külső- és a belső erők virtuális munkája	$[J]$
ε_x	Rúdirányú megnyúlás	$[-]$
u, v	x- és y irányú elmozdulás komponensek	$[mm]$
ξ	Izoparametrikus paraméter	$[-]$
I_z	A keresztmetszet másodrendű tehetetlenségi nyomatéka	$[mm^4]$
$F_{kül.}$	Külső erők	$[N]$
p_c	Kontakt nyomás	$[MPa]$
d	Érintkezési hézag	$[mm]$
γ	A kontakt pont és a vízszintes egyenes által bezárt szög	$[rad]$
$L_{\mathbf{P}}^p$	A módosított potenciális energia	$[J]$
c	Büntető paraméter	$[N/mm]$
d^-	Negatív túlfedés	$[mm]$

DOI: 10.14750/ME.2020.011

N	Normál irányú kontakt erő	$[N]$
x_0, y_0	Az akkumulátor középpontjának kezdeti koordinátája	$[mm]$
x_n, y_n	Aktuális csomóponti koordinátái az érintkező csomópontnak	$[mm]$
F_c	A tangenciális súrlódó erő	$[N]$
μ	Súrlódási együttható	$[-]$
t	Idő	$[s]$
Δt	Időlépés	$[s]$
tol	Elmozdulás konvergencia toleranciája	
g	Nehézségi gyorsulás	$[m/s^2]$
$\hat{f}_{nx}, \hat{f}_{ny}$	A belső erők tehervektor értékei az érintkezési csomópontban	$[N]$
${}^{t+\Delta t}N_y$	A normális erő $t + \Delta t$ időpillantban	$[N]$
F_a^+, F_a^-	Behelyezéshez és a kivételhez szükséges erő	$[N]$
F_{cy}^+, F_{cy}^-	A függőleges komponensei a Coulomb-féle súrlódási erőnek	$[N]$
N_y^+, N_y^-	A normális erők függőleges komponensei be- és kiszereléskor	$[N]$
$N_y^{(0)}$	A vertikális komponense a normális erőnek, amikor csak normális irányú kontakt erő van jelen	$[N]$
k_y	Függőleges irányban a merevségi együttható	$[N/m]$
Δy	A számított elmozdulás növekmény	$[mm]$
Π	A potenciális energia	$[J]$
$\mathcal{K}$	Függvényosztály: $a \in \mathcal{K}$, ha $a(0) = 0$ és a folytonos és monoton növekvő függvény	
F_{fy}	y irányban értelmezett súrlódási erő	$[N]$
F_{alk}	A testen alkalmazott erő	$[N]$
d_y	Csillapítási együttható	$[Ns/m]$
y_{t0}	A nulla tangenciális kontakt erő helye	$[mm]$
A, B, C	Egyensúlyi pontok	
y_A, y_B, y_C	Egyensúlyi pontok pozíciója	$[mm]$
y_1	Akkumulátor behelyezéskor az első egyensúlyi pont	$[mm]$
y_{Bd}	Dinamikus szereléskor a megfogó nyitási pontja	$[mm]$
I_F	Belső erők numerikus integrálja	$[Nmm]$
ΔR	Ellenállásváltozás	$[\Omega]$
R_x	Egy adott ellenállás	$[\Omega]$

DOI: 10.14750/ME.2020.011

ρ	Fajlagos ellenállás	$[\Omega m]$
l	Vezető hosszúsága	$[mm]$
A_R	A vezető keresztmetszete	$[mm^2]$
k_b	Bélyegtényező	$[-]$
U_H	Hídfeszültség	$[V]$
R_{1-4}	Bélyegek ellenállása	$[\Omega]$
I_1, I_2	Áramok	$[A]$
U_T	Tápfeszültség	$[V]$
n_b	A bélyegek száma	$[db]$
ε_y	y irányú megnyúlás	$[ul]$
R	Akkumulátor sugara	$[mm]$
φ_1, φ_2	Adott szerkezetre jellemző ívek/szögek	$[rad]$
m	Akkumulátor felének a tömege	$[kg]$
n_e	Elemszám	$[db]$
n	Csomópontok száma	$[db]$
$F_{névl}$	Az erő névleges értéke	$[N]$
$F_{a,i}$	i-dik lépésben az erő aktuális értéke	$[N]$
$F_{a,i-1}$	(i-1)-dik lépésben az erő értéke	$[N]$
F_{max}	A szerelés során fellépő maximális erő	$[N]$
G_{bat}	1 darab akkumulátor súlyereje	$[N]$
ν	Poisson tényező	$[-]$
E_1	Lemez hajlításakor a rugalmassági modulus	$[GPa]$
w_L	Lemez szabad végén a Z irányú elmozdulás	$[mm]$
F_{lem}	1 db. lemez esetén az erőszükséglet	$[N]$
F_p	Két lemez erőszükséglete	$[N]$
F_L	Erőmérő cellán ébredő erő nagysága	$[N]$
F_{eff}	Effektív erő	$[N]$
$\hat{F}$	Átlagos erő	$[N]$
n_{pont}	Mintavételezett pontok száma a szerelés közben	$[db]$
$\delta_0, \delta_1, \delta_2, \delta_3$	A feltételrendszer kialakításához szükséges egész számok	
$\tan \alpha_i$	A görbe meredeksége	
$\hat{F}_{nom}$	A névleges átlagos erő	$[N]$

DOI: 10.14750/ME.2020.011

F_{max}^{nom}	A névleges maximális erőérték	$[N]$
R_{cs}	A csuklós szerkezet sugara	$[mm]$
h	Csuklós szerkezet B és C pontja közötti hézag kezdetben	$[mm]$
Δu_E	E pont horizontális elmozdulásának növekménye	$[mm]$
F_{1-2}	C ponttal történő érintkezés hatása a csuklós szerkezetnél	$[N]$
F_{term}	Csuklós szerkezet elengedési pontja	$[N]$

Mátrix mennyiségek

$\bar{\mathbf{f}}_\mathbf{i}^\mathbf{e}$	Lokális elemi belső tehervektor
$\bar{\mathbf{q}}^\mathbf{e}$	Elemi csomóponti elmozdulások lokális vektora
$\mathbf{f}_\mathbf{i}^\mathbf{e}$	Globális elemi belső tehervektor
$\mathbf{q}^\mathbf{e}$	Globális elemi csomóponti elmozdulás vektor
$\mathbf{T}_\mathbf{e}^\mathbf{T}$	A transzformációs mátrix transzponáltja
$\mathbf{f}_\mathbf{i}$	Szerkezeti belső tehervektor
$\bar{\mathbf{K}}_\mathbf{t}^\mathbf{e}$	Lokális tangenciális merevségi mátrix
$\bar{\mathbf{K}}_\mathbf{L}^\mathbf{e}$	Lokális lineáris merevségi mátrix
$\bar{\mathbf{K}}_\mathbf{g1}^\mathbf{e}, \bar{\mathbf{K}}_\mathbf{g2}^\mathbf{e}, \bar{\mathbf{K}}_\mathbf{g3}^\mathbf{e}$	Lokális geometriai merevségi mátrixok
$\mathbf{K}_\mathbf{t}^\mathbf{e}$	Elemi merevségi mátrix globális koordinátarendszerben
$\mathbf{K}_\mathbf{t}$	A teljes szerkezet tangenciális merevségi mátrixa
$\mathbf{e}_\mathbf{t}, \mathbf{e}_\mathbf{n}$	Tangenciális és a normál irányú egységvektorok
$\mathbf{T}_\mathbf{n}$	Transzformációs mátrix
$\mathbf{T}$	Transzformációs mátrix
$\mathbf{I}$	Egységmátrix
$\hat{\mathbf{K}}_\mathbf{t}$	A transzformált tangenciális merevségi mátrix
$\hat{\mathbf{f}}_\mathbf{i}$	A transzformált vektora a belső tehervektornak
$\mathbf{f}_\mathbf{c}$	A súrlódó erővel kapcsolatos csomóponti erők oszlopvektora
$\mathbf{f}_\mathbf{u}$	A kinematikai terhelés oszlopvektora
$\Delta\mathbf{q}^{(k)}$	A belső csomóponti elmozdulások növekményvektora a k-dik iterációs lépésben
${}^{t+\Delta t}\mathbf{q}^{(k-1)}$	A csomóponti elmozdulások vektora a $t+\Delta t$ időpillanatban, a $(k-1)$-dik iterációs lépésben
${}^{t+\Delta t}\mathbf{q}^{(0)}$	A csomóponti elmozdulások vektora a $t+\Delta t$ időpillanatban, a kezdeti iterációs lépésben

DOI: 10.14750/ME.2020.011

${}^{t+\Delta t}\mathbf{q}^{(k)}$	A csomóponti elmozdulások vektora a $t+\Delta t$ időpillanatban, a k-dik iterációs lépésben
${}^{t+\Delta t}\widehat{\mathbf{K}}_{\mathbf{t}}^{(0)}$	A transzformált merevségi mátrix a $t+\Delta t$ időpillanatban, a kezdeti iterációs lépésben
${}^{t+\Delta t}\widehat{\mathbf{K}}_{\mathbf{t}}^{(k)}$	A transzformált merevségi mátrix a $t+\Delta t$ időpillanatban, a k-dik iterációs lépésben
${}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_{\mathbf{u}}^{(k)}$	A kinematikai teher oszlopvektora a $t+\Delta t$ időpillanatban, a k-dik iterációs lépésben
${}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_{\mathbf{c}}^{(k-1)}$	A tangenciális súrlódó erővel kapcsolatos csomóponti erők vektora a $t+\Delta t$ időpillanatban, a $(k-1)$-dik iterációs lépésben
${}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{f}}_{\mathbf{i}}^{(k-1)}$	A transzformált belső tehervektor a $t+\Delta t$ időpillanatban, a $(k-1)$-dik iterációs lépésben
${}^{t}\mathbf{q}$	Csomóponti elmozdulás vektor a t időpillanatban
${}^{t}\widehat{\mathbf{K}}$	Az előállított merevségi mátrix a t időpillanatban
${}^{t}\mathbf{f}_{\mathbf{c}}$	A tangenciális súrlódó erővel kapcsolatos csomóponti erők vektora a t időpillanatban
${}^{t}\hat{\mathbf{f}}_{\mathbf{i}}$	A transzformált belső tehervektor a t időpillanatban
$\mathbf{q}$	Általános koordináták oszlopvektora
$\dot{\mathbf{q}}$	Általános sebességek oszlopvektora
$\mathbf{Q}$	Általánosított erők sorvektora
$\mathbf{K}_{\mathbf{t(n,n)}}$	A tangenciális merevségi mátrixnak a kontakt csomópontra vett része
$\mathbf{K}_{\mathbf{t(r,r)}}$	A tangenciális merevségi mátrixnak a többi csomópontra vett almátrixa
$\mathbf{K}_{\mathbf{t(r,n)}}$	A tangenciális merevségi mátrixnak a többi- és a kontakt csomópontra vett almátrixa
$\mathbf{f}_{\mathbf{i(n)}}$	A belső erők csomóponti vektora a kontakt csomópont esetére
$\mathbf{f}_{\mathbf{i(r)}}$	A belső erők csomóponti vektora a többi csomópontra
$\mathbf{K}_{\mathbf{lem}}$	Lemez merevségi mátrixa
$\mathbf{q}_{\mathbf{lem}}^{\mathbf{T}}$	Csomóponti elmozdulások vektora a lemeznél

Egyéb jelölések

UL	Updated Lagrangian
TL	Total Lagrangian
ROC	Robot Controller

DOI: 10.14750/ME.2020.011

UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
μC	Mikrovezérlő
NYÁK	Nyomtatott áramkör
TP	Teach Pendant
EEPROM	Elektromosan törölhető programozható olvasható memória
PC/ABS	Polikarbonát/Akrilnitril-Butadién-Sztirol
PLA	Politejsav
TCP	Tool Center Point

DOI: 10.14750/ME.2020.011

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK MEGFOGALMAZÁSA

2013-ban Németországban meghirdetett negyedik Ipari Forradalom (Ipar 4.0 [1]–[3]) hatására ma már Magyarországon is jelentkezik az igény ipari folyamatok minél teljesebb körű automatizálására, robotizálására. Az elmúlt években Magyarországon is tapasztalható, hogy az eddig alkalmazott emberi erőforrást inkább gépek váltják fel. Napjainkban a 4. ipari forradalom zajlik, amelyet az információs- és kommunikációs technológiák (ICT) rohamos fejlődése idézett elő [1]. Az Ipar 4.0 egy ígéretes törekvés arra, hogy az üzleti- és az ipari folyamatokat integrálja, valamint a cégek értékláncában jelenlévő beszállítókat és az ügyfeleket összekösse [1]. Az emberi erő és intelligencia kiváltása megköveteli a gyártási folyamatok újragondolását, tervezését. A koncepció lehetővé teszi a rugalmas tömeggyártás feltételeinek megteremtését is. A modern kommunikációs eszközök pl. okostelefonok, tabletek lehetőséget biztosítanak a folyamatok nyomon követésére és beavatkozására. A különböző értékteremtő folyamatok távoli eléréssel monitorozhatóvá, illetve beavatkozhatóvá válnak.

Az orvostudományban már évtizedek óta folynak olyan kutatások, amelyek távoli eléréssel biztosítják pl. a páciensek operációját. Ehhez feltétlenül szükség van az érintéssel járó érzékelés meglétére, azaz a heptikus visszacsatolásra. A heptikus kifejezés a haptikos ókori görög szóból származik, amelynek jelentése „érintéssel járó érzés” [5].

Napjainkban egyre nagyobb kutatási potenciált fordítanak a hagyományos robotkarok kooperatív alkalmazására, illetve az emberi tevékenységek humanoid robotokkal való kiváltására. Ehhez nélkülözhetetlen a robotok heptikus [4]–[8] tulajdonságának fejlesztése.

1.1. A kutatás célkitűzései

Az Ipari Forradalom 4.0 (Industrial 4.0) hatására manapság az ipari folyamatok automatizálása és robotizálása elengedhetetlenné vált. Megfigyelhető, hogy az eddig emberi munkaerővel végzett összeszerelés, hegesztés, festés stb. mára már egyre több helyen robottal történik. Az eredmény az egyre szélesebb vevői igényeknek és nem utolsó sorban a robotok pontos pozícionálásának és rendelkezésre állásának is köszönhető.

Az emberi tevékenységek robotokkal való helyettesítése többirányú mérnöki kutatómunkát igényel. A gyártási, szerelési folyamatokban az operátorok által végzett és érzékelt műveleteket modellezni, illetve átültetni szükséges.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

Bevezetés, célkitűzések megfogalmazása

Az ipari robotoknak sok esetben olyan szerelési folyamatot kell megoldaniuk, amelyeknél szükséges lehet az erő-visszacsatolás megléte. Ezekben a helyzetekben a rendszernek döntést kell majd hoznia, hogy az adott szerelési művelet megfelelően került-e végrehajtásra.

A Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszéken több, a Robert Bosch Power Tool Kft.-nél felmerült robottal történő ipari szerelési folyamat megvalósíthatósági tanulmánya készült el. A feladatok megoldásakor több alkatrészt bepattanással lehetett összeszerelni, amelyek mechanikailag pillanatnyi stabilitásvesztéssel járnak.

A doktori képzési- és kutatási szakaszának fő célkitűzése a stabilitásvesztéssel járó szerelési folyamatok tanulmányozása, modellezése, amelyek elvégezhetők robottal is. A bepattanásra alkalmas rugalmas szerkezetek a nagy elmozdulás- és kis deformáció elmélet segítségével jól modellezhetők. A szimulációs eredmények felhasználásával stabilitásvizsgálat is elvégezhető, amelynél figyelembe kell venni a nem konzervatív pl. disszipatív erők jelenlétét is. A kutatás során kialakítandó erőmérőrendszer használatával a teoretikusan meghatározott és a tényleges mérési eredmények összevethetővé válnak.

Ahhoz, hogy a műveleteket a robot az emberhez hasonlóan helyesen végrehajthassa, intelligens megfogók kifejlesztésére van szükség. Ez magában foglalja a beágyazott rendszerek (mikrovezérlők) alkalmazását is, amely az erő-visszacsatolást feldolgozza és kommunikál a robotvezérlő egységgel.

A kutatómunka során kitűzött célok az alábbiak:

- A heptikus témához kapcsolódó, rendelkezésre álló szakirodalmak feldolgozása.
- A szerelés során fellépő pillanatnyi stabilitásvesztéssel járó mechanikai jelenségek feltárása, modellezéssel, valamint mérések elvégzése.
- Intelligens megfogó egység kifejlesztése, amellyel a stabilitásvesztéssel járó szerelési folyamatok követhetők és a kívánalmaknak megfelelően végrehajthatók.
- Kísérletek végzése gyakorlati szerelési folyamatokra.

A disszertáció a kutatómunkát a fejlesztési időrendet követve az alábbi fejezetekre bontva ismerteti: A 2. fejezet tartalmazza a doktori képzés során végzett irodalomkutatás összefoglalóját. Ezen kutatás kitért a heptikus visszacsatolásra, a bepattanással járó szerelésekhez többnyire alkalmazott műanyag rögzítő elemekre, bepattanás jelenségének vizsgálatára, robottal történő szerelési folyamatokra, nemlineáris végeselemes mechanikai feladatok kezelésének módjaira, stabilitás vizsgálatra, erőmérők tanulmányozására és

DOI: 10.14750/ME.2020.011

intelligens megfogókra. A 3. fejezet bemutatja a rugalmas, hajlékony rúdszerkezetek mechanikai modellezését, amelyek a vizsgálat szempontjából nagy elmozdulás mellett kis deformációt szenvednek el. A fejezet az érintkezési feladat megfogalmazását is tartalmazza. A 4. fejezet foglalkozik a mechanikai egyensúly stabilitásának kérdéskörével. Az 5. fejezet ismertet egy 4 nyúlásmérő bélyeget tartalmazó hasáb típusú erőmérő cellát, amely szerelés közbeni erőmérésre szolgál.

A 6. fejezet egy akkumulátor cellatartóba való szerelését ismerteti. A kvázi-statikus modellezésen és szimuláción túl a rendszer stabilitásának vizsgálata is megtörténik, mind analitikusan, mind numerikusan. A szimulációs- és a gyakorlati mérések eredményei összevetésre kerülnek. Ezen felül a dinamikusan elvégzett szerelési folyamat elméleti tárgyalását is tartalmazza a fejezet. A 7. fejezetben egy erő-visszacsatolással történő robotos szerelés kerül bemutatásra továbbá, szó esik az alkalmazott vezérlési stratégiáról. A 8. fejezet tárgyalja egy intelligens megfogó tervezését, elkészítését, amellyel robotos szerelési folyamatok hajthatók végre. A fejezet kitér a megfogó elektronikai rendszerének tervezésére is, valamint a szerelések során fellépő erő-elmozdulás görbék detektálásának algoritmusára. A 9. fejezet egy rugalmas csuklós szerkezet bepattintásának feladatát-, egy 5 akkumulátort tartalmazó műanyag cellatartó szerelését- és egy finommechanikai elem mérésének lehetőségét tartalmazza a kifejlesztett intelligens robotmegfogó alkalmazására. A Tézisek – Új tudományos eredmények című fejezet ismerteti a doktori kutatómunka során elért, tézis értékű eredményeket. Az összefoglalás tárgyalja az elvégzett feladatokat és a jövőbeni terveket.

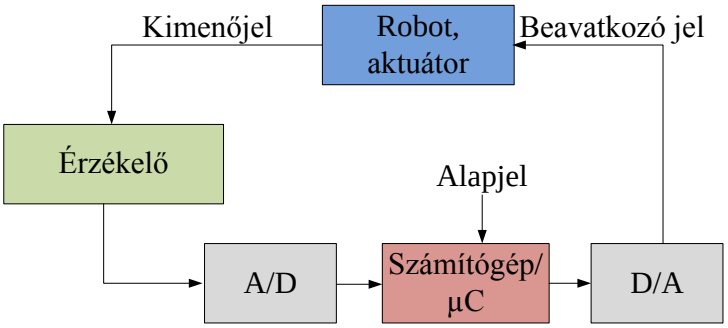
DOI: 10.14750/ME.2020.011

2. IRODALOMKUTATÁS

A doktori kutatómunka megkezdésekor elengedhetetlen volt számos, a témával kapcsolatos szakirodalom tanulmányozása. Először a heptikus koncepciót felhasználó robotos irodalmak kerültek áttekintésre. Az MIT által publikált irodalom [4] részletes leírást tartalmaz a gépi-, számítógépes- és emberi heptikus visszacsatolások főbb jellemzői, illetve azok alkalmazhatósági területei vonatkozásában.

Az emberi heptikus visszacsatolás eszköze az érintés, pl. egy kapcsoló működtetése esetén a kezelő képes érzékelni, azt, amikor az átpattan egyik stabil helyzetéből a másik stabil állapotába, ezért az ember az intelligenciájára alapozva feleslegesen nem nyomja tovább azt. Az érzékelést ebben az esetben az emberi kézben található idegpályák megléte teszi lehetővé. Ezzel szemben a számítógépes heptikus visszacsatolás a virtuális objektumok érintés érzését-, az interakció élményét generálja programok, algoritmusok segítségével, valamilyen közvetítő egységgel pl. force-feedback kormány. Ezen témakör napjainkban igen nagy népszerűségnek örvend és gyorsan fejlődő terület [4]. A disszertáció az emberi- és a számítógépes heptikus visszacsatolásokkal nem foglalkozik.

A disszertációban is alkalmazni kívánt gépi heptikus visszacsatolás értelmében az adott berendezés (pl. robot) tartalmaz erő-visszacsatolást, amelynek segítségével az előzőleg emberek által végzett szerelési-, gyártási műveletek intelligensen kiválthatók. Az [5] könyv részletesen tárgyalja a gépi heptikus visszacsatolás főbb sajátosságait. A [8] irodalom a heptikus témával részletesen foglalkozik, kitér a vezérlési módokra, rendszerekre, általános rendszer struktúrákra, aktuátorok- és szenzorok jellemzőire. A 2.1. ábra azt a példát mutatja be, amikor valamilyen aktuátor esetében pl. erőmérés, fordulatszámmérés történik. A mért jelet visszacsatolva, átalakítva és kiértékelve döntést tud hozni a rendszer, hogy a beavatkozó elem pozíciója, fordulatszáma hogyan alakuljon.

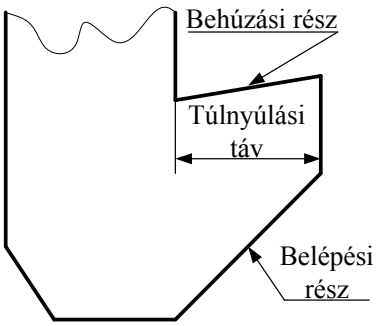


2.1. ábra: A gépi heptikus visszacsatolás egy példája

DOI: 10.14750/ME.2020.011

Homberg és szerzőtársai [6] egy olyan heptikus robotmegfogó kifejlesztésével és munkadarabok felismerésével foglalkoznak, amelynek alkalmazásával különböző tárgyak megfogása válik lehetségessé. Gohil és szerzőtársai [7] egy robotkar vezérélésével foglalkoznak, amely a heptikus visszacsatolást is tartalmazza. Egy emberi karra felerősíthető érzékelő rendszer segítségével válik irányíthatóvá a robotkar. Ezen irodalmak is jól mutatják, hogy a gépi heptikus visszacsatolás fontos szerepet kap az ipari feladatok intelligens kezelésében. Mechatronikai rendszerek tervezését támogatja a VDI 2206 [9] szabvány, amely egy tervezendő megfogó kifejlesztésénél is mérvadó.

Szerelési folyamatok során a bepattanás, vagy átpattanás jelensége számos esetben figyelhető meg. Erre egy jó példa a rögzítő fülek (snap-fit joints) [10], [11], amelyek a mérnöki gyakorlatban gyakran használt eszközök, hogy két összeszerelendő egységet összekapcsoljanak [12]. A bepattanás folyamata során az egyik elem deformálódik, majd csatlakozik a másik féllel [13].



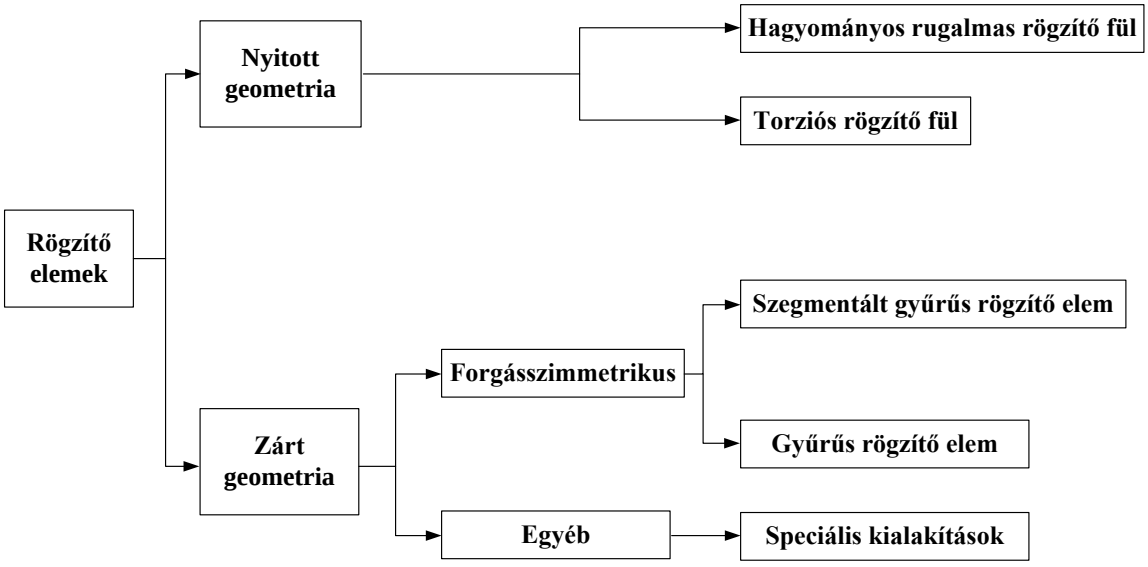
2.2. ábra: Hagyományos rögzítő fül részei

A [11], [12], [14]–[16] irodalmak olyan konzolokkal foglalkoznak, amelyek eseteiben fellép a bepattanás jelensége. Az irodalmak száma is jól mutatja a kitűzött kutatási téma fontosságát. A 2.2. ábrán látható egy hagyományos műanyag rögzítő fül profilja, amelynél a pillanatnyi stabilitásvesztés kimutatható. A mérnöki gyakorlatban többnyire konzol típusú rögzítő elemeket használnak. Az ilyen rögzítő elemekből a szakirodalom 3 félét különböztet meg: hagyományos rögzítő fül, U alakú rögzítő fül, L alakú rögzítő fül [16]. Az L- és U alakú rögzítő füleket szemlélteti a 2.3. ábra. A rögzítő elemek csoportosításának egy lehetséges módját adja a 2.4. ábra.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

2.3. ábra: a) L alakú-, b) U alakú műanyag rögzítő fülek

A [15] szakirodalom rendszerezi a bepattanásra alkalmas rögzítő elemeket. Geometria alapján megkülönböztet nyitott- és zárt kialakítású füleket. A bepattanással járó szerelés közben stabilitásvesztés lehet, így a kutatómunka során a témába illő szakirodalmak felkutatása volt az egyik kitűzött cél. A [10] irodalom foglalkozik hagyományos rögzítő fülek 2D-s modellezésével ANSYS szoftverben és a nemlineáris kontakt feladat vizsgálatával is. Bepattanási folyamatok numerikus szimulációját részletezi a [13] irodalom. Erő-elmozdulás diagramokat ábrázol, a bepattanást és a kipattanást is szemlélteti, ezáltal egy hiszterézis görbét kapott.



2.4. ábra: Rögzítő elemek csoportosítása

A [17] irodalom kitér a robottal történő szerelési folyamatokra, továbbá bepattanással járó konzolokat is tanulmányoz. Átpattanás jelenségét a [18] mutatja be részletesen egy héjelemen keresztül. Az erő-elmozdulás jelleggörbéket is meghatározza szimulációval, továbbá, [19]–[21] irodalmak az átpattanás jelenségének viselkedésével, megoldásával foglalkoznak. A [22] irodalom egy rögzítő fül szerelési folyamatait vizsgálja, és egy analitikus modell előállítását tárgyalja, amellyel elérhető egy heptikus eszköz alkalmazása

DOI: 10.14750/ME.2020.011

mellett a valóságot reprezentáló virtuális erő-visszacsatolás. A disszertációban kifejlesztendő megfogóval az ilyen természetű szerelési folyamatok kezelése válhat majd lehetővé.

A bepattanásra alkalmas rögzítő elemek végeselem-módszerrel jól modellezhetők. Nemlineáris végeselemes mechanikai feladatokra kétféle leírásmód terjedt el, ezek az UL (Updated Lagrangian) [23] és a TL (Total Lagrangian) [23], [24]. Kis deformációk, valamint nagy elmozdulásoknál a forgások kezelése alapvető fontosságú. A co-rotációs módszer [25]–[27] alkalmazásával a deformációk és a merevtestszerű elmozdulások szétválaszthatók. Hasonló elvet foglal magába az UL leírási mód is. Az elemekhez kötött lokális koordinátarendszer alkalmazása szükséges, így a csomóponti szögelfordulások csak deformációt eredményeznek. A [25]–[27] irodalmak kellő részletességgel tárgyalják a síkbeli hajlékony rúdszerkezetek végeselemes formuláit, amelyek alapján a bepattanás jelenségét szimuláló algoritmus fejleszthető ki.

Szerelési folyamatok járhatnak pillanatnyi stabilitásvesztéssel, az ilyen esetekben célszerű vizsgálatokat folytatni, hogy a stabilitás határa megállapítható legyen. A stabilitás koncepciója a mechanikában már a korai időkben is kutatott terület volt, hogy a rendszerek bizonyos egyensúlyi típusai jellemezhetővé váljanak [28], [29]. A mechanikai stabilitásra vonatkozóan a klasszikus értelemben vett megállapítást Dirichlet tette a XIX. században [30]. A XIX. század végén Lyapunov [31] volt az, aki áttörő eredményt ért el a stabilitás elméletében. Egyik lényeges eleme a Lyapunov-függvény alkalmazása pl. [32]. Ezek az elméletek alkalmasak stabilitásvesztéssel járó bepattanási jelenségek elemzésére.

A kutatómunka során az erőmérők alkalmazásának és működésének tanulmányozása is fontos szempont volt, mivel a kifejlesztendő intelligens megfogó egység is tartalmaz majd erőmérést. Az erőmérőket csoportosíthatjuk működési elvük szerint, így lehetnek piezorezisztív, piezoelektromos, kapacitív és optikai elven működő típusok [33]. Az erőmérők pl. szerszámgépek gyártása közben fellépő erőkomponensek időbeli alakulásáról adhatnak tájékoztatást [34]. A [34] irodalom alapján fúrási műveletek vizsgálata válik lehetségessé a beépítésükkel. Humanoid, azaz emberszerű robotok alkalmazásánál is számos lehetőség mutatkozik, pl. egy hüvelykujjra rögzíthető két különböző típusú erőmérő egység összehasonlító mérését tárgyalja a [35].

Az irodalomkutatás további részét az intelligens robotmegfogó kialakítások keresése képezte. A [36]–[39] által mutatott példák jól prezentálják a robotok szerelésben történő

DOI: 10.14750/ME.2020.011

felhasználását. Számos kereskedelemben kapható robotmegfogó elérhető. Ezeknek a megfogó pofái nem tartalmaznak általában bonyolult geometriát [36], [40], amelyek munkadarab specifikus esetekben elengedhetetlenek lennének. Három ujjas megfogók is elterjedtek [41].

A doktori kutatómunka során egy olyan intelligens robotmegfogó megtervezése az egyik fő cél, amellyel szerelési irányú erő-visszacsatolást tartalmazó folyamatok végezhetők el. A kereskedelemben kapható ipari robotok többnyire nem tartalmazzák a heptikus visszacsatolást, pedig az fontos lehet, különösképpen a szerelési folyamatokra vonatkozóan [42]. Csupán általában a túlterhelést megakadályozó leállással járó biztonsági funkció áll rendelkezésre. A munkafolyamatok elvégzéséhez egy intelligens robotmegfogó szükséges, amely visszajelzést ad pl. a megfogás szorító erejéről, vagy, hogy egy adott művelet megtörtént-e. A kereskedelemben kaphatók olyan intelligens robotmegfogók, amelyekkel a rendszer megbízhatóbbá tehető, azonban ezek többnyire drágák és csak korlátozottan programozhatók.

A [43] irodalom jól mutatja, hogy egy rugalmas elemre felszerelt nyúlásmérő bélyegekkel egy egyedileg kialakított intelligens megfogó hozható létre, amely csiszolásra használható. A [44] egy olyan orvosi célokat szolgáló csipesz alakú piezoelektromos megfogó prototípust ismertet, amely képes az erő- és pofák távolságának mérésére.

A kereskedelemben kapható erőmérő cellák ipari robothoz illeszthetők, így hozva létre az erő-visszacsatolást, amely a folyamat közben tapasztalt erők alakulásáról ad visszajelzést [45]. A 3D-s nyomtatók megjelenésével napjainkban már különböző, egyedi célokat szolgáló megfogó pofák gyárthatók [46]. Intelligens megfogókra nemcsak a gyárakban lehet szükség, hanem pl. gyümölcsök betakarításánál [47] is, valamint az egészségügyben, azon belül is rehabilitációs célokra. Erre jó példa a [48] által tárgyalt, az idős emberek járását segítő robotkar prototípusának kiépítése, a kar egy sínrendszer segítségével otthonokba telepíthető.

A [49] irodalom olyan kétpofás megfogó prototípusokat tartalmaz, amelyek az eddigi ember által végzett szerelési folyamatokat hivatottak automatizálni. A koncepció tervezésénél fő szempont volt, hogy elérhető legyen a munkadarabok roncsolás mentes megfogása. A robotok erővezérlésnek számos algoritmusa ismert, ilyenek pl. a tisztán impedancia vezérlés, vagy a merevségi vezérlés [50], illetve hibrid vezérlés [51], amely egy robotos csiszolási teszt alkalmazáson keresztül ismerteti az eredményeit.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

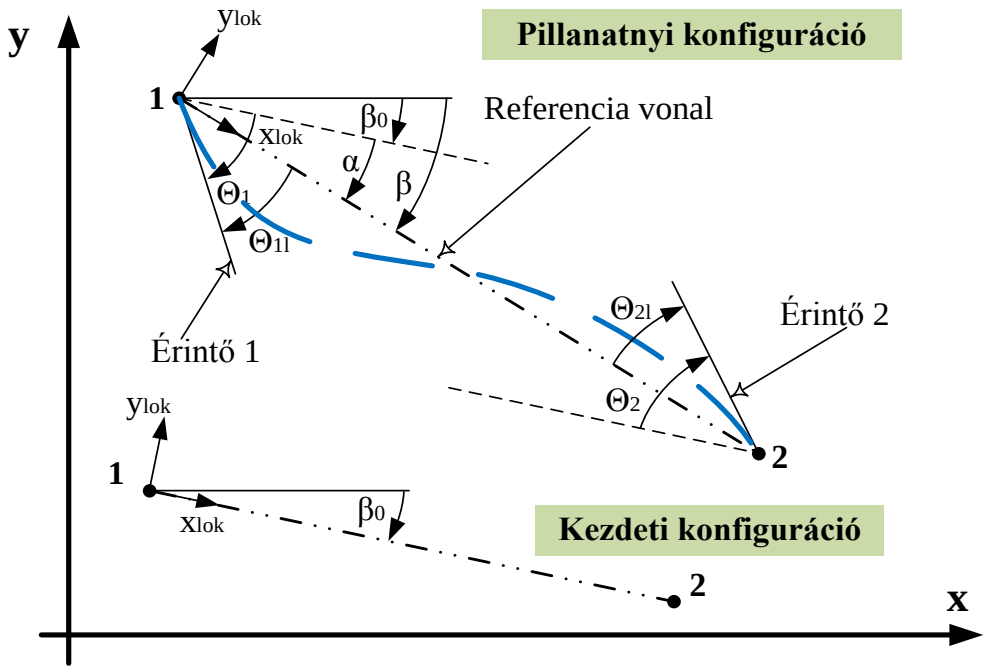
Már 2003-ban is kutatott terület volt a robottal történő automatikus összeszerelés [52]. Egy mobiltelefon kézzel végzett szerelési lépései bemutatása után egy erőmérővel ellátott kartéziuszi ipari robot felhasználásával kiépítésre került egy külső erővezérlés hibrid keretrendszerrel. Az így létrehozott rendszer a mobiltelefon szerelésének lépéseit automatikusan elvégezte [52]. Akkoriban már megalkottak olyan robotos összeszerelő rendszereket is [53], amelyek mellett megjelentek a képfeldolgozó- és az erőmérő rendszerek, mint visszajelzést adó szenzorok. Ugyancsak egy képfeldolgozó rendszer és egy erőmérő rendszer kombinálásával egy hibrid vezérlőrendszer építhető ki, amely implementálható ipari robotokhoz pl. SCARA [54] típusú ipari robothoz. Már ekkor népszerű, megoldandó problémának minősült a csap-furat (peg–hole) szerelési folyamat [53], [55], [56]. Az [55] irodalom kitér arra, hogy vannak olyan szerelési folyamatok, ahol nem célszerű csak pozícióvezérlést alkalmazni, hanem az erő-visszacsatolás is szükséges.

Az itt bemutatott szakirodalmak jó elméleti hátteret biztosítanak egy új, intelligenciával rendelkező robotmegfogó kifejlesztéséhez.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

3. RUGALMAS, HAJLÉKONY RÚDSZERKEZETEK NUMERIKUS MODELLEZÉSE

A szerelési folyamatoknál, különösen a műanyag rögzítő fülekkel ellátott eszközök esetén nagy elmozdulás és kis alakváltozás tapasztalható. Ahhoz, hogy ezeket a rugalmas, hajlékony rúdszerkezeteket modellezni lehessen, a nagy elmozdulás és kis deformációkra alapozott co-rotációs módszer használata célszerű megoldást nyújt [25], [26].



3.1. ábra: Egy rúdelem kezdeti és pillanatnyi konfigurációja

Egy rúdelem kezdeti- és pillanatnyi konfigurációját mutatja a 3.1. ábra. A 3.1. ábrán az α szög a kezdeti konfigurációtól mért szöget-, a Θ_1 és a Θ_2 a globális csomóponti szögelfordulásokat-, a Θ_{1l} és a Θ_{2l} a lokális csomóponti szögelfordulásokat-, β_0 a kezdeti konfiguráció szögét-, míg β a deformálódott helyzetben lévő koordinátarendszer szögét jelentik. A rúdelem mentén a deformálódott alakot jellemző elmozdulást a rúd irányában folytonos lineáris függvénnyel, míg rá merőlegesen folytonos harmadfokú polinommal közelítjük. Így az ábrán vázolt deformálódott alak minden pontjában, ideértve a végpontokat is, az érintő, azaz a derivált folytonosan előállítható. A több véges elemre felosztott szerkezetekben a köztes csomópontoknál az elmozdulást és annak deriváltját is folytonossá tesszük, így mindkét oldali derivált megegyezik. A csuklós csomópontokban csak az elmozdulásokat illesztjük, azonban a deriváltakban szakadás lesz.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

Souza [27] alapján felírható a lokális csomóponti szögelfordulásokra a következő összefüggés, amely tetszőleges szögelfordulásra helyes értéket eredményez:

$$\Theta_{1l} = \operatorname{atan}\left(\frac{\sin(\Theta_{1l})}{\cos(\Theta_{1l})}\right) = \operatorname{atan}\left(\frac{\cos(\beta)\sin(\beta_1) - \sin(\beta)\cos(\beta_1)}{\cos(\beta)\cos(\beta_1) + \sin(\beta)\sin(\beta_1)}\right), \tag{3.1}$$

$$\Theta_{2l} = \operatorname{atan}\left(\frac{\sin(\Theta_{2l})}{\cos(\Theta_{2l})}\right) = \operatorname{atan}\left(\frac{\cos(\beta)\sin(\beta_2) - \sin(\beta)\cos(\beta_2)}{\cos(\beta)\cos(\beta_2) + \sin(\beta)\sin(\beta_2)}\right), \tag{3.2}$$

ahol $\beta_1 = \Theta_1 + \beta_0$ és $\beta_2 = \Theta_2 + \beta_0$. A fenti két összefüggés nagy előnye az, hogy a rúd többszöri körülfordulásakor is helyes értékeket fog szolgáltatni. A lokális axiális elmozdulást Crisfield alapján [26] a következőképpen célszerű numerikusan számítani:

$$u_L = \frac{L^2 - {L_0}^2}{L + L_0}, \tag{3.3}$$

ahol L_0 a kezdeti-, L a rúdelem deformálódott hossza.

A P rúdirányú erő felírható:

$$P = \frac{EAu_L}{L_0}, \tag{3.4}$$

ahol E a Young modulus, míg A a rúd keresztmetszetét jelöli. A rúdelem csomóponti nyomatékai a lokális csomóponti szögelfordulásoktól függenek

$$M_1 = \frac{EI}{L_0}(4\Theta_{1l} + 2\Theta_{2l}), \tag{3.5}$$

$$M_2 = \frac{EI}{L_0}(2\Theta_{1l} + 4\Theta_{2l}), \tag{3.6}$$

ahol I a keresztmetszet másodrendű tehetetlenségi nyomatéka.

Feltéve, ha nem hat erő a rúdra merőlegesen a csomópontjai között, a nyíróerők számítására a következő összefüggések alkalmasak

$$V_1 = \frac{M_1 + M_2}{L_0}, \tag{3.7}$$

$$V_2 = -\frac{M_1 + M_2}{L_0}. \tag{3.8}$$

Az általánosított csomóponti erőket (3.4 – 3.8) az $\bar{\mathbf{f}}_\mathbf{i}^\mathbf{e}$ lokális elemi belső tehervektor fogja tartalmazni

DOI: 10.14750/ME.2020.011

$$\bar{\mathbf{f}}_{\mathbf{i}}^{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} -P \\ V_1 \\ M_1 \\ P \\ V_2 \\ M_2 \end{bmatrix}. \tag{3.9}$$

A $\bar{\mathbf{q}}^{\mathbf{e}}$ elemi lokális csomóponti elmozdulások vektora is megadható

$$\bar{\mathbf{q}}^{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \Theta_{1l} \\ u_2 \\ v_2 \\ \Theta_{2l} \end{bmatrix}. \tag{3.10}$$

A lokális elemi belső tehervektor és az elemi lokális csomóponti elmozdulás vektor áttranszformálható globális koordinátarendszerbe (x, y):

$$\mathbf{f}_{\mathbf{i}}^{\mathbf{e}} = \mathbf{T}_{\mathbf{e}}^{\mathbf{T}} \bar{\mathbf{f}}_{\mathbf{i}}^{\mathbf{e}}, \qquad \mathbf{q}^{\mathbf{e}} = \mathbf{T}_{\mathbf{e}}^{\mathbf{T}} \bar{\mathbf{q}}^{\mathbf{e}}, \tag{3.11}$$

ahol $\mathbf{T}_{\mathbf{e}}^{\mathbf{T}}$ a $\mathbf{T}_{\mathbf{e}}$ transzformációs mátrix transzponáltja:

$$\mathbf{T}_{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{3.12}$$

A szerkezeti belső tehervektor megadható:

$$\mathbf{f}_{\mathbf{i}} = \sum_{e} \mathbf{f}_{\mathbf{i}}^{\mathbf{e}}, \tag{3.13}$$

ha az összes $\mathbf{f}_{\mathbf{i}}^{\mathbf{e}}$ elemi belső tehervektort összegezzük, amelyeknek rangja megegyezik az $\mathbf{f}_{\mathbf{i}}$ szerkezeti belső tehervektoréval. Minden eleme az $\mathbf{f}_{\mathbf{i}}^{\mathbf{e}}$ vektornak nulla, kivéve azokat, amelyek az e-dik elemhez tartoznak [57].

A lokális koordinátarendszerben lévő tangenciális merevségi mátrix a globális- és a lokális koordinátarendszerekben felírt belső erőknek a virtuális elmozdulásokon végzett munkájából származtatható Crisfield [26] szerint. A $\bar{\mathbf{K}}_{\mathbf{t}}^{\mathbf{e}}$ lokális tangenciális merevségi mátrix tartalmazza a $\bar{\mathbf{K}}_{\mathbf{L}}^{\mathbf{e}}$ lineáris merevségi mátrixot és a geometriai merevségi mátrixot is:

DOI: 10.14750/ME.2020.011

$$\overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{t}}^{\mathbf{e}} = \overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{L}}^{\mathbf{e}} + \overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{g}}^{\mathbf{e}}. \tag{3.14}$$

A lokális lineáris merevségi mátrixa a következőképpen írható fel:

$$\overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{L}}^{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L_0} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L_0} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{{L_0}^3} & \frac{6EI}{{L_0}^2} & 0 & -\frac{12EI}{{L_0}^3} & \frac{6EI}{{L_0}^2} \\ 0 & \frac{6EI}{{L_0}^2} & \frac{4EI}{L_0} & 0 & -\frac{6EI}{{L_0}^2} & \frac{2EI}{L_0} \\ -\frac{AE}{L_0} & 0 & 0 & \frac{AE}{L_0} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{{L_0}^3} & -\frac{6EI}{{L_0}^2} & 0 & \frac{12EI}{{L_0}^3} & -\frac{6EI}{{L_0}^2} \\ 0 & \frac{6EI}{{L_0}^2} & \frac{2EI}{L_0} & 0 & -\frac{6EI}{{L_0}^2} & \frac{4EI}{L_0} \end{bmatrix}. \tag{3.15}$$

A co-rotációs leírásmódnál a geometriai merevségi mátrix két részből tevődik össze, az első $\overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{g1}}^{\mathbf{e}}$ a rúd axiális megnyúlását/rövidülését-, a második $\overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{g2}}^{\mathbf{e}}$ a nyírásból következő változást veszi figyelembe:

$$\overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{g1}}^{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{AEu_l}{{L_0}^2} & 0 & 0 & -\frac{AEu_l}{{L_0}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{AEu_l}{{L_0}^2} & 0 & 0 & \frac{AEu_l}{{L_0}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.16}$$

$$\overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{g2}}^{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{M_2+M_1}{{L_0}^2} & 0 & 0 & -\frac{M_2+M_1}{{L_0}^2} & 0 \\ \frac{M_2+M_1}{{L_0}^2} & 0 & 0 & -\frac{M_2+M_1}{{L_0}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{M_2+M_1}{{L_0}^2} & 0 & 0 & \frac{M_2+M_1}{{L_0}^2} & 0 \\ -\frac{M_2+M_1}{{L_0}^2} & 0 & 0 & \frac{M_2+M_1}{{L_0}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{3.17}$$

Az elem merevségi mátrixai és tehervektorai [58] szerint származtathatók a virtuális elmozdulás elvéből az elmozdulások approximációjával is:

DOI: 10.14750/ME.2020.011

$$0 = \delta W_{ext} - \delta W_{int}, \tag{3.18}$$

ahol δW_{ext} a külső erők virtuális munkája, δW_{int} pedig a belső erők virtuális munkája. A belső erők virtuális munkája:

$$\delta W_{int} = \int_0^L \int_A \sigma_x \delta \varepsilon_x \, dA dx, \tag{3.19}$$

ahol a rúdirányú feszültség $\sigma_x = E\varepsilon_x$, E a Young modulus és ε_x a rúdirányú megnyúlás síkbeli esetben felírható:

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} - y\left(\frac{d^2v}{dx^2}\right) + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{du}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dx}\right)^2\right], \tag{3.20}$$

ahol u az x irányú, v pedig az y irányú elmozdulás komponensek. A (3.20) kifejezést (3.19)-be behelyettesítve és átalakítva adódik:

$$\begin{aligned}\delta W_{int} = \int_0^L \left(\frac{du}{dx}\right) AE \left(\frac{d\delta u}{dx}\right) dx + \int_0^L \left(\frac{d^2v}{dx^2}\right) EI_z \left(\frac{d^2\delta v}{dx^2}\right) dx + \\ + \frac{1}{2}\int_0^L A\sigma_x \left[\delta\left(\frac{du}{dx}\right)^2 + \delta\left(\frac{dv}{dx}\right)^2\right] dx,\end{aligned} \tag{3.21}$$

felhasználva, hogy a keresztmetszet másodrendű tehetetlenségi nyomatéka $I_z = \int_A y^2 \, dA$ [58]. A külső erők virtuális munkája a következő alakban írható fel

$$\delta W_{ext} = \delta u F_{kül.}, \tag{3.22}$$

ahol $F_{kül.}$ jelenti a külső erőt, amely lehet súlyerő stb.

Elemenként a rúdirányú elmozdulást lineárisan, rúdra merőlegesen köbös függvénnyel approximáljuk:

$$u = (1 - \xi)u_1 + \xi u_2, \tag{3.23}$$

$$v = (1 - 3\xi^2 + 2\xi^3)v_1 + (1 - 2\xi + \xi^2)\Theta_{1l} + (3\xi^2 - 2\xi^3)v_2 - (\xi - \xi^2)\Theta_{2l}, \tag{3.24}$$

ahol ξ izoparametrikus paraméter, értéke 0 és 1 között változik.

A módszer előnye, hogy a geometriai merevségi mátrix származtatásánál a rúd menti terhelés hatását konzisztensen veszi figyelembe, míg a co-rotációs módszer csak a csomóponti mennyiségeket.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

$$\overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{g3}}^{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6}{5} & \frac{L_0}{10} & 0 & -\frac{6}{5} & \frac{L_0}{10} \\ 0 & \frac{L_0}{10} & \frac{2{L_0}^2}{15} & 0 & -\frac{L_0}{10} & \frac{{L_0}^2}{30} \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6}{5} & -\frac{L_0}{10} & 0 & \frac{6}{5} & -\frac{L_0}{10} \\ 0 & \frac{L_0}{10} & \frac{{L_0}^2}{30} & 0 & -\frac{L_0}{10} & \frac{2{L_0}^2}{15} \end{bmatrix}. \tag{3.25}$$

A lokális elemi tangenciális merevségi mátrix áttranszformálható (x, y) globális koordinátarendszerbe:

$$\mathbf{K}_{\mathbf{t}}^{\mathbf{e}} = \mathbf{T}_{\mathbf{e}}^{\mathbf{T}} \overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{t}}^{\mathbf{e}} \mathbf{T}_{\mathbf{e}} \ . \tag{3.26}$$

A szerkezetre vonatkozó tangenciális merevségi mátrix megkapható

$$\mathbf{K}_{\mathbf{t}} = \sum_{e} \mathbf{K}_{\mathbf{t}}^{\mathbf{e}}, \tag{3.27}$$

ahol az összegzés hasonlóan történik, mint (3.13) esetében.

3.1. Az érintkezési feladat megfogalmazása

A műszaki életben gyakran fordulnak elő olyan szerkezetek, amelyek egymással érintkeznek. Két test közötti kapcsolat lehet egy-, illetve kétoldalú. Egyoldalú esetben az érintkezési feszültség csak a testbe mutathat, míg kétoldalú esetben az érintkezési feszültség irányára nincs megkötés [59]. Normál kontakt feladatnál az érintkezési erő iránya mindig merőleges az érintkező felületre.

A Signorini-féle kontakt feltétel [59], [60], értelmében az érintkezést egy nem reguláris függvénnyel lehet leírni, amely szorzat alakban írható fel

$$p_c d = 0, \tag{3.28}$$

ahol p_c a kontakt nyomás és d a hézag. Érintkezéskor $p_c \geq 0$ és a d hézag egyenlő nullával, minden más esetben a kontaktnyomás nulla, míg a hézag nagyobb, mint zérus.

Az érintkezési feladat variációs elvét először Signorini fogalmazta meg [59]. A 3.2. ábra által mutatott érintkezési példában egy merev test és egy rugalmas rúd között jön létre az érintkezés. A merev test külső felülete ismert, $f(x, y) = 0$. A rugalmas szerkezet kezdeti állapotát szaggatott vonal jelöli. A variációs elvekre alapozott érintkezési feladatokat

DOI: 10.14750/ME.2020.011

többféle módszerrel lehet felírni pl. a Lagrange-féle multiplikátor felhasználásával, valamint a büntetőparaméteres technika alkalmazásával. A büntetőparaméteres esetben az érintkezési nyomás pozitivitását a büntető paraméter, azaz egy nyomott rugó fogja biztosítani.

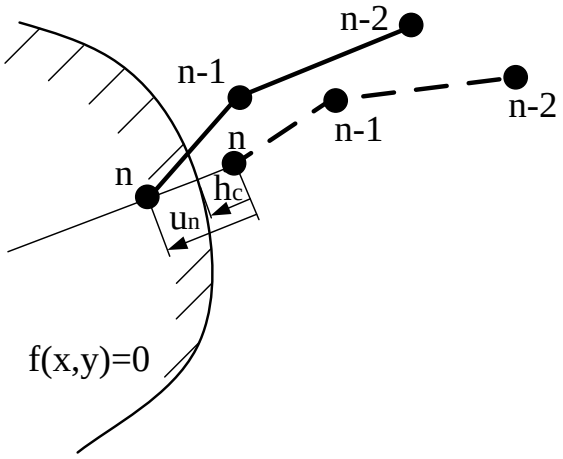
A későbbiekben tanulmányozott bepattanási feladatokban egy-egy pontban történő érintkezési feladatokat vizsgálunk. Ehhez a büntetőparaméteres technikát alkalmazzuk az alábbi variációs alakban, összhangban az [59] hivatkozással:

$$\delta W_{ext} - \delta W_{int} - \frac{1}{2} c d^{-} \delta d^{-}(u_n) = 0, \tag{3.29}$$

ahol c a büntető paraméter, d^{-} a 3.2. ábra alapján negatív túlfedést jelent, rugalmas és merev test érintkezésekor a következő módon fejezhető ki:

$$d^{-} = -u_n + h_c, \tag{3.30}$$

ahol u_n a normális irányú elmozdulás, h_c a kezdeti hézag. A normál irányú kontakt erő egyenlő a $-cd^{-}$ szorzattal.



3.2. ábra: Rugalmas rúd érintkezése merev felülettel

Létezik még a kombinált technika is, amely az előbb bemutatott elvet bővíti a számolt érintkezési erő mindkét test hozzáadásával.

A kutatáshoz kapcsolódó feladat megoldása során elegendő a kinematikai feltétel-, azaz a $d = 0$ biztosítása és az ebből származó kinematikai teher meghatározása. A vizsgálandó szerelési folyamatoknál az érintkezés többnyire egy merev felület és a rugalmas szerkezet egy pontja között vagy egy vonal mentén valósul meg. Úgy, hogy a kontakt erő a vonal mentén jó közelítéssel konstansnak tekinthető, így egyszerűsített modell szintjén egy

DOI: 10.14750/ME.2020.011

pontban történő érintkezéssel is leírható (lásd: 3.2. ábra).

Az érintkező csomópont elmozdulásait előnyös áttranszformálni egy lokális koordinátarendszerbe, amelynek tengelyeit a normális- és a tangenciális irányok adják. A normális és a tangenciális egységvektorokat rendre $\mathbf{e_n}$, $\mathbf{e_t}$ jelölik. A $\mathbf{T_n}$ transzformációs mátrix felépíthető az $\mathbf{e_n}$, $\mathbf{e_t}$ egységvektorok felhasználásával.

$$\mathbf{T_n} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{3.31}$$

A tangenciális merevségi mátrix és a belső erők tehervektora szétbonthatók almátrixokra összhangban az n utolsó csomóponttal és az r többi csomóponttal:

$$\mathbf{K_t} = \begin{bmatrix} \mathbf{K_{t(r,r)}} & \mathbf{K_{t(r,n)}} \\ \mathbf{K_{t(n,r)}} & \mathbf{K_{t(n,n)}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{f_{i(r)}} \\ \mathbf{f_{i(n)}} \end{bmatrix}. \tag{3.32}$$

A strukturális transzformációs mátrix is megadható almátrixokkal:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T_n} \end{bmatrix}, \tag{3.33}$$

ahol **I** az egységmátrixot jelöli, melynek rangja megegyezik $\mathbf{K_{t(r,r)}}$ almátrix rangjával.

A **T** transzformációs mátrix, a $\mathbf{K_t}$ tangenciális merevségi mátrix és az $\mathbf{f_i}$ belső erők tehervektora ismeretében azok áttranszformálhatók

$$\widehat{\mathbf{K}}_\mathbf{t} = \mathbf{T^T K_t T}, \tag{3.34}$$

$$\hat{\mathbf{f}}_\mathbf{i} = \mathbf{T^T f_i}. \tag{3.35}$$

A normális irányban, az érintkezésben részt vevő n-dik csomópontra adható u_n kinematikai elmozdulás

$$u_n = \begin{cases} 0, & \text{ha } d \geq f(x_n, y_n) \geq 0, \\ -d, & \text{ha } d = f(x_n, y_n) < 0, \end{cases} \tag{3.36}$$

ahol az $f(x_n, y_n)$ az érintkező csomópont koordinátáinak függvénye. Ez adja majd a kinematikai terhet, amelyet az $\mathbf{f_u}$ oszlopvektor jelöl. A tangenciális súrlódó erő az F_c Coulomb-féle súrlódási törvény alapján a normális kontakt erőből számítható

$$F_c = \mu N, \tag{3.37}$$

DOI: 10.14750/ME.2020.011

amely az n-dik csomópontnál tangenciális irányban hat, ezt tartalmazza az $\mathbf{f_c}$ tehervektor. Megjegyezzük, hogy a szerelés során végig mozgó súrlódási állapot lép fel és a tangenciális erő iránya a relatív tangenciális sebességgel ellentétes irányú.

A nemlineáris feladat megoldására alkalmazott Newton-Raphson módszerrel egyensúlyi iterációt hajtunk végre $k = 1, 2, 3, \ldots$, lépésekben

$$ {}^{t+\Delta t}\widehat{\mathbf{K}}_{\mathbf{t}}^{(k)} \Delta\mathbf{q}^{(k)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_{\mathbf{u}}^{(k)} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_{\mathbf{c}}^{(k-1)} - {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{f}}_{\mathbf{i}}^{(k-1)}, \tag{3.38} $$

$$ {}^{t+\Delta t}\mathbf{q}^{(k)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{q}^{(k-1)} + \Delta\mathbf{q}^{(k)}, \tag{3.39} $$

a kezdeti értékek megadásával

$$ {}^{t+\Delta t}\mathbf{q}^{(0)} = {}^{t}\mathbf{q}, \quad {}^{t+\Delta t}\widehat{\mathbf{K}}_{\mathbf{t}}^{(0)} = {}^{t}\widehat{\mathbf{K}}, \qquad {}^{t+\Delta t}\mathbf{f}_{\mathbf{c}}^{(0)} = {}^{t}\mathbf{f}_{\mathbf{c}}, \quad {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{f}}_{\mathbf{i}}^{(0)} = {}^{t}\hat{\mathbf{f}}_{\mathbf{i}}, \tag{3.40} $$

ahol $\Delta\mathbf{q}^{(k)}$ a belső csomóponti elmozdulások növekményvektora. Az iteráció megáll, ha a következő feltétel teljesül:

$$ \frac{\left\|\Delta\mathbf{q}^{(k)}\right\|}{\left\|{}^{t+\Delta t}\mathbf{q}^{(k)}\right\|} \leq tol, \tag{3.41} $$

ahol tol az elmozdulás konvergencia a felhasználó által előírt tolerancia értéke. Felhasználva az $\hat{f}_{nx}, \hat{f}_{ny}$ belső erők tehervektorának $\hat{\mathbf{f}}_{\mathbf{i}}$ erőértékeit az érintkező csomópontban, a ${}^{t+\Delta t}N_y$ normális irányú kontakt terhelésnek az y irányú szerelés komponense minden lépésben meghatározható

$$ {}^{t+\Delta t}N_y = -{}^{t+\Delta t}\hat{f}_{nx} \sin\gamma \cos\gamma + {}^{t+\Delta t}\hat{f}_{ny} (\sin\gamma)^2. \tag{3.42} $$

Megjegyezzük, hogy a ${}^{t+\Delta t}N_y$ értéke a szerelés irányával ellentétes az átpattanás előtt és megegyező irányú az átpattanási határ után.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

4. MECHANIKAI EGYENSÚLY STABILITÁSÁNAK VIZSGÁLATA

Eleinte a stabilitás fogalma a mechanikára korlátozódott, a mechanikai rendszerek egyensúlyának bizonyos típusait jellemezték e fogalommal [29]. Rugalmas testek egyensúlyi helyzetét megzavarva, kis mozgások után általában visszatérnek nyugalmi helyzetükbe. Vannak azonban olyan esetek is, amikor ez a visszatérés nem következik be, ekkor elmondható, hogy az egyensúlyi pont instabil. Azt a terhelést, amelynél már az egyensúly stabilitása megszűnik, kritikus terhelésnek hívjuk [61]. A mechanikai stabilitás központi tételét először Lagrange fogalmazta meg: Egy konzervatív rendszer mechanikai egyensúlya stabil minden olyan pontban, ahol a potenciálfüggvénynek szigorú minimuma van [29]. Az állítását csak kvadratikus alakú potenciálfüggvény esetében bizonyította. A tétel általános bizonyítását először Dirichlet adta, amely Lyapunov teljes direkt módszerének alapját adta [29].

Az egyensúlyi helyzet kvázi statikus esetben történő vizsgálatára a Dirichlet-elv alkalmazható, amely a Π teljes potenciális energiát használja fel. Az elv kimondja, hogy akkor tekinthető stabilnak az egyensúlyi helyzet, ha a Π potenciális energiának minimuma van, tehát ennek értelmében a szükséges és az elégséges feltételek a következők:

$$\delta\Pi_P = 0, \qquad \delta^2\Pi_P > 0, \tag{4.1}$$

azaz a potenciális energia első- és második variációját kell meghatározni.

Az egyensúlyi helyzet indifferensnek tekinthető, ha az első- és a második variáció is zérussal egyenértékű, és további vizsgálatokat von maga után [61].

Stabilitás vizsgálati feladatok gyakran csak konzervatív erőket tartalmaznak, azonban lehetnek olyanok is, amelyeknél ezen erők mellett nem konzervatív erők is jelen vannak. Az ilyen típusú stabilitási problémák az L. Salvadori [28], [29] által kidolgozott tétel segítségével vizsgálhatók.

Tétel 1. (L. Salvadori [28], [29]) Ha a Π potenciális energiának van minimuma a $\mathbf{q} = \mathbf{0}$ helyen, a $\mathbf{q} = \mathbf{0}$ egyensúly izolált; a disszipáció teljes, azaz bizonyos $a \in \mathcal{K}$: függvényre: $\mathbf{Q} \cdot \dot{\mathbf{q}} \leq -a(\|\dot{\mathbf{q}}\|)$; így a $\mathbf{q} = \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$ egyensúly aszimptotikusan stabil. Ha Π-nek nincs minimuma $\mathbf{q} = \mathbf{0}$-ban, akkor a $\mathbf{q} = \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$ egyensúly instabil.

Megjegyzés: A $\mathcal{K}$ egy olyan függvényosztály, amely $a: \mathcal{R}^+ \to \mathcal{R}^+$, ha $a(0) = 0$ és a folytonos, monoton növekvő függvény. A tételben szereplő $\mathbf{q}$ egy oszlopvektor, amely

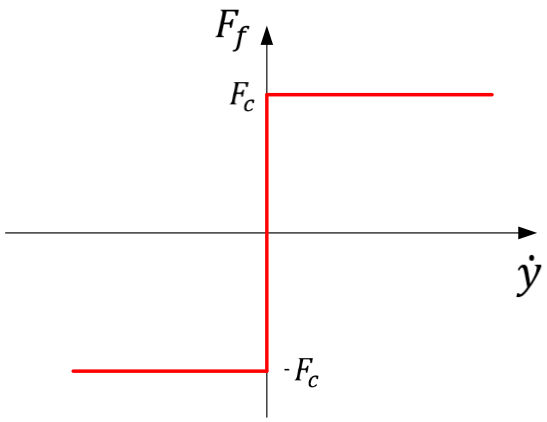
DOI: 10.14750/ME.2020.011

tartalmazza az általános koordinátákat, a $\dot{\mathbf{q}}$ pedig az általános sebességek oszlopvektora és a $\mathbf{Q}$ az általánosított erők sorvektora. A bepattanás szempontjából a tétel utolsó állítása lesz döntő az instabilitás kérdésében.

A szerelési folyamatoknál tapasztalható disszipatív erők miatt érdemes a szóba jöhető súrlódási modelleket áttekinteni [62]–[64]. A csúszási sebesség függvényében mutatja a 4.1. ábra a Coulomb súrlódási erő értelmezését. A súrlódási erőt az alábbi összefüggés alapján lehet meghatározni:

$$F_f = \begin{cases} F_c sgn(\dot{y}), & \text{ha } \dot{y} \neq 0, \\ F_{alk}, & \text{ha } \dot{y} = 0 \text{ és } F_{alk} < F_c, \end{cases} \tag{4.2}$$

ahol F_{alk} a testre alkalmazott erő, $\dot{y}$ a csúszási sebesség, az F_c a Coulomb féle csúszási súrlódási erő, amely (3.37) alapján értelmezhető. A Coulomb-féle súrlódást gyakran száraz súrlódásnak feltételezik, azonban a modellt száraz- és vegyes, kent állapotbeli érintkezéseknél is alkalmazzák [62].



4.1. ábra: Súrlódási erő a csúszási sebesség függvényében

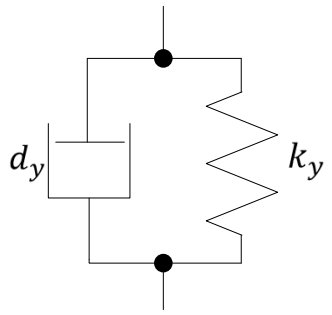
A viszkoelasztikus kifejezés feltételezi az anyagról, hogy időben egyszerre mutat viszkózus és elasztikus tulajdonságot. A viszkoelasztikus modellek építőelemei a rugók és csillapítások [65].

Az adhézió leírására alkalmazható a Voigt-Kelvin modell, amely párhuzamosan kapcsolt csillapítás- és rugó párosból tevődik össze [66] (lásd: 4.2. ábra). Mivel a két elem egymással párhuzamosan van kapcsolva, így a nyúlás mindkét elem esetén azonos lesz.

Léteznek még egyéb viszkoelasztikus modellek [65]: a Maxwell modell, amely a csillapítást a rugó után sorba kötve használja, így a nyúlás mértéke nem fog megegyezni, szemben a Voigt-Kelvin modellel. A Zener modell (SLS – Standard Linear Solid modell) a Maxwell

DOI: 10.14750/ME.2020.011

modellhez párhuzamosan hozzákapcsol még egy rugót.



4.2. ábra: A Voigt-Kelvin viszkoelasztikus modell

A doktori kutatás során a csúszási súrlódás a Coulomb-féle modellel [62], míg az adhézió a Voigt-Kelvin viszkoelasztikus modellel [66], [67] kerül figyelembevételre.

Egy, az y szerelési irányban értelmezett súrlódási erő F_{fy} tehát megadható

$$F_{fy} = \begin{cases} -F_{cy}^{+} sgn(\dot{y}) & \text{csúszás esete, ha } \dot{y} > 0 \\ -F_{cy}^{-} sgn(\dot{y}) & \text{csúszás esete, ha } \dot{y} < 0 \\ -k_y(y - y_{t0}) - d_y \dot{y} & \text{tapadás esete} \end{cases}, \tag{4.3}$$

ahol F_{cy}^{+}, F_{cy}^{-} a szerelési irány függvényében a Coulomb-féle súrlódási erő vertikális komponense. A k_y a merevségi- és d_y a csillapítási együttható, mindkettő y irányban van definiálva, az y_{t0} jelenti a nulla tangenciális kontakt erő helyét.

A k_y meghatározásának menetét, illetve (4.3) alkalmazását egy konkrét szerelési feladaton keresztül a 6.1. alfejezet ismerteti. A tapadás esete megadható a szerelési erő függvényében lásd a 6.1. alfejezet által bemutatott modellezést:

$$F_a^{-}(y) < N_y^0 + k_y(y - y_{t0}) < F_a^{+}(y), \tag{4.4}$$

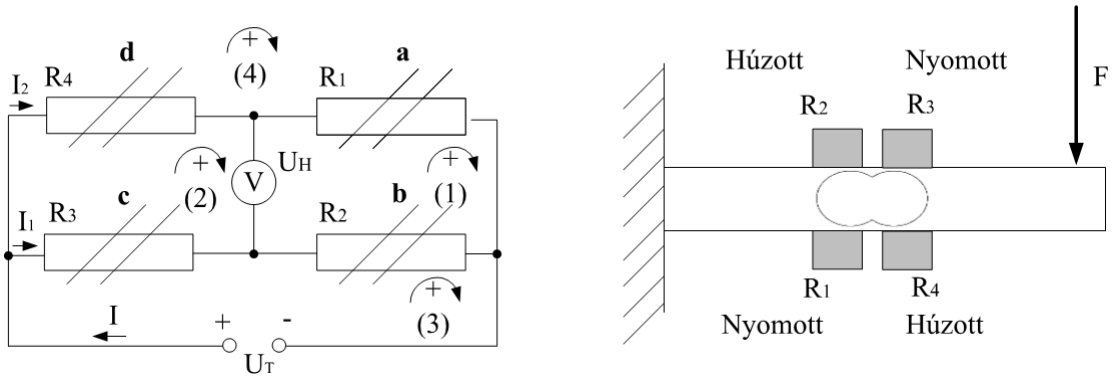
ahol F_a^{+} a behelyezéshez szükséges erő, F_a^{-} pedig a kivételhez tartozó erő. A normális irányú erő függőleges komponense N_y^0, amikor csak normális irányú kontakt erő lép fel.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

5. NYÚLÁSMÉRŐ BÉLYEGEKRE ALAPOZOTT ERŐMÉRÉS

A kutatómunka során alkalmazott hasáb típusú erőmérő cella összesen 4 darab nyúlásmérő bélyeget tartalmaz. Természetesen a mérőcella kialakítása lehet más is, erre mutat megoldásokat [68]. A mérőcella Wheatstone hidas kapcsolásának elméleti hátterét [69], [70] irodalmak foglalják össze részletesen.

Az 5.1. ábrán a mérőcella Wheatstone hidas kapcsolása és a bélyegek elhelyezése látható. Az erőmérő hasáb egyik végét rögzíteni kell, hogy a másik végén regisztrálni tudjuk a deformációból adódó ellenállás változás nagyságát, amely arányos lesz a fellépő erővel. A hasáb közepén található egy kikönnyítés, hogy nagyobb lokális hajlítások jöhessenek létre. A nyúlásmérő bélyegek segítségével a mechanikai nyúlás átalakítható villamos mennyiséggé.



5.1. ábra: A teljes hidas mérőcella kapcsolása és a bélyegek elhelyezkedése

Az 5.1. ábra az adott F terhelésre megadja a húzott és nyomott bélyegeket. A húzott bélyeg ellenállása terhelőerő hatására megnő egy ΔR értékkel. A nyomott bélyegnél pedig csökkenni fog az ellenállás értéke, hiszen az alakváltozás miatt az ellenállás keresztmetszete és hossza is változni fog [69], [70]:

$$R_x = \rho \frac{l}{A_R}, \tag{5.1}$$

ahol ρ a fajlagos ellenállást, míg l a vezető hosszúságát jelenti és A_R a vezető keresztmetszetét reprezentálja.

Az ε fajlagos nyúlás és a relatív ellenállás változás között az alábbi lineáris összefüggés adható [69], [70]:

DOI: 10.14750/ME.2020.011

$$k_b \varepsilon = \left(\frac{\Delta R}{R_x}\right), \tag{5.2}$$

ahol R_x a vezető ellenállása, és k_b a bélyegtényező. A bélyegtényező értéke függ a bélyeg anyagától, ez az érték általában ~2 szokott lenni [69].

A II. Kirchhoff-féle törvény értelmében megadható az 5.1. ábra számozása szerinti hurokegyenletek:

$$U_H + I_2 R_1 - I_1 R_2 = 0, \tag{5.3}$$

$$-U_H + I_2 R_4 - I_1 R_3 = 0, \tag{5.4}$$

$$-U_T + I_1 R_3 + I_1 R_2 = 0, \tag{5.5}$$

$$-U_T + I_2 R_1 + I_2 R_4 = 0, \tag{5.6}$$

a két utolsó egyenletet-, vagy az Ohm-törvényt alapul véve az I_1 és az I_2 áramok számíthatók:

$$I_1 = U_T \frac{1}{R_2 + R_3}, \qquad I_2 = U_T \frac{1}{R_1 + R_4}. \tag{5.7}$$

Az U_H hídfeszültség szintén meghatározható

$$U_H = U_T \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)}. \tag{5.8}$$

Terhelés függvényében a hídfeszültség változni fog. A változás mV nagyságrendű, ezért a mért jelet majd erősíteni kell. A teljes híd érzékenysége kétszer nagyobb, mint a fél hidas elrendezésé. A hídfeszültségre az alábbi közelítő feszültség [69] adható:

$$U_H \cong \frac{n_b}{4} k_b U_T \varepsilon, \tag{5.9}$$

ahol $n_b = 4$ a teljes hídnál az aktív nyúlásmérő bélyegek száma.

Az alkalmazott erőmérő cella főbb adatait az 1. táblázat foglalja össze. A [71] adatlap egy hasáb típusú erőmérő cella leírását ismerteti, amely megemlíti, hogy az egység a nyíróerő mérésére alkalmas. Ezzel szemben más irodalmak pl. [72] ezt a fajta mérőcellát hajlításra alkalmas (bending beam load cells) erőmérőként tüntetik fel. Emiatt, különböző terhelési esetek vizsgálatával célszerű meghatározni, hogy a cella milyen irányú erőt mér dominánsan. A tiszta hajlítás-, húzás és a nyírás eseteit az 5.2. ábra mutatja.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

Megnevezés	Érték
Típus:	YZC-133
Mérési határ:	$\sim 200\ N$
Méret:	$80\ x\ 12{,}7\ x\ 12{,}7\ mm\ (H\ x\ Szé\ x\ M)$
Működési hőmérséklet:	$-20 \sim 65°C$
Anyag:	Alumínium

1. táblázat: A mérőcella adatai

Húzáskor a hídfeszültség a következőképpen fog alakulni:

$$U_H{}^{húzás} = 0, \tag{5.10}$$

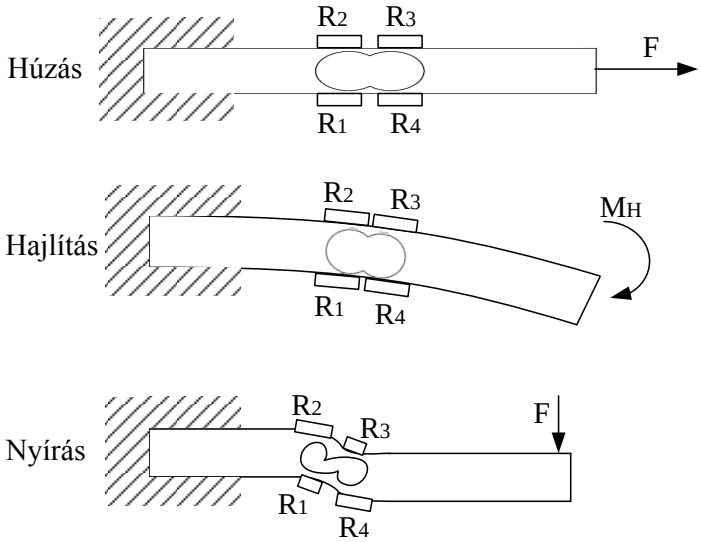
mivel az $R_1 - R_4$ ellenállások értékei azonosak. Tiszta hajlításkor az R_2R_4 és az R_1R_3 szorzatok egyenlősége érvényes, így:

$$U_H{}^{hajlítás} = 0. \tag{5.11}$$

Nyíró terhelésnél a lokális hajlítások igénybevétele miatt a hídfeszültség zérustól eltérő értéket mutat. Előjelét a terhelés iránya határozza meg:

$$U_H{}^{nyírás} = U_T \left[\frac{(R_2 + \Delta R_{12})(R_4 + \Delta R_{34}) - (R_1 - \Delta R_{12})(R_3 - \Delta R_{34})}{(R_2 + \Delta R_{12} + R_3 - \Delta R_{34})(R_1 - \Delta R_{12} + R_4 + \Delta R_{34})} \right] \neq 0. \tag{5.12}$$

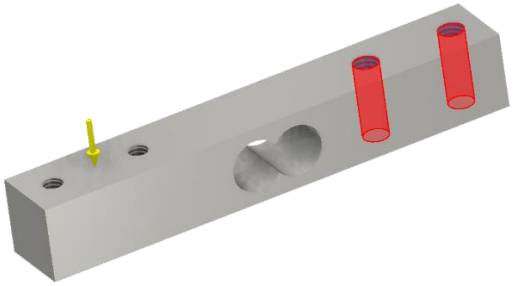
Az elméleti úton levezetett (5.8) összefüggés jól mutatja, hogy a mérőcella húzás, illetve hajlítás esetén is zérus hídfeszültséget szolgáltat.



5.2. ábra: A terhelések egyes esetei

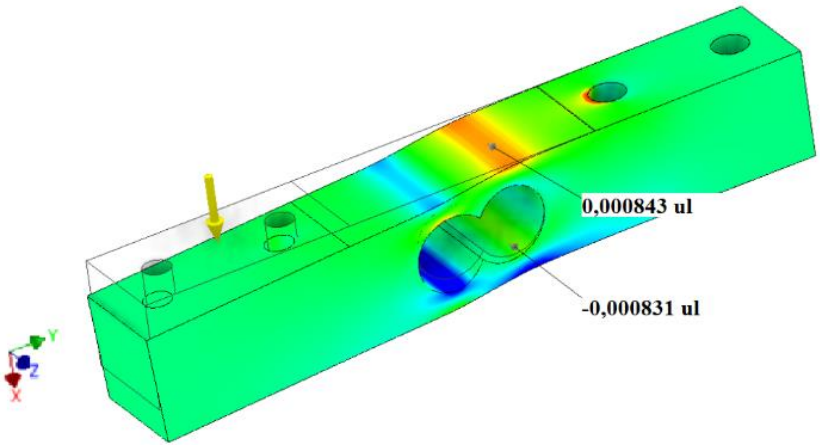
DOI: 10.14750/ME.2020.011

A beszerzett erőmérő cella végeselemes szimulációjával megállapítható, hogy az egymással szemben lévő nyúlásmérő bélyegek nyíró terheléskor ugyanolyan ellenállás változást szenvednek el, viszont előjelükben ellentétesek. Ez az eredmény arra mutat rá, hogy az erőmérő csak nyíróirányú erőmérésre lesz alkalmas. A megfogás peremfeltételét Inventor 2016 szoftverben az 5.3. ábra szemlélteti.



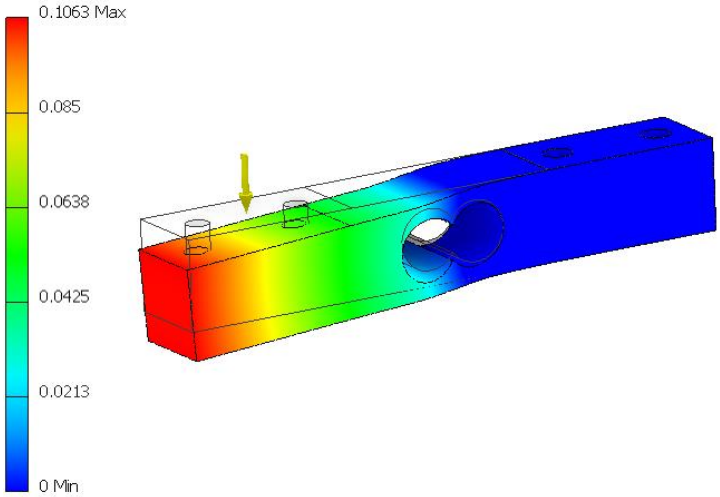
5.3. ábra: Az erőmérő cella megfogási peremfeltétele

A cella lefogására az egyik végén kialakított 2 db M5 rögzítő furat szolgál, ezeket két darab piros színű henger jelöli. A mérőoldali furatok között elhelyezett sárga színű nyíl a mérőcellára tett megoszló terhelés eredőjét mutatja. A hálózás során 560494 db csomópont és 379030 db elem lett felhasználva. A névleges terhelés értéke $200\ N$. A mérőcella ε_y megnyúlását az 5.4. ábra érzékelteti, ahol abszolútértékben nézve négy darab lokális csúcsérték figyelhető meg a két átmenő furattal adott kikönnyítésnél, ahol a lokális hajlítás jelentős. Az erőmérő cella szimuláció során kapott, felnagyított alakváltozását az 5.5. ábra mutatja. Az elmozdulás maximális értéke $0{,}1063\ mm$ volt.



5.4. ábra: Az erőmérő ε_y megnyúlása 200 N terhelésnél

DOI: 10.14750/ME.2020.011



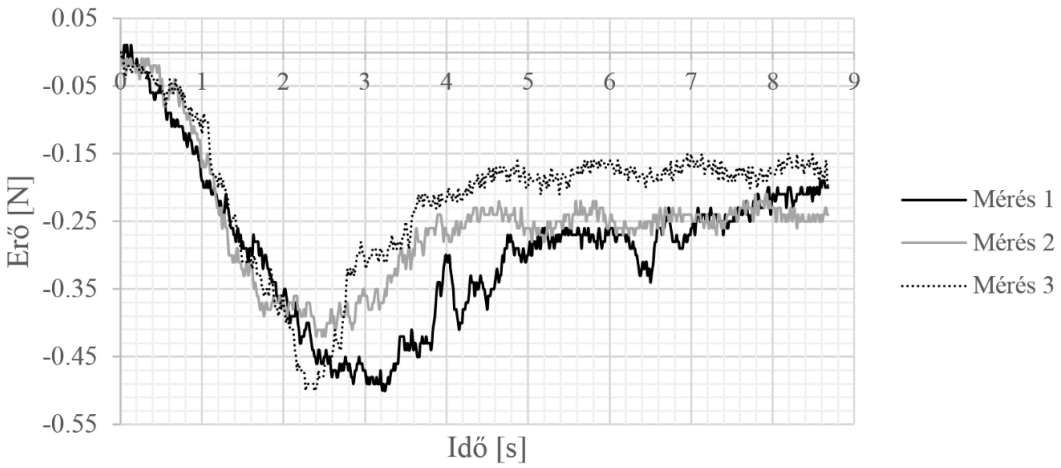
5.5. ábra: A névleges terhelés során kapott elmozdulás mm-ben

Gyakorlati mérések elvégzésével ellenőrizhető az erőmérő cella viselkedése a különböző terheléseknél. Az első mérési összeállításban a húzás került kiértékelésre. Egy alumínium lap segítségével a mérőhasáb felerősíthető volt, majd egy műszerész satuba lett fogva.

Az erőmérő cella mérőoldalán található két darab átmenő menetes furat, ezeket felhasználva 19,62 N terhelés alkalmazásával, valamint személyi számítógép segítségével megkapható az erő-idő diagram. A terhelőerőt két darab, egyenként 9,81 N súlyerejű tárcsa szolgáltatta. Ebben a mérési összeállításban 3 mérés elvégzése történt meg. A mérés megvalósításának módját az 5.6. ábra szemlélteti, ahol a nyíl mutatja a 19,62 N terhelés irányát. A húzáskor a mérések erő-idő diagramjait az 5.7. ábra mutatja.

5.6. ábra: A tiszta húzás

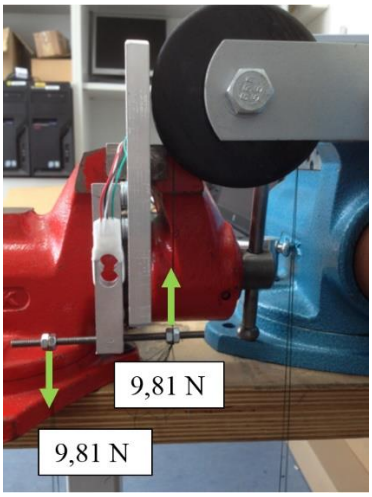
DOI: 10.14750/ME.2020.011



5.7. ábra: A húzás eredményei

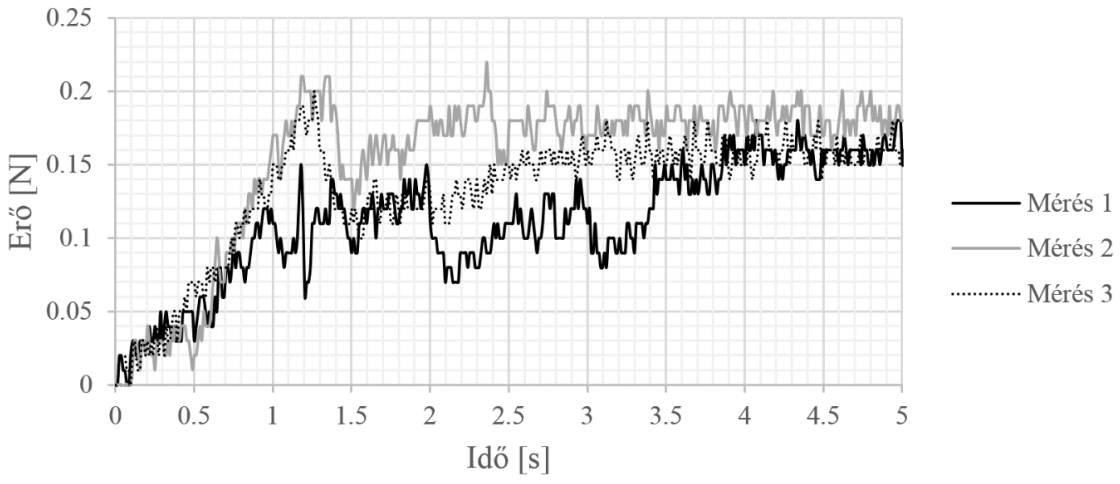
A tranziensek lefutása után a három mérés átlagával számolva $-0{,}21\ N$ erőt mért a rendszer. Tehát az elméleti úton meghatározott zérus hídfeszültséghez képest eltérés tapasztalható. A mért erő érték 1,07 %-os hibát eredményez a terhelés nagyságára vetítve. Megjegyezzük, hogy a tranziensek a tárcsák elengedésekor fellépő dinamikai hatásból származtak.

A tiszta hajlításnál a mérések ugyancsak az előbb említett két tárcsával történtek, a mérési összeállítás az 5.8. ábrán látható, ahol a nyilak a terhelő erőpárt szemléltetik. A kapott eredményeket az 5.9. ábra mutatja. Ebben az összeállításban is 3 mérés történt meg. A tranziensek után a három mérés átlaga $0{,}17\ N$, tehát ebben az esetben is az elméletben meghatározott zérus értékhez képest tapasztalható eltérés.



5.8. ábra: A tiszta hajlítás esete

DOI: 10.14750/ME.2020.011



5.9. ábra: A tiszta hajlításra kapott eredmények

A mérőcella a vizsgálatok alapján megállapítható, hogy dominánsan nyíróerőt mér. A húzásból- és a hajlításból adódó hiba kb. 1 % a terhelés nagyságára nézve. A hiba a nyúlásmérő bélyegek pontatlan elhelyezkedéséből vagy a megfogás és a terhelés peremfeltételének aszimmetriájából is adódhat. Ezen lehetséges zavaró erőértékek kiküszöbölése érdekében a terhelés átadásához megvezetést szükséges alkalmazni.

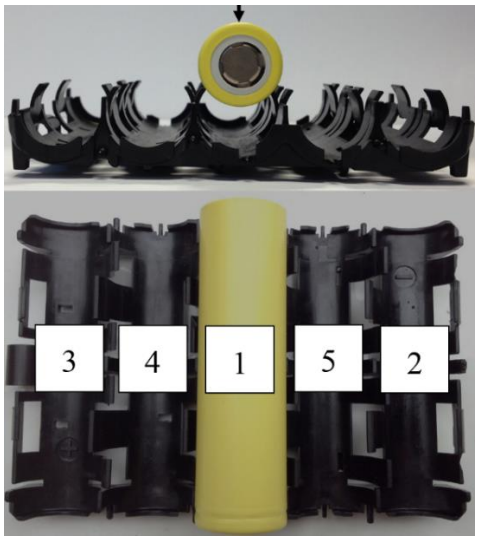
DOI: 10.14750/ME.2020.011

6. EGY TIPIKUS SZERELÉSI FOLYAMAT VIZSGÁLATA MODELLEZÉSSEL ÉS KÍSÉRLETTEL

A 6.1. ábrán látható az 5 db. lítium ionos akkumulátor, a rugalmas műanyag cellatartó és az összeszerelt állapot. A fejezet 1 db. akkumulátor behelyezésének, és kiszerelésének modellezésével és megvalósításával foglalkozik.

6.1. ábra: Lítium ionos akkumulátorpakk szerelése

Az akkumulátoroknak, a cellatartóba történő behelyezési sorrendjét a 6.2. ábra szemlélteti.

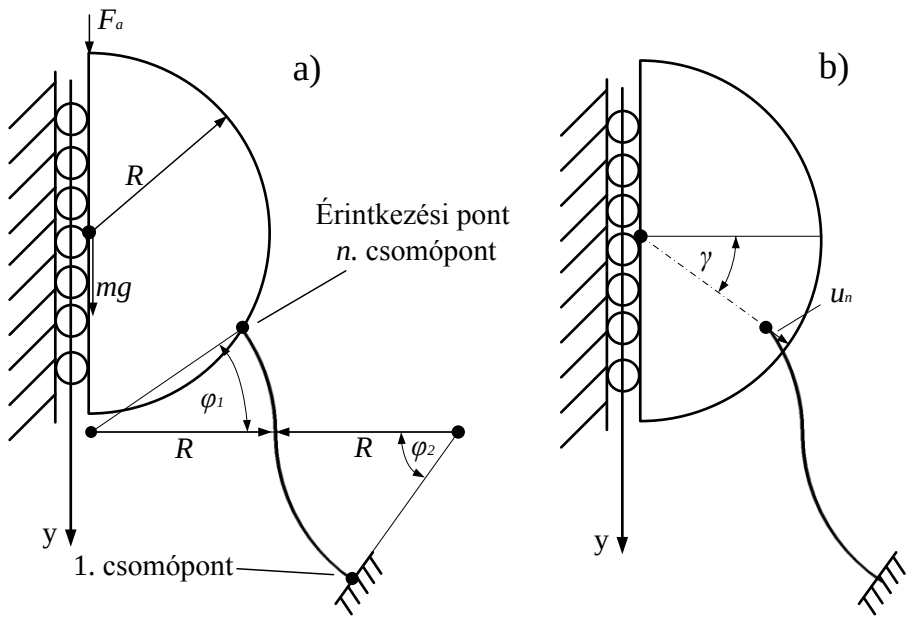


6.2. ábra: Az akkumulátorok behelyezésének sorrendje

6.1. A cella és a cellatartó modellje

A behelyezés 2D-s modelljét mutatja a 6.3a. ábra. Az adódó szimmetria miatt elég a szerkezet felét vizsgálni.

DOI: 10.14750/ME.2020.011



6.3. ábra: a) A cella- és a cellatartó 2D-s modellje, b) a kinematikai érintkezési feladat

Ahhoz, hogy a cellatartó elmozdulását matematikailag le lehessen írni, szükséges a 3. fejezetben bemutatott nagy elmozdulás és kis deformációk elméletét alkalmazni [25]–[27], [73]. Az $R = 9\,mm$ sugarú akkumulátort a félkör reprezentálja, amely egy merev testnek tekinthető. A görbe cellatartó karcsú és rugalmas ívekből épül fel, a φ_1 és φ_2 ívek sugara egyaránt 9 mm.

Feltételezve, hogy az akkumulátor és a cellatartó egyetlen pontban érintkezik a beszerelés során, így a 3.1. alfejezetben leírtak érvényesek. A kinematikai kontakt feltétel kielégítéséhez normál irányú elmozdulást u_n kell alkalmazni a cellatartó végén (lásd: 6.3b. ábra). Az y irány jelzi az akkumulátor behelyezésének irányát, valamint a szereléshez szükséges erőt az F_a reprezentálja. Az m jelenti az akkumulátor felének tömegét, amely $m = 0{,}0229\ kg$. A cellatartót összesen $n_e = 20$ egyenes rúdelem alkotja, a csomópontok száma $n = 21$.

A cellatartó rögzített végénél lévő elmozdulás peremfeltételeit és az előírt u_n elmozdulást az n-dik csomópontnál figyelembe kell venni, ahogy azt a [26], [57] irodalmak tartalmazzák. Az érintkezési feltétel teljesítéséhez az érintkező csomópontot kinematikai terhelésnek az akkumulátor palástfelületére kell vinnie. Ezt a terhet az $\mathbf{f_u}$ oszlopvektor reprezentálja, a számított u_n normális irányú elmozdulás alapján (lásd: 6.3b. ábra). Az elmozdulás megadására alkalmas összefüggés

DOI: 10.14750/ME.2020.011

$$u_n = R - \sqrt{(x_0 - x_n)^2 + (y_0 - y_n)^2}, \tag{6.1}$$

ahol R az akkumulátor sugara, x_0, y_0 a középpontja és az x_n, y_n a pillanatnyi csomóponti koordinátája az érintkezésben részt vevő csomópontnak.

Egy célirányos program megírására volt szükség a folyamat szimulációjának elvégzéséhez. Az akkumulátoron alkalmazandó függőleges le- és felfelé irányban történő elmozdulás $10{,}05\ mm$, ± 30 egyenközű lépés felosztásával történik.

A szimuláció során felhasznált adatokat a 2. táblázat foglalja össze. Az akkumulátortartó Polikarbonát/Akrilnitril-Butadién-Sztirol (PC/ABS) anyagból készült.

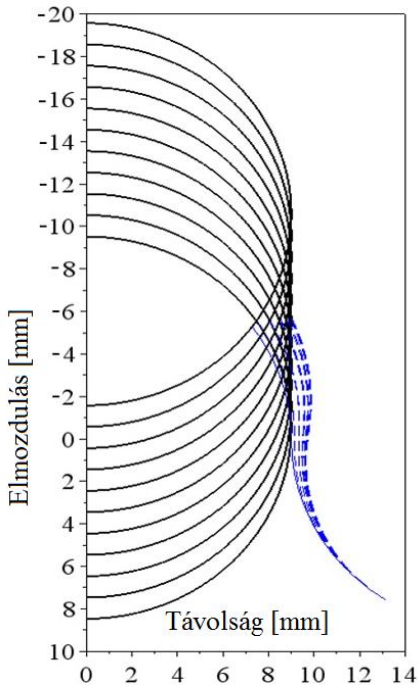
Név	**Érték**	**Mértékegység**
Elemszám n_e	20	$[db.]$
Rugalmassági modulus E	2,415	$[GPa]$
Keresztmetszet A	18,25	$[mm^2]$
Másodrendű tehetetlenségi nyomaték I	1,52	$[mm^4]$
Súrlódási együttható μ	0,15	$[-]$
Akkumulátor sugara R	9	$[mm]$
Akkumulátor felének tömege m	0,0229	$[kg]$

2. táblázat: Szimulációhoz szükséges adatok

A cellatartó deformálódott alakjait mutatják a 6.4. ábrán látható szaggatott vonalak. Minden harmadik lépés került ábrázolásra, a jobb áttekinthetőség érdekében. A behelyezés, illetve a kivétel során fellépő erőkre kapott értékeket a 6.5. ábra mutatja. Megfigyelhető, hogy a kapott erő-elmozdulás diagram egy hiszterézis görbét alkot. Hasonló hiszterézis görbét kaptak Bader és szerzőtársai [13] viszkoelasztikus műanyag alkatrész behelyezési és kivételi folyamatára.

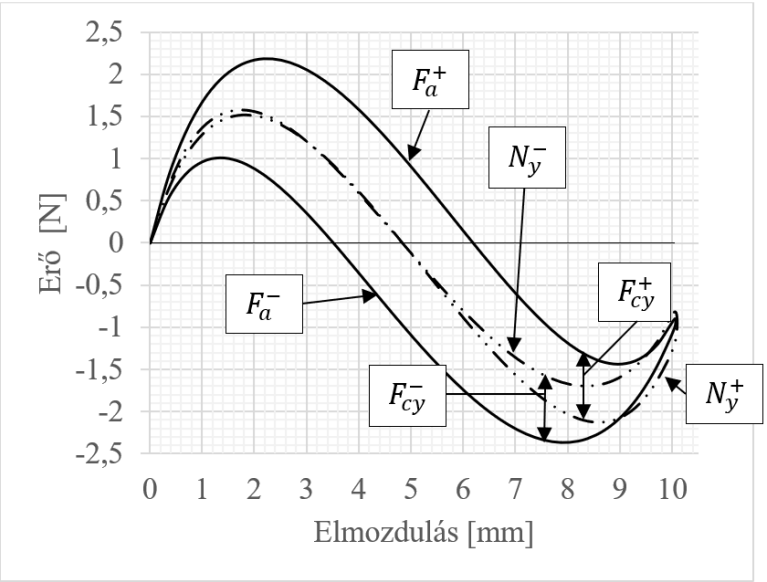
Az F_{cy}^{+} és az F_{cy}^{-} erők a Coulomb-féle súrlódási erő vertikális komponensei-, az N_y^{+} és az N_y^{-} a normális irányú erők vertikális komponensei az akkumulátor behelyezésekor és kivételekor. A behelyezés elvégzéséhez szükséges szerelési erőt F_a^{+}, míg a kivételhez szükséges erőt F_a^{-} folytonos fekete vonalak reprezentálják (lásd: 6.5. ábra).

DOI: 10.14750/ME.2020.011



6.4. ábra: A szimulációs folyamat

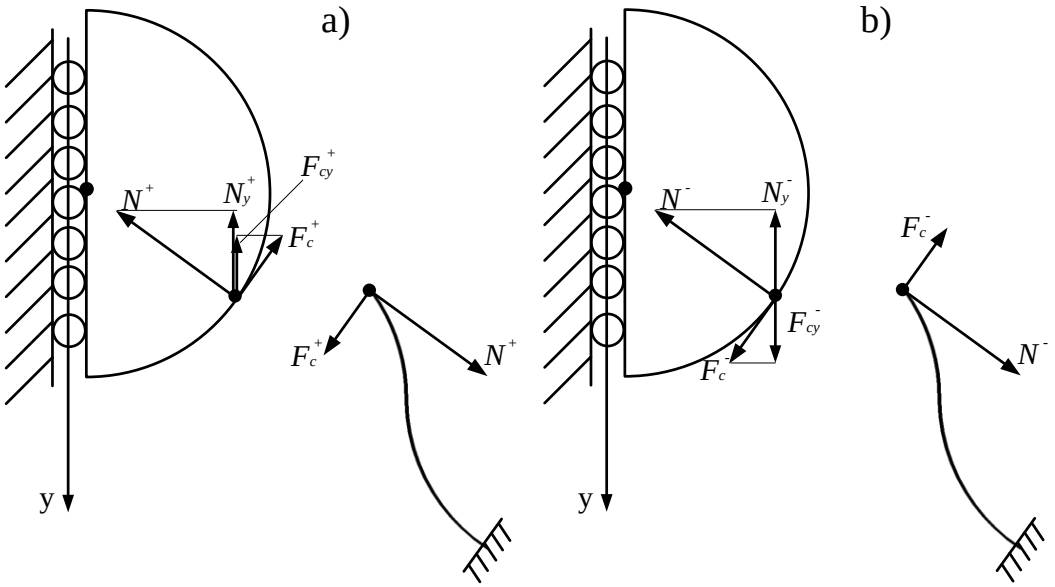
A kétpont vonalak a fellépő normális irányú erők vertikális komponenseit érzékeltetik.



6.5. ábra: Az akkumulátor behelyezésének és kivételének szimulációja

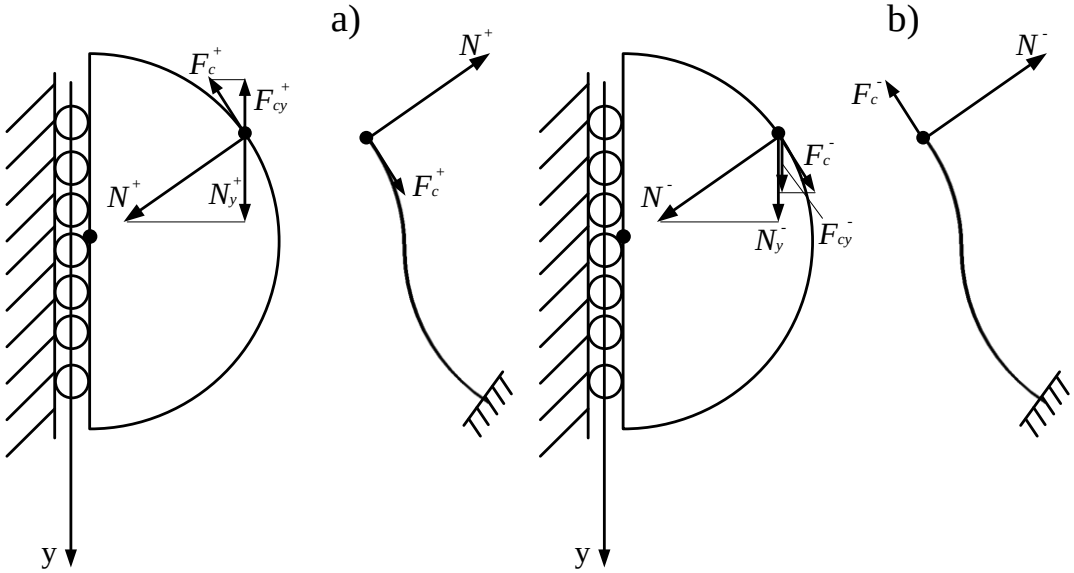
A jobb érthetőség érdekében a 6.6ab. ábra és a 6.7ab. ábra tartalmazzák az akkumulátor és az akkumulátortartó szabadtest ábráit. Az ábrák segítik vizuálisan az N_y^+, N_y^-, F_{cy}^+ és az F_{cy}^- erőkomponensek értelmezését. Megjegyzendő, hogy az F_{cy}^+ és az F_{cy}^- pozitív értékű függvények, míg az N_y^+, N_y^- függvények a 6.5. ábrával összhangban előjelesek. Az erők tényleges irányát a 6.6ab. ábra és a 6.7ab. ábra szolgáltatja.

DOI: 10.14750/ME.2020.011



6.6. ábra: Szabadtest ábra alig behelyezett pozíció a) pozitív-, b) negatív sebesség

A 6.6ab. ábra egy olyan esetet mutat, amikor az akkumulátor alig behelyezett pozícióban van. A 6.6a. ábra esete a pozitív sebességgel történő szerelést, míg a 6.6b. ábra esete a negatív sebességgel történő kivételt szemlélteti.



6.7. ábra: Szabadtest ábra majdnem behelyezett helyzet a) pozitív-, b) negatív sebesség

A 6.7ab. ábra egy már majdnem behelyezett állapotot reprezentál. A 6.7a. ábra pozíciójában pozitív a szerelési sebesség, a 6.7b. ábra negatív sebességet mutat.

A szereléshez szükséges erők a következőképpen számíthatók behelyezéskor és kivételkor:

$$F_a^+ = N_y^+ + F_{cy}^+, \tag{6.2}$$

DOI: 10.14750/ME.2020.011

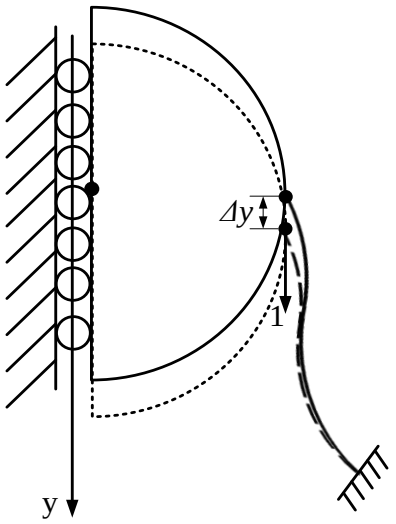
$$F_a^- = N_y^- - F_{cy}^-. \tag{6.3}$$

A meghatározott N_y^+, N_y^-, F_{cy}^+, F_{cy}^-, F_a^+ és F_a^- erők csúszás esetén közvetlenül felhasználhatók az akkumulátor behelyezési és a kivételi folyamatainak dinamikai numerikus vizsgálatára.

A szereléshez szükséges erők F_a^+ és F_a^- az y függvényében változnak. Ez a megállapítás lehetőséget ad a tapadás jelenségének előfordulására, amikor az akkumulátor mozgása megáll és a sebesség iránya előjelet vált, mialatt a szereléshez szükséges erő fokozatosan változik F_a^+ – F_a^- értékek között. Megfigyelhető, hogy amikor csak normális irányú érintkezési erő lép fel, akkor annak vertikális komponense az alábbiak szerint számítható:

$$N_y^{(0)} = \frac{F_a^+ + F_a^-}{2}, \tag{6.4}$$

ahol $N_y^{(0)}$szintén egy olyan függvény, amely diszkrét pontokban adható meg.



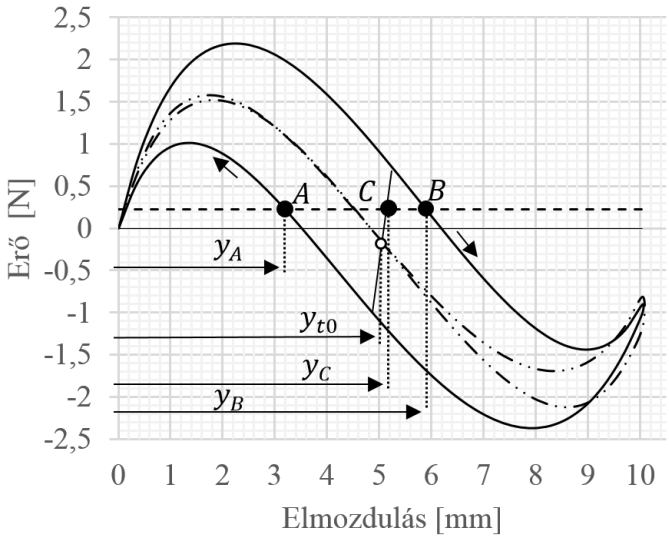
6.8. ábra: A merevségi együttható meghatározása

Ha tapadás lép fel, akkor a normális kontakt erő mellett tangenciális erő is ébred. Tapadásnál, hogy a görbe rúd merevsége vertikális irányban meghatározható legyen további számítás szükséges. Ehhez az n-dik csomópont függőleges pozícióját kell meghatározni. Tapadást feltételezve, majd egységnyi függőleges irányú erőt téve a szerkezetre megkapható a Δy elmozdulás növekmény (lásd: 6.8. ábra), amely szolgáltatja y irányban a merevségi együtthatót, ha az akkumulátor a C pont környezetében található (lásd: 6.9. ábra):

$$k_y = \frac{1}{\Delta y} = \frac{1}{1{,}5643 \cdot 10^{-6}} = 6{,}393 \cdot 10^5 \frac{N}{m}. \tag{6.5}$$

DOI: 10.14750/ME.2020.011

A 6.9. ábrán az akkumulátor felének a súlyát vízszintes szaggatott vonal jelöli.



6.9. ábra: Az egyensúlyi pontok definiálása

6.2. Egyensúlyi pontok stabilitásvizsgálata

Az alábbiakban történik az A, B és C egyensúlyi pont analitikus és numerikus stabilitásvizsgálata. A fő cél megtalálni a kapott hiszterézis jellegű görbén azt az egyensúlyi pontot, ahol a behelyezési folyamat már autonóm módon végbemegy. A keresett pont egy robottal történő heptikus összeszerelés jellemző pontját szolgáltathatja.

6.2.1. Egyensúlyi pontok stabilitásának analitikus vizsgálata

A stabilitásvizsgálat három egyensúlyi pontban történik $y \in [y_A; y_B]$. Az A, B és C pontokat a 6.9. ábra mutatja. A pontok y irányú helyzete rendre: $y_A = 3{,}15\ mm$, $y_B = 5{,}95\ mm$ és $y_C = 5{,}2\ mm$. Az A és B egyensúlyi pontok esetében megfigyelhető a csúszás, míg a C pontnál a tapadás jelensége. A tapadást a C pont közelében az erő-elmozdulás diagramon egy meredek egyenes vonal reprezentálja. A szaggatott vonal jelöli a cella fél súlyát.

Az egyensúlyi egyenlet az A pontban:

$$0 = mg - N_y^-(y_A) + F_{cy}^-(y_A). \tag{6.6}$$

A (6.6) egyenletben az előjelek a 6.6b. ábra segítségével értelmezhetők, a súlyerő és a súrlódó erő függőleges vetülete lefelé mutató y koordináta irányú, ezért pozitív, míg az $N_y^-(y_A)$ normális irányú támasztóerő függőleges vetületének függvény értéke a 6.9. ábra szerint pozitív ebben a pontban, így az erő negatív előjelét a szabadtest ábra szolgáltatja.

Az 1. tétel értelmében csak a konzervatív erők által szolgáltatott potenciális energiát kell

DOI: 10.14750/ME.2020.011

felírni, amelyben az előjelek értelemszerűen a lefelé mutató y irány miatt negatív előjelet kapnak a (6.6)-hoz képest:

$$\Pi(y) = -mgy + \int_0^y N_y^-(s)\,ds. \tag{6.7}$$

Az első variációhoz szükséges a (6.7) y szerinti első deriváltja:

$$\left.\frac{\partial \Pi}{\partial y}\right|_{y_A} = -mg + N_y^-(y_A) \neq 0. \tag{6.8}$$

Összehasonlítva (6.6) és (6.8) kifejezéseket, elmondható, hogy a potenciális energiának nincsen minimuma az A pontban. Hivatkozva az 1. tételre az A pont instabil lesz, ez azt jelenti, hogy ebből a pontból az akkumulátor kipattan.

A B pontnál az egyensúlyi egyenlet:

$$0 = mg - N_y^+(y_B) - F_{cy}^+(y_B). \tag{6.9}$$

A (6.9) egyenletben az előjeleket most a 6.7a. ábra segítségével határozzuk meg. A súlyerő ismét lefelé mutató y koordináta irányú, viszont itt a normális irányú erő függőleges vetülete pozitív, de a 6.9. ábra alapján az $N_y^+(y_B)$ függvény negatív értékkel rendelkezik, ezért a helyes irányt az egyenletben negatív előjellel kapjuk meg. Az F_{cy}^+ súrlódó erő függőleges vetülete a szabadtest ábra értelmében fölfelé-, azaz negatív y irányba mutat, ezért kapja a mínusz előjelet.

A potenciális energia kifejezésben ismét a lefelé mutató y irány miatt negatív előjelet kapnak a konzervatív erők a (6.9)-hez képest:

$$\Pi(y) = -mgy + \int_0^y N_y^+(s)\,ds. \tag{6.10}$$

Az y szerinti első derivált:

$$\left.\frac{\partial \Pi}{\partial y}\right|_{y_B} = -mg + N_y^+(y_B) \neq 0. \tag{6.11}$$

Az előző esethez hasonlóan látható, hogy a B pontban felírt egyensúlyi egyenlet és a (6.11) egyenlet különböző, így ez a pont is instabil lesz. A szerelés oldaláról, ez azt jelenti, hogy az ebben a pontban elengedett akkumulátor automatikusan bepattan a helyére.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

A C pont egyensúlyi egyenletét a tapadásra jellemző (4.4) összefüggés alapján fogalmazhatjuk meg:

$$0 = mg - N_y^{(0)}(y_C) - k_y(y_C - y_{t0}). \tag{6.12}$$

A (6.12)-ben szereplő és a 6.7a. ábrán vázolt N_y^+ támasztóerő függőleges komponense a tapadásnál $N_y^{(0)}(y_C)$ negatív függvényértéket vesz fel (lásd: 6.9. ábra). Ezért az egyensúlyi egyenletben negatív előjelet kap, hasonlóan az F_{cy}^+ erőnek megfelelő, a tapadásból származó érintő erő függőleges vetülete is, amelyet a szerkezet merevségével veszünk figyelembe.

A tapadásnál az y_{t0} helyen a tangenciális erő függőleges komponense éppen zérus

$$y_{t0} = y_C - \frac{mg - N_y^{(0)}(y_C)}{k_y}, \tag{6.13}$$

a meghatározott értéke $y_{t0} = 5{,}1992\ mm$. A konzervatív erők $\Pi(y)$ potenciális energiája a C pont környezetében az alábbi alakban írható fel

$$\Pi(y) = -mgy + \int_0^y N_y^{(0)}(s)\,ds + \frac{1}{2}k_y(y - y_{t0})^2. \tag{6.14}$$

Amennyiben a teljes potenciális energiának minimuma van, akkor az 1. tétel értelmében az egyensúlyi pont stabil lesz. A potenciális energia első deriváltja

$$\left.\frac{\partial \Pi}{\partial y}\right|_{y_c} = -mg + N_y^{(0)}(y_C) + k_y(y_C - y_{t0}) = 0, \tag{6.15}$$

látható, hogy a kapott összefüggés megegyezik (6.12)-vel, így a potenciális energiának lehet minimuma. A második derivált segítségével dönthető el, hogy stabil-e az adott pont

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial y^2} = \frac{\partial N_y^{(0)}(y)}{\partial y} + k_y > 0. \tag{6.16}$$

Mivel $\frac{\partial N_y^{(0)}(y)}{\partial y}$ értéke $-696\frac{N}{m}$ és a k_y pedig $6{,}393 \cdot 10^5\frac{N}{m}$, elmondható, hogy a potenciális energiának a C pontban minimuma van. Az 1. tételt felhasználva belátható, hogy a C pont aszimptotikusan stabil lesz. Az 1. tételhez igazodva ebben az esetben oszlopvektorok helyett skalármennyiségek lesznek: $\dot{q} = \dot{y}$ és $Q = -d_y\dot{y}$, továbbá, $-a(\|\dot{y}\|) = -\frac{1}{2}d_y\dot{y}^2$.

Ebben az esetben a cella betapad az egyensúlyi pontban, így a beszerelési folyamat idő előtt

DOI: 10.14750/ME.2020.011

félbeszakad, a bepattanás nem történik meg.

6.2.2. Numerikus vizsgálata az egyensúlyi pontoknak

Az előző alfejezetben a stabilitásvizsgálat során kapott eredmények verifikálását numerikusan végezzük el. A sebességek és a gyorsulások a Newmark [57] és a Trapéz módszer alapján közelíthetők:

$$^{t+\Delta t}y = {}^{t}y + \frac{\Delta t}{2}\left({}^{t}\dot{y} + {}^{t+\Delta t}\dot{y}\right), \tag{6.17}$$

$$^{t+\Delta t}\dot{y} = {}^{t}\dot{y} + \frac{\Delta t}{2}\left({}^{t}\ddot{y} + {}^{t+\Delta t}\ddot{y}\right). \tag{6.18}$$

A kifejezések a Newton-Raphson iteráció $k = 1, 2, 3, \ldots$, alkalmazásával felhasználásra kerülnek. Az új elmozdulás érték számítható:

$$^{t+\Delta t}y^{(k)} = {}^{t+\Delta t}y^{(k-1)} + \Delta y^{(k)}. \tag{6.19}$$

A sebesség is meghatározható

$$^{t+\Delta t}\dot{y}^{(k)} = \frac{2}{\Delta t}\left({}^{t+\Delta t}y^{(k-1)} + \Delta y^{(k)} - {}^{t}y\right) - {}^{t}\dot{y}. \tag{6.20}$$

A gyorsulás a következőképpen állítható elő

$$^{t+\Delta t}\ddot{y}^{(k)} = \frac{4}{\Delta t^2}\left({}^{t+\Delta t}y^{(k-1)} + \Delta y^{(k)} - {}^{t}y\right) - \frac{4}{\Delta t}\,{}^{t}\dot{y} - {}^{t}\ddot{y}. \tag{6.21}$$

A három darab egyensúlyi pontra felírható a három kezdetiérték feladat. Az A pontra a következő összefüggés adható:

$$m\,{}^{t+\Delta t}\ddot{y}^{(k)} + (k_e + k_s)\Delta y^{(k)} = mg - {}^{t+\Delta t}N_y^{-(k-1)} + {}^{t+\Delta t}F_{cy}^{-(k-1)}, \tag{6.22}$$

a következő kezdetiértékkel: $^{t+\Delta t}y^{(0)} = {}^{t}y$, ahol $k_e = \left.\frac{\partial N_y^-}{\partial y}\right|_{t+\Delta t_{y^{(k-1)}}}$ és $k_s = \left.\frac{\partial F_{cy}^-}{\partial y}\right|_{t+\Delta t_{y^{(k-1)}}}$. A Newton-Raphson iteráció első lépésében, a még ismeretlen mennyiséget az előző időlépés konvergált elmozdulás értékével helyettesítjük.

Hasonlóan az A pont esetében, a B pontnál a következő összefüggés lesz érvényes:

$$m\,{}^{t+\Delta t}\ddot{y}^{(k)} + (k_e - k_s)\Delta y^{(k)} = mg - {}^{t+\Delta t}N_y^{+(k-1)} - {}^{t+\Delta t}F_{cy}^{+(k-1)}, \tag{6.23}$$

DOI: 10.14750/ME.2020.011

ahol a kezdetiérték: ${}^{t+\Delta t}y^{(0)} = {}^{t}y$, valamint $k_e = \left.\frac{\partial N_y^+}{\partial y}\right|_{t+\Delta t_{y^{(k-1)}}}$ és $k_s = \left.\frac{\partial F_{cy}^+}{\partial y}\right|_{t+\Delta t_{y^{(k-1)}}}$.

A C pontra is felírható a kezdetiérték feladat

$$\begin{aligned} m\,{}^{t+\Delta t}\ddot{y}^{(k)} + \left(k_e + k_y\right)\Delta y^{(k)} = \\ = mg - {}^{t+\Delta t}N_y^{0(k-1)} - k_y\left({}^{t+\Delta t}y^{(k-1)} - y_0\right) - d_y\,{}^{t+\Delta t}\dot{y}^{(k)}, \end{aligned} \tag{6.24}$$

ahol a kezdetiérték: ${}^{t+\Delta t}y^{(0)} = {}^{t}y$, valamint $k_e = \left.\frac{\partial N_y^0}{\partial y}\right|_{t+\Delta t_{y^{(k-1)}}}$, $k_y = 6{,}393 \cdot 10^5\,\frac{N}{m}$, és $d_y = 10^2\,\frac{Ns}{m}$.

Behelyettesítve (6.20) és (6.21) kifejezéseket a (6.22) – (6.24) összefüggésekbe, majd átrendezések elvégzése után megkaphatóvá válik a keresett $\Delta y^{(k)}$ elmozdulás növekmény a három kezdetiérték feladatra. Az A pontban a kezdetiérték feladat általánosan a következőképpen írható fel

$$m\ddot{y} = mg - N_y^- + F_{cy}^-, \tag{6.25}$$

ahol a kezdeti értékek megadhatók $y(0) = 3{,}15\,mm,\ \dot{y}(0) = -1\,\frac{mm}{s}$.

A B pontban hasonlóképpen megadható:

$$m\ddot{y} = mg - N_y^+ - F_{cy}^+, \tag{6.26}$$

a következő kezdeti értékekkel: $y(0) = 5{,}95\,mm,\ \dot{y}(0) = 1\,\frac{mm}{s}$.

A C ponthoz tartozó kezdetiérték feladat általánosan

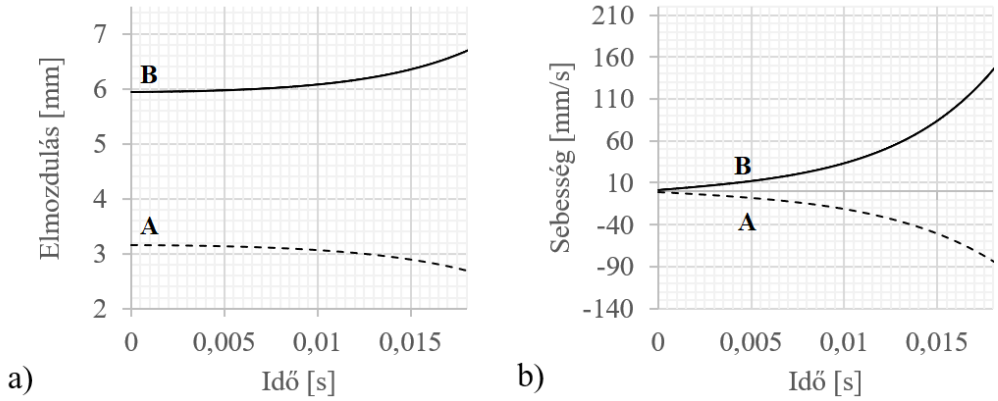
$$m\ddot{y} = mg - N_y^0 - k_y(y - y_{t0}) - d_y\dot{y}, \tag{6.27}$$

ahol a kezdeti értékek: $y(0) = 5{,}2\,mm,\ \dot{y}(0) = 1\,\frac{mm}{s}$, merevségi együttható $k_y = 6{,}393 \cdot 10^5 N/m$ és a csillapítási paraméter $d_y = 10^2\,\frac{Ns}{m}$.

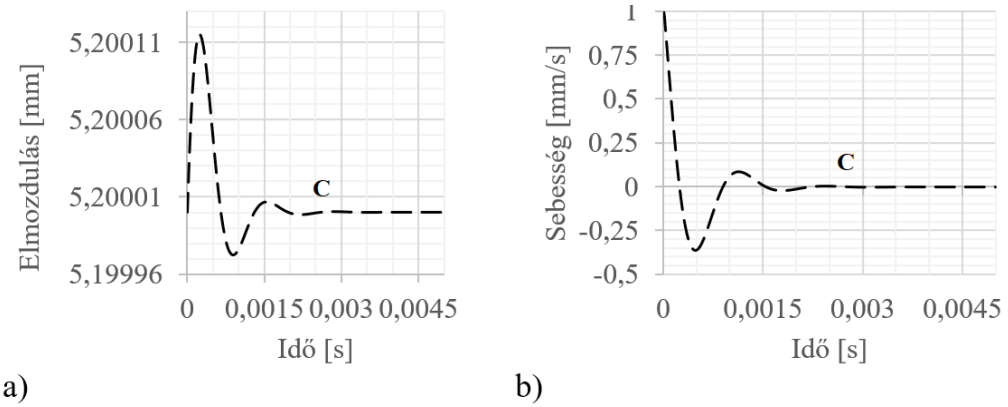
Egy Scilab szoftverkörnyezetben megírt szimulációs program segítségével a pontok stabilitása ellenőrizhető. A sebességek és a gyorsulások a Newmark módszerrel [57] kerültek meghatározásra. Az A, B és C egyensúlyi pontokban megadott kezdetiérték feladatok numerikus megoldása során az előírt időlépés $\Delta t = 10^{-6}s$. A numerikus szimulációk által

DOI: 10.14750/ME.2020.011

szolgáltatott eredményeket szemlélteti a 6.10ab. ábra és a 6.11ab. ábra. A 6.10ab. ábrán az A és B pontoknál az elmozdulások és a sebességek figyelhetők meg. Az A pontra vonatkozó elmozdulásokat és sebességeket szaggatott vonalak-, míg a B pontnál folytonos vonalak jelölik. Megfigyelhető, hogy mind az A, mind a B pontok instabilnak bizonyultak, hiszen az időben előrehaladva növekvő elmozdulás- és sebességértékek adódnak.



6.10. ábra: a) Az A és B pontokban az elmozdulások, b) sebességek



6.11. ábra: a) A C pontban az elmozdulások, b) sebességek

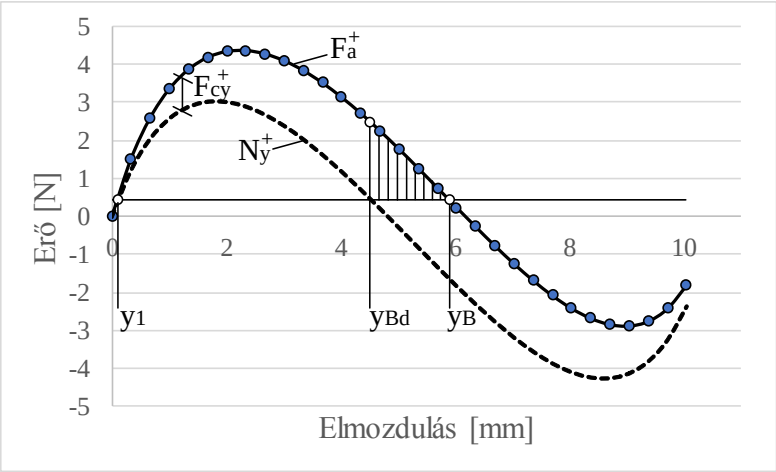
A 6.11ab. ábrán a C pontnál tapasztalható elmozdulások és sebességek láthatók. Sebesség perturbációt alkalmazva látható, hogy az akkumulátor visszatér az idő előrehaladtával az egyensúlyi C pontba, ezért ez a pont aszimptotikusan stabil lesz. A kapott eredmények megerősítik az elméleti stabilitásvizsgálat során kapott megállapításokat.

6.2.3. Dinamikus szerelés közbeni stabilitásvizsgálat

A mérnöki gyakorlat a szerelési folyamat minél rövidebb idejű végrehajtásában érdekelt. Ez azt jelenti, hogy a szerelési folyamat nem kvázi-statikusan, hanem dinamikusan, előírt, lehetőleg nagy sebességgel történik. Ekkor az akkumulátor a sebességének megfelelő kinetikus energiára tesz szert.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

Jelen alfejezet egy olyan közelítő módszert javasol, amely meghatározza Coulomb súrlódás mellett az akkumulátorok dinamikus behelyezésekor a megfogó nyitásának, egyben megállításának a helyzetét. A 6.1. alfejezetben bemutatott program segítségével az erő-elmozdulás diagram előállítható a behelyezési folyamatra. A pozitív irányú szerelési erő F_a^+ meghatározható a normális- és tangenciális irányú erők N_y^+, F_{cy}^+ vertikális komponenseiből (6.2).



6.12. ábra: Erő-elmozdulás diagram az akkumulátor behelyezésekor

A 6.12. ábra feltünteti az akkumulátor súlya által meghatározott egyensúlyi pontokat. Az y_1 egyensúlyi pont a beszerelés szempontjából kevésbé érdekes, mert itt tapadás lép fel. Így a rendszer konzervatívnak tekinthető, amelynek értelmében a Lagrange-Dirichlet módszerrel vizsgálható, azaz a stabilitás kritérium a $\delta\Pi = 0$ és a $\delta^2\Pi > 0$ feltételek teljesülése, ahol Π a potenciális energia.

A második egyensúlyi pont a 6.2.1. alfejezet értelmében $y_B = 5{,}95\,mm$, amelynél a bepattanás megtörténik, azaz y_B instabil lesz.

A dinamikus behelyezés során a megfogó v_0 sebességgel rendelkezik, amely pl. a robot T1 betanítási üzemmódjánál $0{,}25\,m/s$ értéket vesz fel. Az y_{Bd} jelöli azt a pontot, amelynél az akkumulátort elengedve, az bepattan automatikusan a helyére. Ez a pont a feladat nemlineáris jellege miatt iteráció segítségével határozható meg. Az y_{Bd} pontban lévő kinetikus energia képes fedezni a súrlódási munka és az alakváltozásból származó energia növekményt, amely megegyezik a 6.12. ábrán látható háromszög területével:

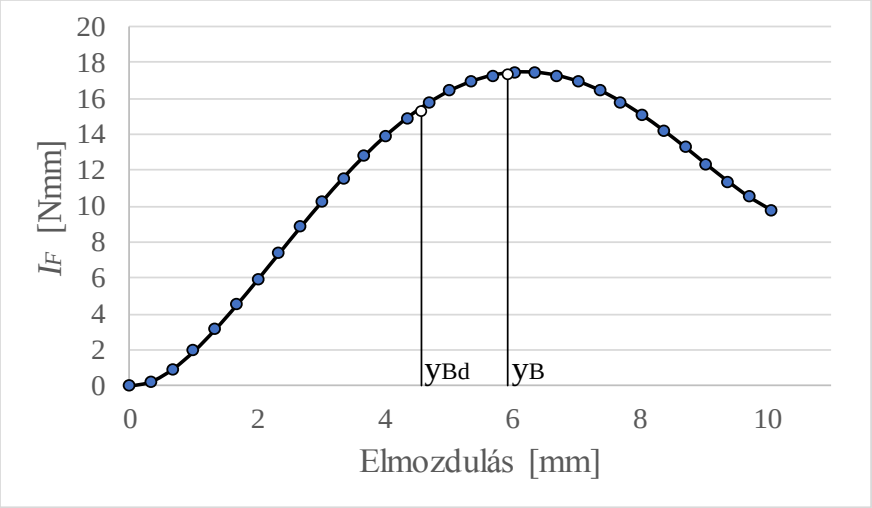
$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \int_{y_{Bd}}^{y_B} F_a^+\,dy - mg(y_B - y_{Bd}), \tag{6.28}$$

DOI: 10.14750/ME.2020.011

ahol

$$\int_{y_{Bd}}^{y_B} F_a^+ \, dy = \int_0^{y_B} F_a^+ \, dy - \int_0^{y_{Bd}} F_a^+ \, dy \cong I_F(y_B) - I_F(y_{Bd}), \tag{6.29}$$

$I_F(y)$ numerikusan kiszámítható a belső erő alapján (lásd: 6.13. ábra). Megjegyezzük, hogy ez a közelítő módszer elhanyagolja a súrlódó erő vízszintes összetevőjének a munkáját, illetve nem veszi figyelembe a normális erő vízszintes komponenséhez tartozó alakváltozási energiaváltozást. Ezek az erőkomponensek függőleges irányú erőméréssel nem határozhatók meg.



6.13. ábra: A belső erő numerikus integrálja

A (6.29) kifejezést behelyettesítve a (6.28) összefüggésbe, a belső erő integrálja az y_{Bd} pontban:

$$I_F(y_{Bd}) \cong I_F(y_B) - \frac{1}{2} m v_0^2 - mg(y_B - y_{Bd}), \tag{6.30}$$

az y_{Bd} meghatározható az $I_F(y)$ inverzével:

$$y_{Bd} \cong I_F^{-1}\big(I_F(y_{Bd})\big). \tag{6.31}$$

A megfogó, tehát egy korábbi pozícióban nyitható ki majd a dinamikus szerelés során. Az iterációval meghatározott elengedési pont: $y_{Bd} = 4{,}522\ mm$ az adott kezdeti sebességnél.

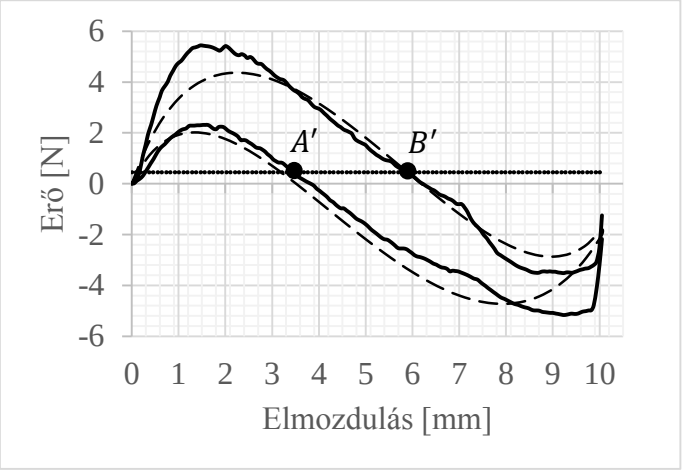
6.3. Kvázi-statikus ellenőrző mérések

A 7. fejezetben részletezésre kerülő mérőrendszer használatával gyakorlati mérések végezhetők el a szerelési erők meghatározására. A 6.1. alfejezetben ismertetett akkumulátor

DOI: 10.14750/ME.2020.011

szerelési modellnek megfelelően a robot elvégezte a be- és kiszerelési folyamatot 0,5 mm elmozdulás növekményekkel.

A mérés és a szimuláció során is egyaránt hiszterézis diagram lett a végeredmény, amelyet a 6.14. ábra mutat. A gyakorlati mérést folytonos fekete vonalak reprezentálják. A szaggatott vonal a szimulációs eredményeket érzékelteti. Egy darab lítium ionos akkumulátor súlyát a vízszintes pontvonal mutatja. Az A' és a B' a stabilitás határát jelző pontok, ahol rendre az akkumulátor automatikusan ki fog pattanni, vagy be fog pattanni. Azonban e két pont között az adhézió megjelenhet, ahogy ez a méréseknél is tapasztalható volt. A 6.2.1. alfejezet értelmében az akkumulátor kvázi-statikus vagy dinamikus berakása során a B' pont instabil lesz.



6.14. ábra: Beszerelés és kiszerelés erőszükséglete (—— mérés; ---- szimuláció)

Ahol az akkumulátor cellát elengedve magától a helyére pattan. Megjegyezzük, hogy a digitális jelfeldolgozás okozta időkésés miatt a robot csak a B' ponton túl fogja nyitni a megfogót.

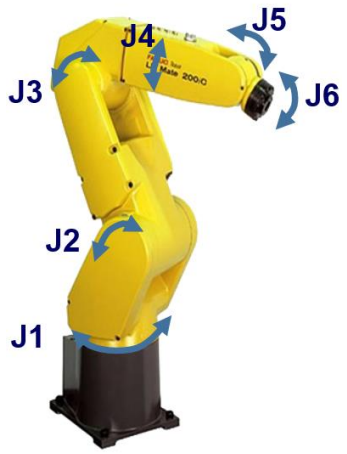
DOI: 10.14750/ME.2020.011

7. ROBOTOS SZERELÉS ERŐ-VISSZACSATOLÁS ALAPJÁN

Ebben a fejezetben egy olyan tesztrendszer kiépítéséről lesz szó, amellyel az akkumulátorpakk behelyezésének és kivételének erőlefutása meghatározható. Továbbá, a mérések alapján a mikrovezérlő beprogramozására is sor kerül, hogy meg tudja határozni a behelyezési műveletkor az elengedési pontot és jelezzen a robotnak.

7.1. Az alkalmazott ipari robot ismertetése

A szerelést egy 6 szabadsági fokkal rendelkező Fanuc LR Mate 200iC [74], [75] ipari robot fogja elvégezni. A robot nyílt kinematikai lánccal rendelkezik, valamint csukló kényszerekből (J1 – J6) épül fel (lásd: 7.1. ábra). A robotot az első három tagja szerint szokásos osztályozni, ez alapján RRR típusú. A maximális kinyúlása $704\ mm$. A munkatere egy csonkolt gömb.



7.1. ábra: A szerelést elvégző robot

A robot 6. csuklójának (J6) maximális terhelhetősége $5\ kg$, ebbe a tömeg értékbe a megfogó egység is beletartozik. A szerkezet megfogó nélküli tömege $27\ kg$, ismétlési pontossága 0,02 mm. Egy Schunk gyártmányú szervo megfogó fogja majd az akkumulátort helyezni.

A robotvezérlő (ROC) egy R-30iA Mate típus (lásd: 7.2. ábra), amely vezérlését tekintve zárt. Teljesítménye $500\ W$, tápellátás: $230\ V$. A központi feldolgozóegység (CPU) többprocesszoros architektúra.

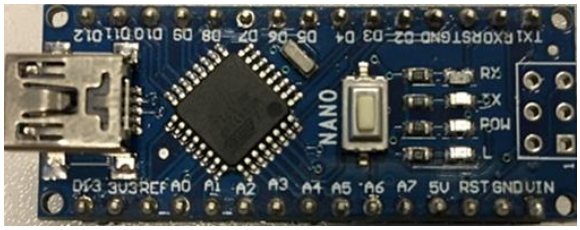
A robotot programozni, mozgatni az ún. Teach Pendant (TP) egységgel lehet. Ez a berendezés hivatott a felhasználó és a robotrendszer közötti kommunikációt megteremteni.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

7.2. ábra: A robotvezérlő egység

7.2. Az erőmérőrendszer elemei

A feladat megoldásához egy Arduino Nano fejlesztőplatformon (lásd: 7.3. ábra) található ATmega328 [76] típusú 8 bites, RISC alapú mikrovezérlő kerül felhasználásra.



7.3. ábra: Arduino Nano fejlesztői platform

Az Arduino, mint fejlesztői platform 2005-ben a Wiring platform [77] alapján Olaszországban született meg. Mára már sok modellje elérhető, alkalmazástól függően, a teljesség igénye nélkül pár, nevesebb fejlesztői platformja: Arduino Mega, Arduino UNO, Arduino Leonardo.

Az ATmega328 mikrokontroller órajele 16 MHz, 32 kB flash alapú memóriával rendelkezik, valamint még rendelkezésre áll egy 1 kB méretű EEPROM is. Az Arduino működési feszültsége 5 V, 22 darab digitális ki- és bemenettel rendelkezik, amelyekből 6 darab PWM kimenetként is funkcionálhat. Összesen 8 db. analóg bemenete van, amely multiplexált, felbontása 10 bit. A maximális áram a bemenetek/kimenetek vonatkozásában 40 mA.

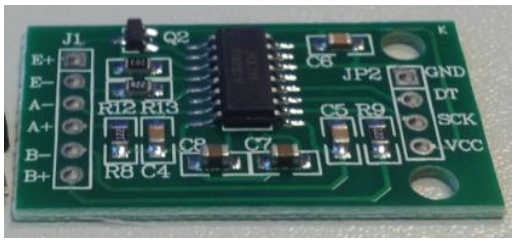
Programozása az Arduino IDE fejlesztői környezet segítségével valósulhat meg, amelynek kezelőfelületét a 7.4. ábra mutatja. Maga a környezet egy C alapokon nyugvó C++ implementáció. Két fő programrész emelhető ki, az egyik a *void setup() {utasítások}*, a másik a *void loop() {utasítások}* rész. Az előbbi programrészben megírt utasítások csak egyszer

DOI: 10.14750/ME.2020.011

fognak lefutni a mikrovezérlő bootolását követően, míg az utóbbi esetben az utasítások egy végtelen ciklusban kerülnek végrehajtásra.

7.4. ábra: Arduino IDE fejlesztőkörnyezet

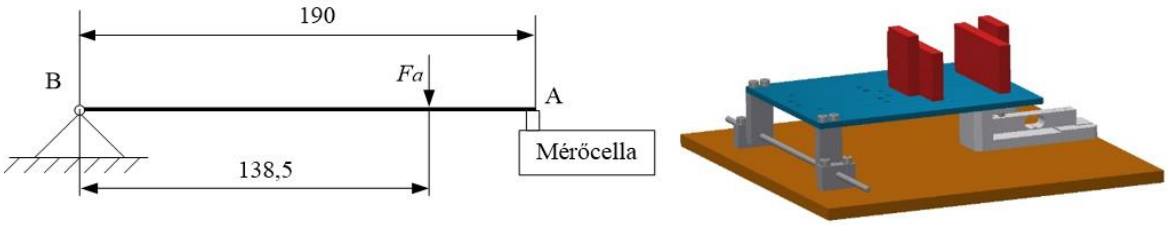
Az alkalmazott A/D átalakító egy HX711 típusjelzésű 24 bites felbontású szigma-delta egység (lásd: 7.5. ábra). Kifejezetten mérlegcellákhoz készült a modul. Erősítési tényezője az egységnek diszkrét értékek közül kiválasztható és beállítható.



7.5. ábra: A HX711 modul

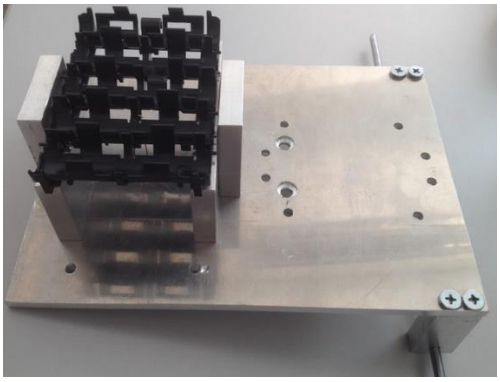
A műanyag akkumulátortartó szerelés közbeni fix pozícióban tartásához egy rögzítő szerkezet megtervezése elengedhetetlen volt. A szerkezet főbb méreteit és 3D-s modelljét a 7.6. ábra mutatja.

DOI: 10.14750/ME.2020.011



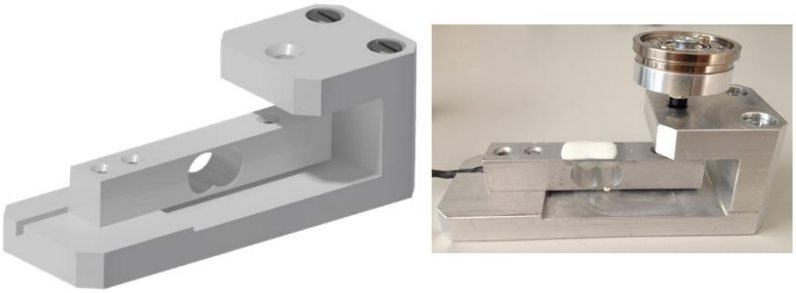
7.6. ábra: Akkumulátortartó rögzítő szerkezete

A szerkezet műhelyrajzai, illetve a 3D-s modellje Autodesk Inventor 2016 szoftver segítségével készültek el. A szerkezet anyaga alumínium, kialakítását tekintve pedig mind az 5 akkumulátort magába foglaló pakk-, mind a 4 cellát tartalmazó pakk szerelésére alkalmas. A tesztberendezés létrehozásakor az 5 akkumulátort tartalmazó egység tartóelemei kerültek felhelyezésre (lásd: 7.7. ábra).



7.7. ábra: A rögzítő szerkezet fényképe

A tesztrendszer kiépítéséhez szükséges volt egy tartókonzol megtervezésére és legyártására is. A konzolt és a 3D-s modelljét a 7.8. ábra mutatja.



7.8. ábra: a) A tartókonzol 3D-s modellje, b) legyártva

A mérőcella alatt, egy menetes furat található, amelyben egy hernyócsavar megfelelő beállításával megakadályozható a berendezés túlterhelése.

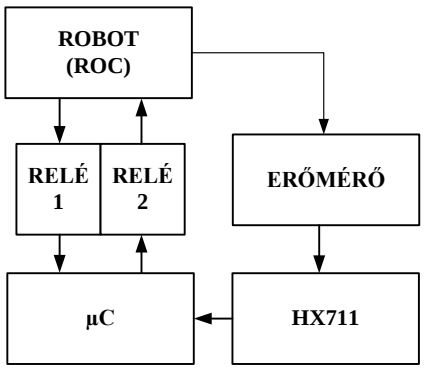
DOI: 10.14750/ME.2020.011

7.3. A vezérlési stratégia kidolgozása

A szerelést gyakran célszerű a manipulátor és a környezet között fellépő erők szabályozásával kezelni, nem pedig a megfogót csupán pozícióvezérléssel működtetni [78].

Mivel a szereléshez szükséges F_a erő (lásd: 6.9. ábra) nem monoton a vizsgálandó elmozdulás tartományon, ezért az erővezérlés nem egy magától értetődő művelet. Az akkumulátor súlyát megválasztva referencia értéknek, látható, hogy több ponton is egyezik az szerelési erővel. Ez azt jelentené, hogy a szerelési folyamat idő előtt leállna, anélkül, hogy a folyamat elérné a B pontot. Az erő-visszacsatolást a szerelési erő maximális- és a B pontnál mért erő közötti intervallumon célszerű alkalmazni. Azonban *a priori* az erő maximális értéke még nem áll rendelkezésre, ezért vagy szimulációval, vagy méréssel meg kell határozni a közelítő értékét.

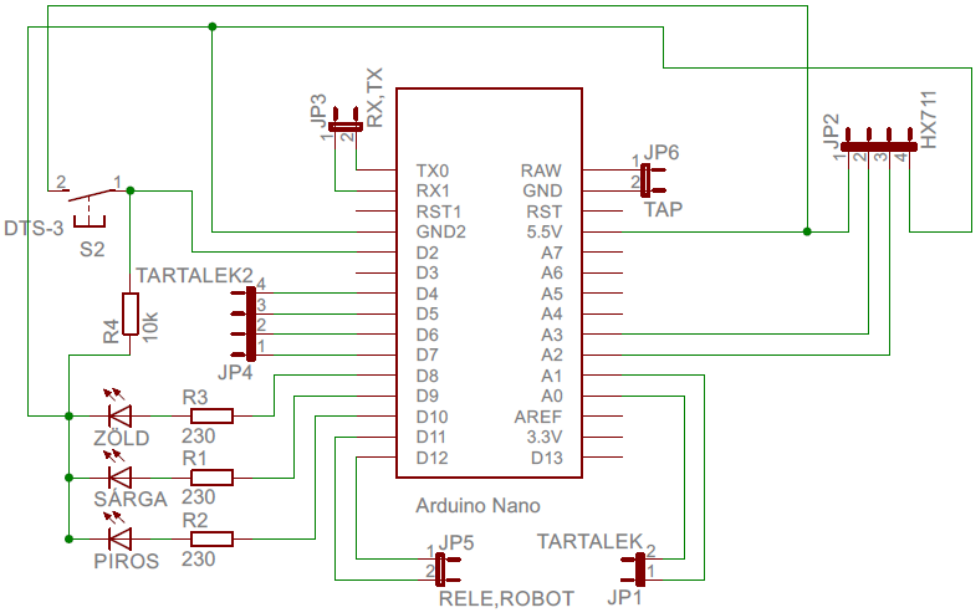
Az előbb említett nehézségek, valamint a szereléshez használt robot zárt vezérlője miatt a pozícióvezérlés lesz kiegészítve erő-visszacsatolással. Az erő-visszacsatolás eseménykezelést hivatott szolgálni, azaz a B pont helyzetének a meghatározását. Megjegyezhető, hogy az erő-visszacsatolást a rendszer Bool típusú logikai értékké konvertálja a stabilitási ponthoz képest a robot számára.



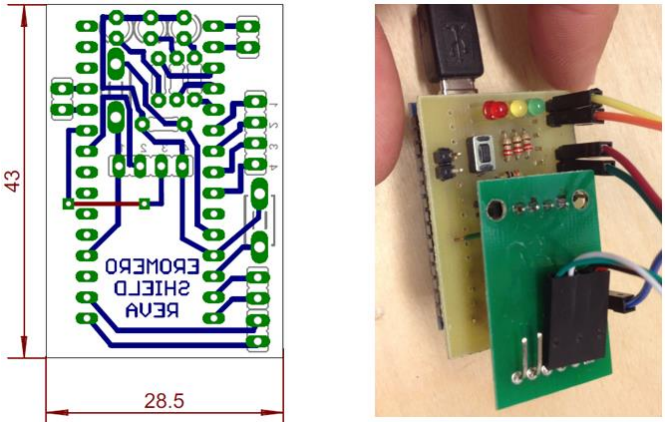
7.9. ábra: A mérés blokkvázlata

A vezérlés blokksémája a 7.9. ábrán látható. A HX711 A/D átalakító fogja mérni az erőmérő cella hídfeszültségét, majd erősítve a mért jelet továbbítja a mikrokontroller számára. A modul 80 Hz mintavételi frekvenciával képes maximálisan dolgozni.

DOI: 10.14750/ME.2020.011



7.10. ábra: A saját készítésű NYÁK kapcsolása



7.11. ábra: A NYÁK terv és az összeszerelt elektronikai rendszer

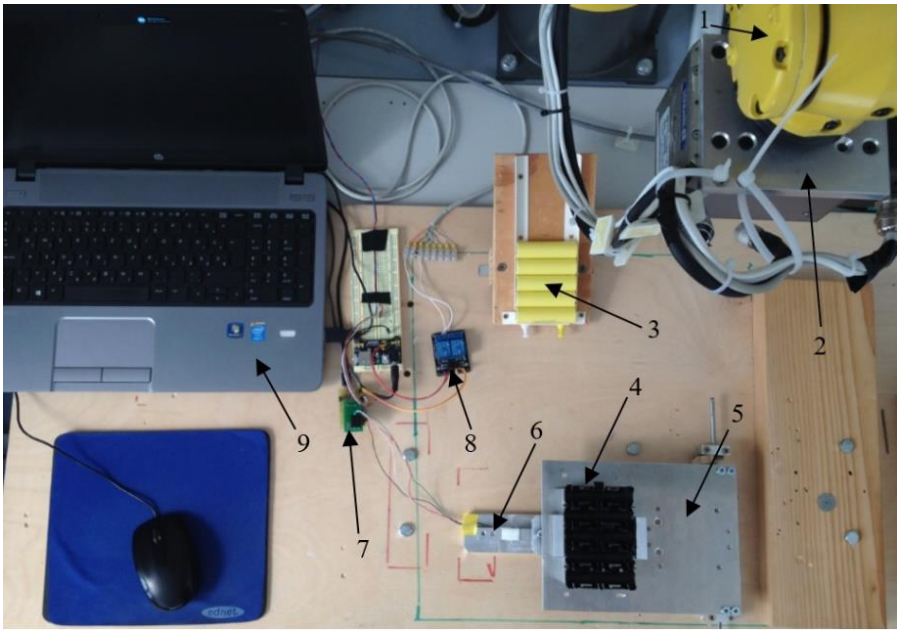
Egy saját készítésű nyomtatott áramköri lap (NYÁK) került beépítésre, hogy az A/D átalakítót és a μC -t csatlakoztatni lehessen, valamint a be- és kimenetek, illetve az erőértékek nagyságát jelző LED-ek kivezetésre kerülhessenek. A 7.10. ábra mutatja a NYÁK kapcsolási rajzát. Az elkészült NYÁK tervet és a kész elektronikai egységet a 7.11. ábra szemlélteti. Az elkészült NYÁK a *Revision A* nevet kapja.

Két darab relé: *Relé 1* és *Relé 2* (lásd: 7.9. ábra) felhasználásával a mikrovezérlő és a robot között létrehozható a kommunikáció, így a mikrokontroller jelet tud küldeni, illetve fogadni az R-30iA Mate típusú robotvezérlőnek/től.

Az akkumulátor behelyezése pozícióvezérléssel fog történni, kiegészítve az erő-visszacsatolással. A cella behelyezésének folyamatánál a robot lépésről-lépésre halad kis

DOI: 10.14750/ME.2020.011

pozíció inkrementekben, közben a μC figyeli, hogy a folyamat elérte már a stabilitás határát jelző B pontot. Az akkumulátorpakk szerelésére alkalmas tesztrendszert szemlélteti a 7.12. ábra. Az ábrán látható főbb elemeket 1–9-ig számok jelölik.



7.12. ábra: Az elkészült mérőrendszer, (1) robot, (2) Schunk megfogó, (3) akkumulátorok, (4) akkumulátor tartó, (5) akkumulátor tartó rögzítő állvány, (6) mérőcella, (7) elektronika, (8) relék, (9) személyi számítógép

Először a robot az alaphelyzetéből kiindulva a 3 jelű akkumulátor adagoló pozíciójába áll, ahol megfogja az első cellát. Ezután a 4 jelű cellatartó feletti helyzetbe mozog. A behelyezési folyamat folytonosságát a 3. táblázatban található szubrutin hívása fogja biztosítani.

1	DO[107]=ON;
2	WAIT 0.1(sec);
3	DO[107]=OFF;
4	PR[79:TARGET]=PR[R[64]];
5	PR[79,3:TARGET]=PR[79,3:TARGET]+10;
6	J PR[79:TARGET] 100% FINE;
7	LBL[1];
8	PR[79,3:TARGET] = PR[79,3:TARGET]-DISPINCR;
9	J PR[79:TARGET] 100% CNT66;
10	IF DI[113] = ON,JMP LBL[2];
11	JMP LBL[1];
12	LBL[2];
13	OPEN;

3. táblázat: Az akkumulátor behelyezéséhez megírt szubrutin

DOI: 10.14750/ME.2020.011

A szubrutin hívását követően az 1. relé 0,1 másodpercre kapcsolni fog (lásd: 1–3 sorok). Ezen utasítások hatására a 2. relé alaphelyzetébe fog állni. Egy célkoordináta kerül definiálásra a 4. sorban, ez a helyzet a behelyezett állapotú cella feltételezett koordinátája lesz, amelyet a robot egyik pozícióregisztere (PR) tárol. Ezután a behelyezés kezdőpontja a feltételezett behelyezett állapotú cella pontja felett lesz 10 mm-rel, majd a robot erre koordinátára fog mozogni (lásd: 5, 6 sorok). Egy ciklus definiálása történt az 1 és 2 jelzésű címkék (label) között, ahol az elmozdulás növekmények alkalmazása történik, lépésről–lépésre (lásd: 8–11 sorok). Továbbá, a mikrovezérlő közben méri a szerelési erőt. Minden egyes lépésben az elmozdulás növekmény nagysága 0,5 mm. A 2 jelű megfogó állandó sebességgel mozog a növekmények között. A ciklus leállításra kerül a mikrovezérlő által, ha a behelyezés eléri a stabilitás határát jelző pontot (lásd: 10. sor), ez a 4. táblázatban lévő, a μC által felhasznált algoritmus miatt lehetséges. A 2. relé a robot számára egy digitális bemenetként értendő. A 13. sorban található OPEN nevű makró segítségével a megfogó elengedi az akkumulátort, amely ekkor automatikusan bepattan a helyére.

1	if($F_{a,i} > F_{max}$)
2	$F_{max} = F_{a,i}$;
3	if(($F_{a,i} < F_{a,i-1}$) && ($F_{a,i} < G_{bat}$) && (($abs(F_{max} - F_{névl})/F_{névl}) < \epsilon$))
4	{
5	Relé R2 kapcsolása;
6	}

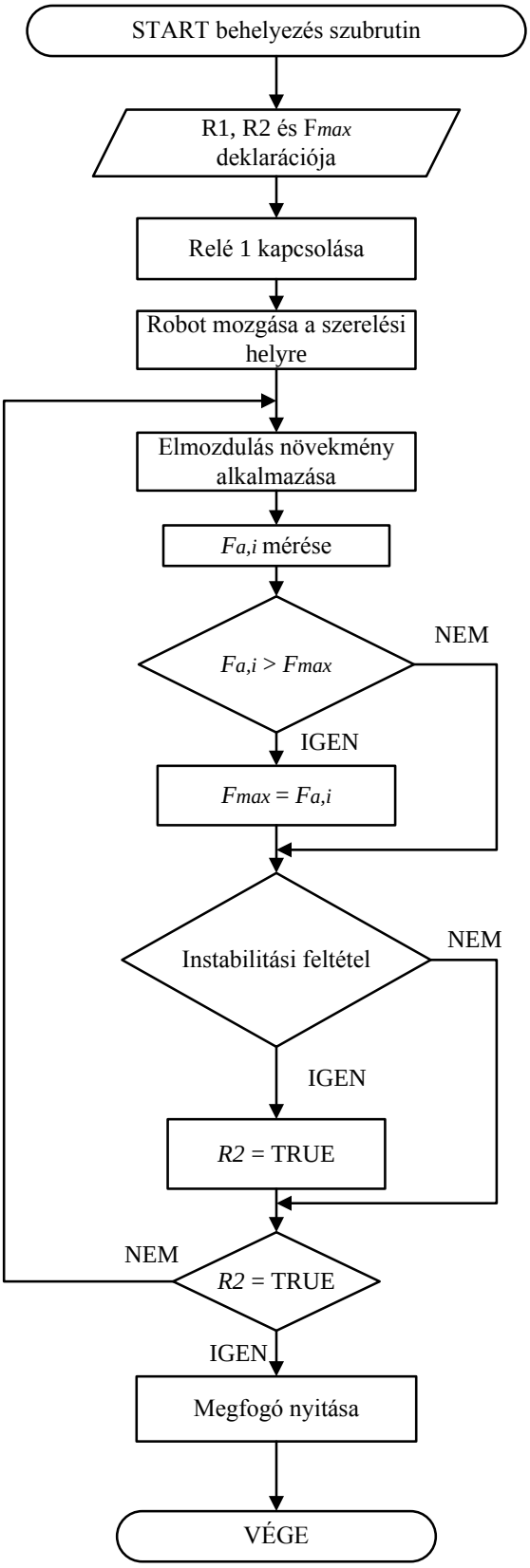
4. táblázat: A stabilitás határát jelző pont megkeresésének algoritmusa

A 4. táblázatban adott algoritmus definiálja a stabilitás határát jelző pontot, amely a szerelés során fellépő maximális szerelési erő utáni szakaszban található (lásd: 6.5. ábra). Tehát a maximális erőt jelző pontot a behelyezés során át kell lépni, és meg kell találni a negatív meredekségű görbének, valamint a cella súlyerejének metszéspontját. Ez a maximális erő függ a sebességtől, azonban általában az erő névleges értékéhez $F_{névl}$ lesz közel, amelyet egy előzetes méréssorozattal lehet meghatározni.

A szereléskor fellépő erő aktuális értékét $F_{a,i}$ fogja jelenteni az i-dik lépésben, míg az előző értékét az $F_{a,i-1}$ fogja jelölni. A maximális, szerelés során fellépő erő meghatározása az F_{max} változó használatával történik (lásd: 4. táblázat 1, 2 sorok), a kezdeti értéke az F_{max} változónak zérus. A cella súlyerejét a G_{bat} reprezentálja. A stabilitás határát jelző ponton áthaladva az aktuális erő nagysága kisebb lesz, mint a G_{bat} értéke. Egy másik feltétel definiálásával az $F_{névl}$ névleges erő és az F_{max} maximális erő összehasonlítása történik,

DOI: 10.14750/ME.2020.011

amellyel biztosítható, hogy a rendszer nem egy korai pontnál fogja elengedni a cellát. A behelyezés folyamatábráját a 7.13. ábra mutatja meg részletesen.

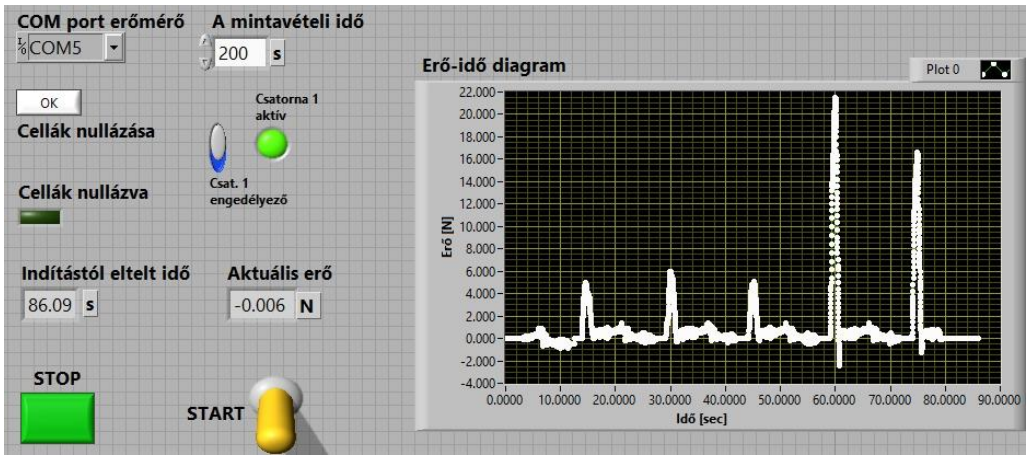


7.13. ábra: A behelyezési folyamat

DOI: 10.14750/ME.2020.011

Röviden összefoglalva a robot pozícióvezérléssel működik a zárt robotvezérlő miatt, valamint hagyományosan, TP segítségével zajlott annak programozása. A TP programban lehetőség volt a digitális bemenet használatára, hogy a stabilitás határát jelző pont elérést követően a μC jelét fogadja a rendszer. Ezen pontot érintve μC egy logikai 1 jelet küld a robotnak a 2. relé segítségével, hogy a behelyezési folyamatot megszakítsa, és a robotmegfogót kinyissa, minden más esetben a 2. relé logikai 0 értéket küld a robot számára.

A mikrovezérlő UART modulja segítségével a számítógép számára elküldi a mért erőértékeket. A szerelési erők közel valós idejű megjelenítéséhez LabVIEW fejlesztőkörnyezetben egy program került megírásra, melynek elkészített kezelőfelületét mutatja a 7.14. ábra. Az ábrán mind az 5 darab akkumulátor behelyezésének erő-idő diagramja látható.



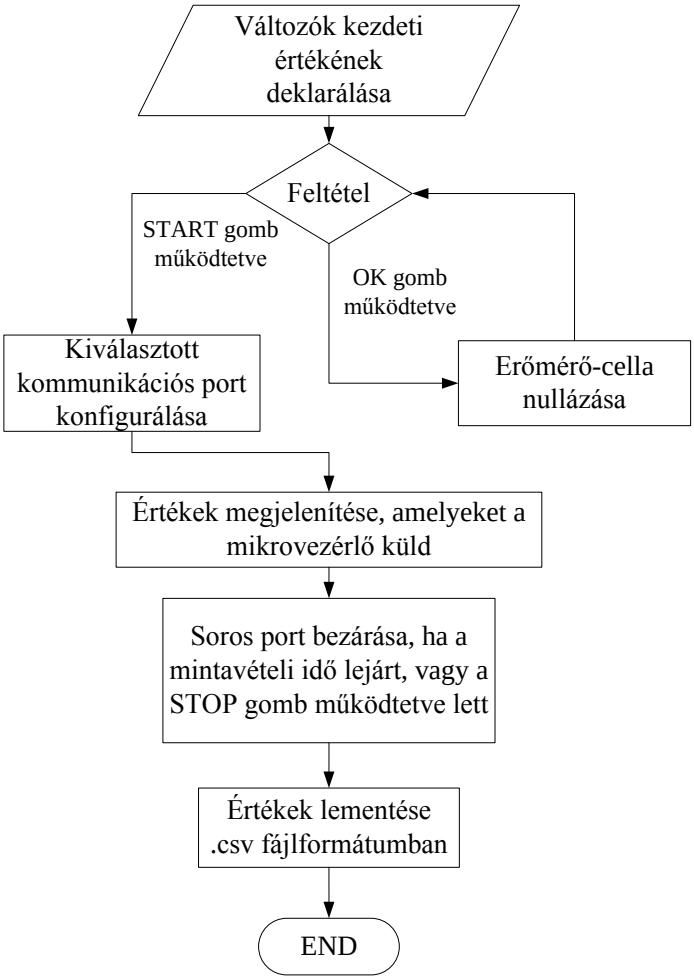
7.14. ábra: A kiértékelő program felhasználói felülete

A mintavételi idő-, a kommunikációs port beállítását követően a START kapcsoló működtetése után az erőértékek az idő függvényében, közel valós időben megjelenítésre kerülnek. A mintavételi idő lejárta- vagy a STOP nyomógomb működtetése után a program bezárja a soros portot, és a mért értékek lementhetők .csv fájlformátumba utólagos kiértékelések elvégzése céljából. A START kapcsoló működtetése előtt az erőmérő cella nullázását az OK gombbal lehet megtenni. A sikeres nullázást követően a rendszer egy zöld lámpával jelzi annak sikerességét.

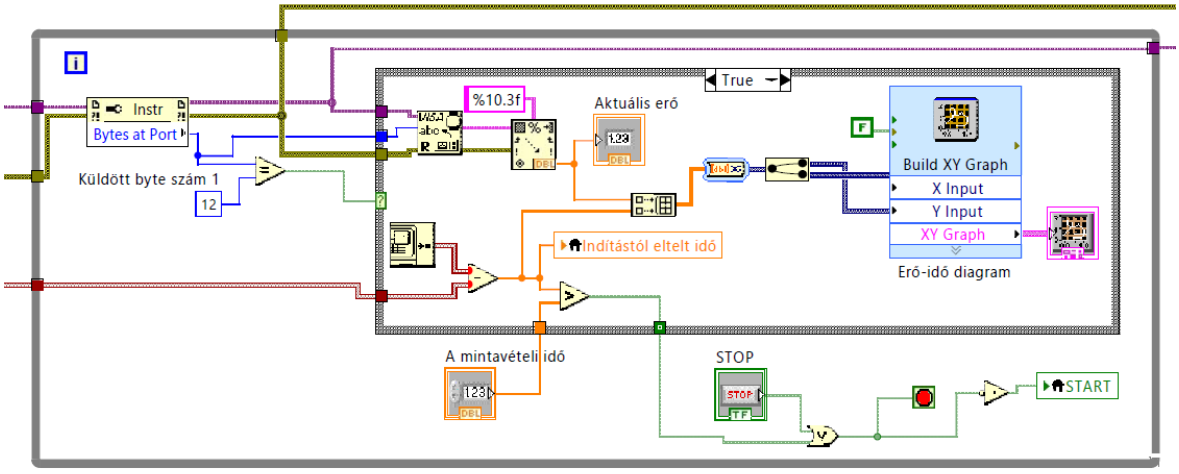
A megírt program folyamatábráját a 7.15. ábra mutatja. A mérési adatok fogadásához, az előzetes beállításokhoz, úgy, mint a soros port konfigurálása, sorrendiséget kellett biztosítani, amelyet a *Flat Sequence* opcióval lehet elérni a LabVIEW szoftverben. A

DOI: 10.14750/ME.2020.011

beérkező adatokat megjelenítő és a mintavétel leállításának feltételét reprezentáló lépés blokkját mutatja a 7.16. ábrán látható programrészlet.



7.15. ábra: A program folyamatábrája



7.16. ábra: A kifejlesztett mérésadatgyűjtő program részlete

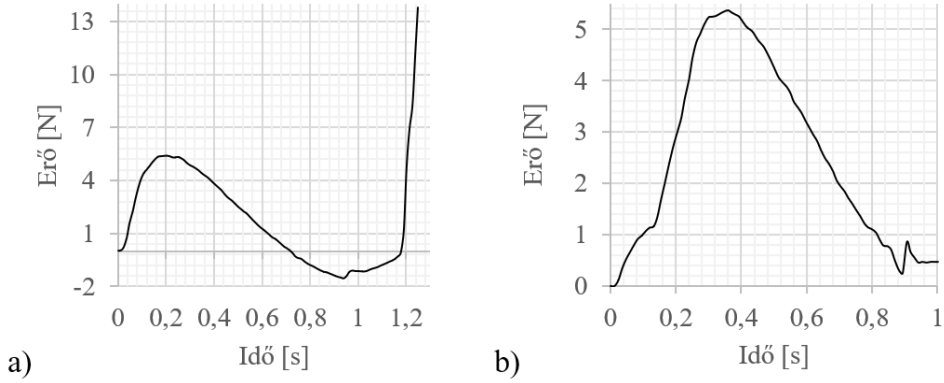
DOI: 10.14750/ME.2020.011

7.4. Mérési eredmények kiértékelése

A behelyezés, illetve a kivétel során a robot pozícióvezérléssel működik. Az erő-visszacsatolás fogja biztosítani a pozícióvezérlés megszakítását a stabilitás határán lévő pontnál, ezt a pontot elérve a mikrovezérlő jelet küld a robotnak, hogy állítsa meg a behelyezési műveletet autonóm módon.

A 7.17ab. ábra két példát mutat egy akkumulátor behelyezésekor mért erő-idő diagramokra. A 7.17a. ábra esetén látható, hogy ha nincs alkalmazva erő-visszacsatolás, akkor nem kívánt nagy erők is fellépnek az akkumulátor behelyezésekor, amelyek, akár a robotban, akár az akkumulátorpakkban is kárt tehetnek. Ezzel szemben erő-visszacsatolást alkalmazva eliminálhatóvá válnak a nem kívánt túlterhelések (lásd: 7.17b. ábra).

A pozícióvezérlést erő-visszacsatolással kiegészítve elérhető, hogy a stabilitás határpontjában megszakított behelyezési folyamat után kinyitva a megfogót az akkumulátor automatikusan bepattanjon a cellatartóba.



7.17. ábra: a) Erő-visszacsatolás nélküli eset, b) erő-visszacsatolással történő szerelés

DOI: 10.14750/ME.2020.011

8. INTELLIGENS ROBOTMEGFOGÓ TERVEZÉSE

A fejezetben egy olyan intelligens robotmegfogó tervezéséről és legyártásáról lesz szó, amely stabilitásvesztéssel járó szerelési folyamatokra lesz alkalmas és hasznosítja a 7. fejezet eredményeit. A 7. fejezetben ismertetett mikrovezérlő és erőmérő cella kerül beépítésre, azonban a saját készítésű NYÁK-on változtatni kellett. Az eddigi relés megoldás helyett optocsatolók alkalmazása volt célszerű a pergés (prell) jelenségének elkerülése miatt.

8.1. Követelmények megfogalmazása

A megfogóval szemben támasztott követelmények között szerepelnek hardveres és szoftveres elemek.

A hardver szintű követelmények:

- biztosítsa a szerelés irányú erőmérést;
- védje a berendezést a túlterheléstől;
- kínáljon megoldást a robottal történő kommunikációra;
- legyen könnyű és kompakt;
- legyen könnyen szerelhető kivitelű.

A könnyű szerelhetőség és a kompakt kiszerelés egymásnak ellentmondó követelmények, amelyekre a modellezés során mindig tekintettel kell lenni. A robottal történő kommunikáció kiépítéséhez biztosítani kell a feszültségszintek közötti különbség áthidalását, amelyet a mikrovezérlő ki- és bemenetei, valamint a robot ki- és bemenetei között elhelyezett optocsatolókkal valósítunk meg.

A szoftveres követelmények:

- programozható legyen különböző feladatokra;
- szerelés közben fellépő stabilitásvesztéssel járó erőlefutás jellemző pontjainak detektálása;
- a szerelés monitorozása, az erőértékek lementése központi számítógépre az Ipar 4.0 filozófiájának megfelelően;
- információcsere a robottal.

A megfogó programozhatóságát, a már ismertetett Arduino fejlesztői platform biztosítja. A stabilitásvesztést jellemző feltételrendszer alkalmazásával a program képes meghatározni a megfogó nyitását-, valamint üzenetet küldeni a robotnak. A robot szerelés közbeni mozgásakor fellépő erők függvényében a rendszernek be kell tudni avatkoznia, ha a folyamat

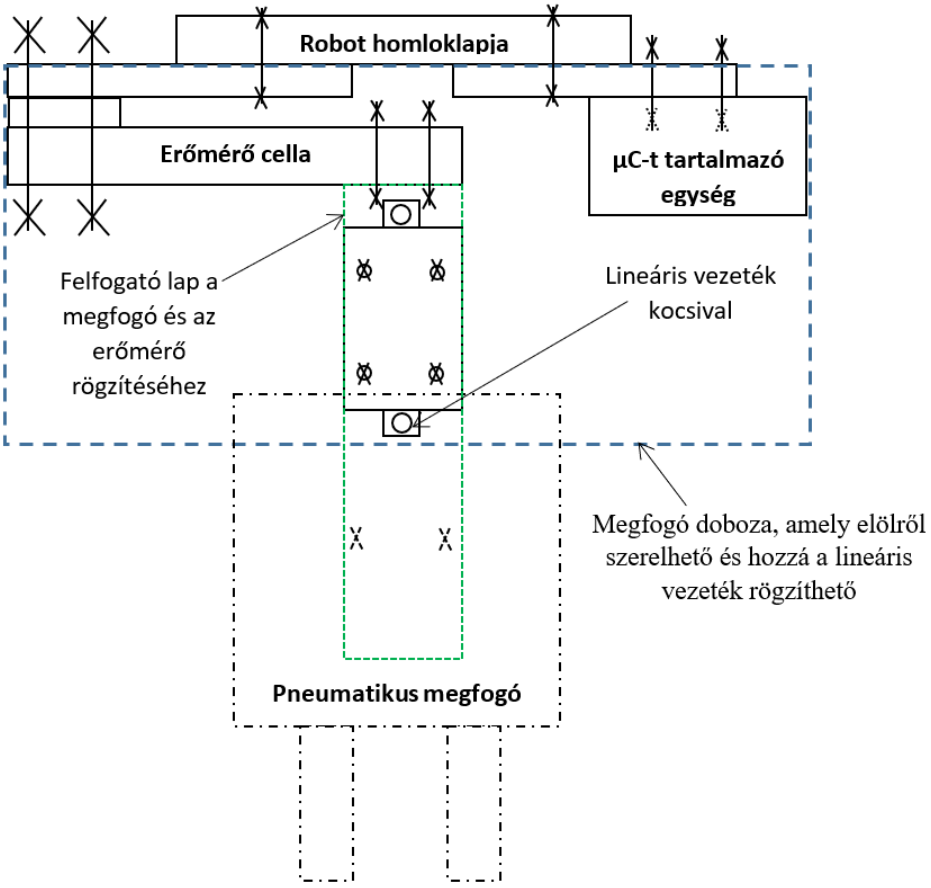
DOI: 10.14750/ME.2020.011

kiugró erő-elmozdulással jár. A mikrovezérlő az erőértékeket a személyi számítógép számára UART kommunikációs protokollal továbbítja.

A rendszerrel támasztott követelmények érdekében a megfogó kialakítására több konstrukciós vázlat is született.

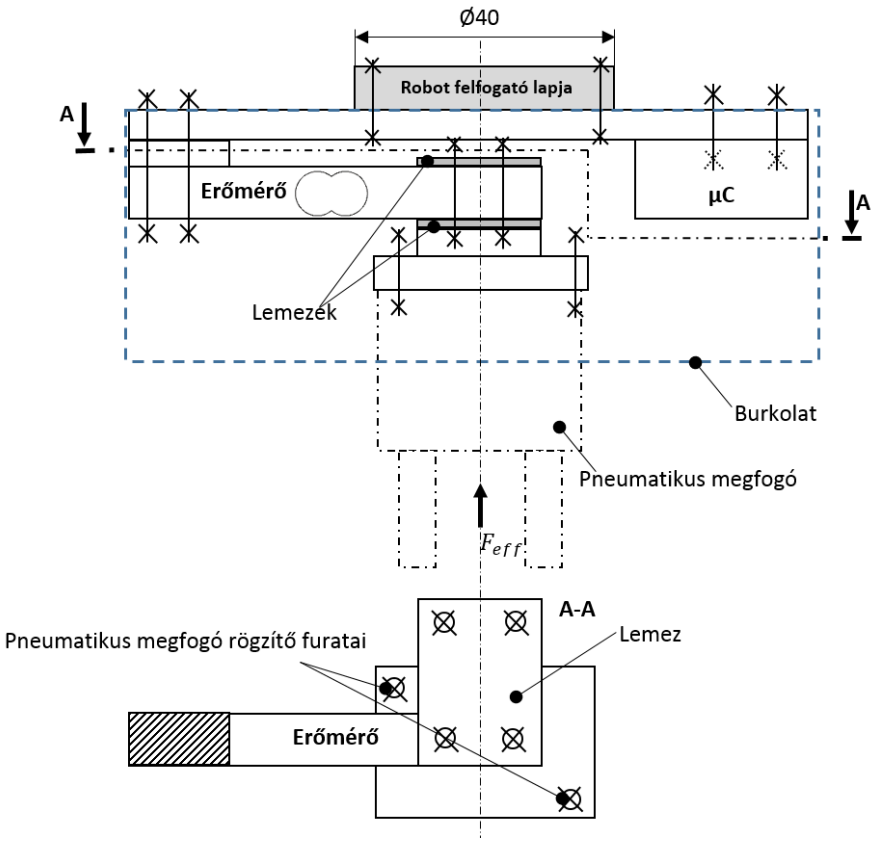
8.2. A megfogó megtervezése, összeállítása

Jelen alfejezet tárgyalja azt a két megfogó konstrukciót, melyekkel lehetséges a csak szerelés irányú erők mérése. A konstrukciós terveket rendre a 8.1. ábra és a 8.2. ábra mutatják. Az első változat egy golyóskocsival akadályozná meg a nem kívánt erők fellépését az erőmérő cella vonatkozásában (lásd: 8.1. ábra). A második változat két párhuzamos támasztó lemezt tartalmaz, amelyek egy rugalmas mechanizmust alkotva biztosítják a csak szerelés irányú erőkomponensek felvételét.



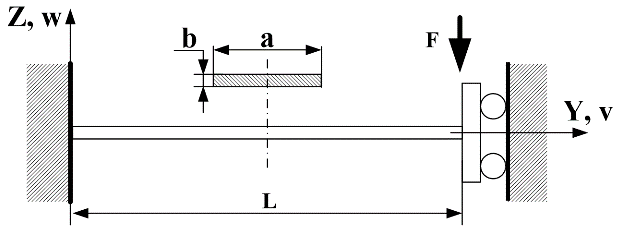
8.1. ábra: A lineáris vezetéket tartalmazó modell

DOI: 10.14750/ME.2020.011



8.2. ábra: A két párhuzamos rugalmas lemezt tartalmazó megfogó változat terve

A továbbiakban a rugalmas lemezeket tartalmazó modell megvalósítása történt meg. A lemezek modelljét a 8.3. ábra szemlélteti.



8.3. ábra: A támasztó lemez mechanikai modellje

A vékony acéllapok egyik vége rögzített, míg a másik vége függőlegesen el tud mozdulni. Ebben az esetben csak az X irányban lesz hajlítva a két lemez. A lemez modell paramétereit az 5. táblázat foglalja össze. A modell alapján egy egyszerű lemezhajlítás hasonló a rudak hajlításához, azonban az anyagjellemzők tekintetében van változás.

Lemez hajlításkor a rugalmassági modulus a következőképpen számítható:

$$E_1 = \frac{E}{1-\nu^2}, \tag{8.1}$$

ahol E a rugalmassági modulus és ν a Poisson tényező.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

	Érték	**Mértékegység**
Vastagság (b)	0,35	$[mm]$
Szélesség (a)	23	$[mm]$
Hossz (L)	21	$[mm]$
Young modulus (E)	210	$[GPa]$
Poisson tényező (ν)	0,3	$[-]$

5. táblázat: Az acéllemezek tulajdonságai

Mivel van összefüggés a lemez- és rúd hajlítása között, ezért egy lemez merevségi mátrixa felírható:

$$\mathbf{K_{lem}} = \begin{bmatrix} \frac{12IE_1}{L^3} & \frac{6IE_1}{L^2} & -\frac{12IE_1}{L^3} & \frac{6IE_1}{L^2} \\ \frac{6IE_1}{L^2} & \frac{4IE_1}{L} & -\frac{6IE_1}{L^2} & \frac{2IE_1}{L} \\ -\frac{12IE_1}{L^3} & -\frac{6IE_1}{L^2} & \frac{12IE_1}{L^3} & -\frac{6IE_1}{L^2} \\ \frac{6IE_1}{L^2} & \frac{2IE_1}{L} & -\frac{6IE_1}{L^2} & \frac{4IE_1}{L} \end{bmatrix}, \tag{8.2}$$

az általánosított csomóponti elmozdulások vektora:

$$\mathbf{q_{lem}^T} = [w_0 \quad \varphi_{x0} \quad w_L \quad \varphi_{xL}]. \tag{8.3}$$

Az elmozdulás peremfeltétele a következő lesz

$$w(0) = 0, \varphi_x(0) = 0, \varphi_x(L) = 0, \tag{8.4}$$

ez alapján csak egy ismeretlen marad, amely a Z irányú elmozdulás w_L lesz a szabad végen. Felírható az összefüggés, amellyel számítható a maximális elmozdulás során ébredő erőszükséglet.

$$\frac{12IE_1}{L^3} w_L = F. \tag{8.5}$$

Behelyettesítve a rendelkezésre álló adatokat, adódik, hogy $F = 2{,}61\,N$ egy lemeznél tapasztalt erőszükséglet a maximális elmozdulásnál. Két lemezre ez az érték a duplájára fog módosulni, azaz $F_p = 5{,}22\,N$. Az elmozdulás maximális értéke $0{,}1063\,mm$, amely az 5. fejezetben bemutatott erőmérő cella maximális terhelése mellett értendő.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

Az erőmérő cella külön történő kalibrálása után beépítve az intelligens megfogóba szükséges a mért erőértékek átskálázása, amely egy arányos taggal tehető meg.

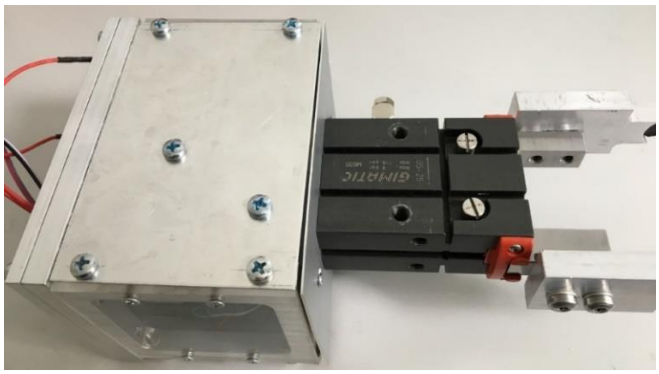
$$F_{eff} = F_L + w_L \frac{F_P}{0{,}1063}, \tag{8.6}$$

az F_L jelenti az erőmérő cellán ébredő erő nagyságát, w_L pedig egy tetszőleges elmozdulást, ahol az effektív erő F_{eff} nagyságát kell számítani.

A megfogó tervei Autodesk Inventor 2016 szoftverrel készültek el. A szükséges alkatrészek legyártásához műhelyrajzok elkészítése elengedhetetlen volt. Összesen 19 darab alkatrészrajz és egy összeállítási rajz született. Az alkatrészek a Szerszámgépek Intézeti Tanszéke-, valamint az Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézet műhelyében kerültek legyártásra.

A túlterhelési védelmet egy villa alakú megtámasztó egység alkalmazásával lehet elérni, amelyet a 8.4. ábra mutat. A villán két furatban hernyócsavarok találhatók, amelyek állításával határolható le a cella mozgása. Az erőmérő-cella átellenes, mérésre szolgáló oldalain acél fegyverzetek vannak. Ezek az acéllapok a felütközési felület szerepét látják el, így elkerülhető az esetleges túlterhelés következtében, hogy a csavarok benyomódjanak a mérőcella anyagába.

8.4. ábra: A túlterhelési védelmet megvalósító elem



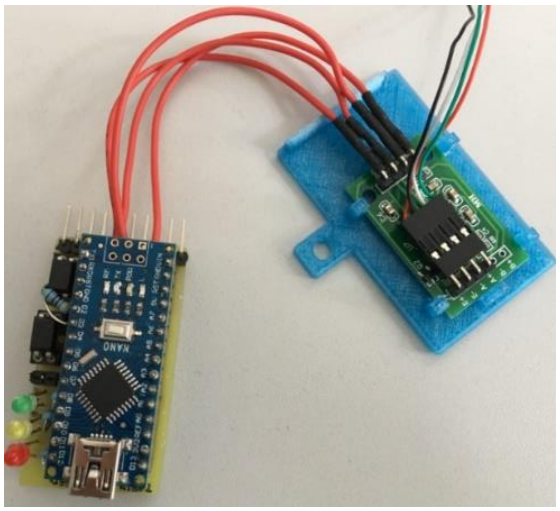
8.5. ábra: Az elkészült és összeszerelt intelligens megfogó

DOI: 10.14750/ME.2020.011

A legyártatott alumínium alkatrészek összeszerelése, erőmérő cella beépítése és egy pneumatikus megfogó felhelyezése után elkészült az intelligens megfogó, amelyet a 8.5. ábra szemléltet. Egy Gimatic gyártmányú pneumatikus megfogó lesz felelős a munkadarabok mozgatásáért.

8.2.1. Az áramkör megtervezése

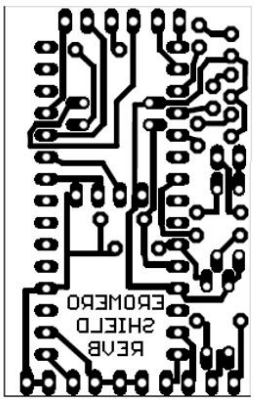
A 7. fejezetben bemutatott áramkör áttervezésére volt szükség, hogy optocsatolókkal a robot és a mikrovezérlő közti feszültségszint különbséget át lehessen hidalni prellmentesen. Az elkészült elektronikai rendszert a 8.6. ábra érzékelteti.



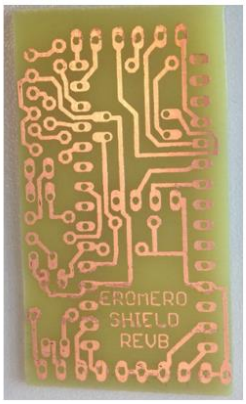
8.6. ábra: Az elektronika rendszer

A 8.7a. ábra mutatja a NYÁK tervet nyomtatás előtt. A 8.7b. ábra pedig a már maratott lapkát szemlélteti.

a)



b)



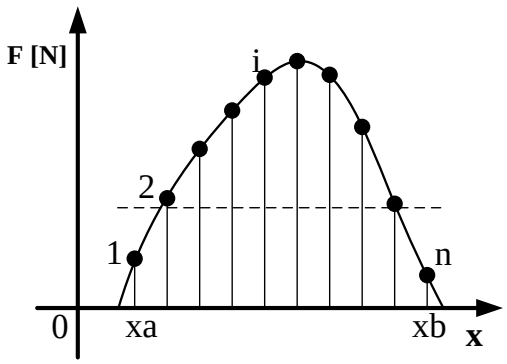
8.7. ábra: a) A NYÁK terv, b) a maratott lapka

Az elektronikához 3D-s nyomtatással burkolat is készült, amelynek anyaga PLA, rétegvastagsága 0,1 mm, kitöltése pedig 10 %. Az alkalmazott kitöltési minta pedig egyenesvonalú (rectilinear) volt.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

8.2.2. A mikrovezérlő algoritmusa

Annak érdekében, hogy a rendszer képes legyen felismerni a bepattanás jelenségét, elengedhetetlen az adott feladat jellemző erő-elmozdulás görbéjét jellemezni. Ehhez egy algoritmus megírása szükséges, amely a görbét a maximum-, átlag-, erő értékei és a meredeksége alapján vizsgálja. A szerelési folyamat megállítási pontja általában az erő-elmozdulás görbe negatív meredekségű oldalán van (lásd: 8.8. ábra), amikor az erő értéke nullához közeli.



8.8. ábra: Az átlagos erőérték (-----) meghatározása

Az átlagos szerelési erő nagysága közelítőleg is számítható a 8.8. ábra alapján:

$$\hat{F} = \frac{\int_a^b F(x)\,dx}{b-a} \cong \frac{\sum_{i=1}^{n} F_i}{n_{pont}}. \tag{8.7}$$

Az erő maximális értéke az intervallumon belül meghatározható

$$F_{max} = \max_i\{F_i \geq \delta_0\}, \tag{8.8}$$

ahol δ_0 egy nullától nagyobb előre definiált szám.

A $\tan\alpha_i$ meredekség a

$$\tan\alpha_i = \frac{F_i - F_{i-k}}{k}, \tag{8.9}$$

képlettel számítható, ahol $k \geq 1$.

Felírható az a feltétel is, amikor a mért erő nagysága egy δ_3 előre definiált erőértéktől kisebb:

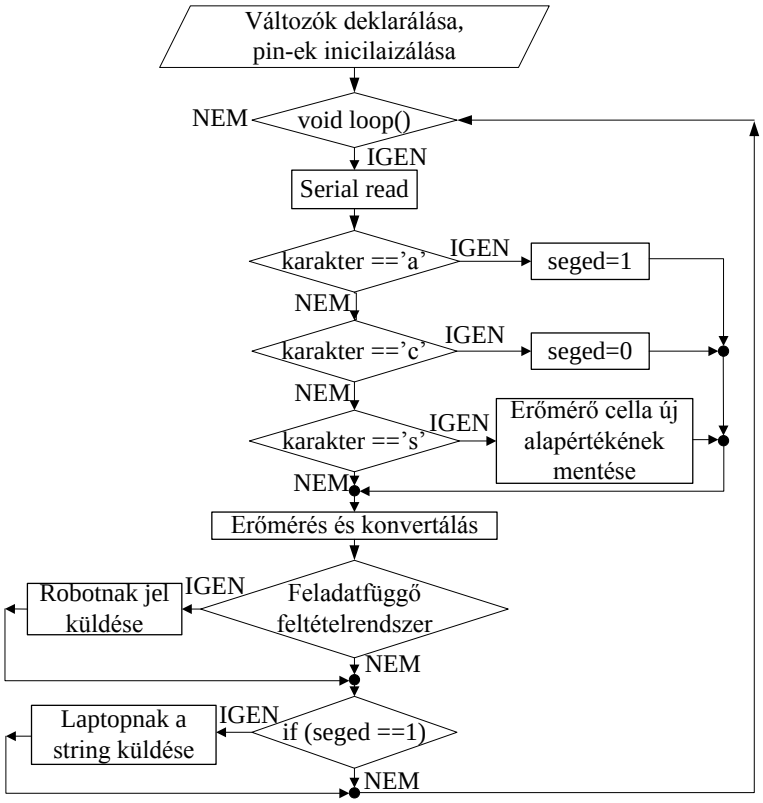
$$F_i < \delta_3. \tag{8.10}$$

DOI: 10.14750/ME.2020.011

Továbbá, az $\hat{F}_{nom}$ névleges átlagos- és az F_{max}^{nom} névleges maximális erő értékek egy korábbi méréssel meghatározhatók, majd letárolhatók a mikrovezérlőn. Az intelligens megfogó a döntést feladattól függően az alábbi feltételrendszer megfelelő használatával éri el:

$$\left\{\frac{\left|\hat{F}_{nom}-\hat{F}\right|}{\hat{F}_{nom}}<\delta_1\right\},\left\{\frac{\left|F_{max}^{nom}-F_{max}\right|}{F_{max}^{nom}}<\delta_2\right\},\{\tan\alpha_i<0\},\{F_i<\delta_3\}, \tag{8.11}$$

ahol δ_1 egy előre definiált érték. Megjegyezzük, hogy a $\delta_1-\delta_3$ értékeit az adott feladatnál nyert tapasztalatok alapján célszerű beállítani. A megfogóban található mikrovezérlő programjának folyamatábráját a 8.9. ábra szemlélteti.



8.9. ábra: A mikrovezérlőn futó program folyamatábrája

A folyamatábrában szereplő karaktereket a laptopon futó adatgyűjtő program (lásd: 7.16. ábra) küldi. A mikrovezérlőn található két olyan bemenet, amelyek lehetővé teszik a külső megszakítások használatát. Ilyen megszakítás lehet pl. a robot pozícióba állt és jelt ad, hogy a feltételrendszer figyelése aktiválódjon vagy, hogy már befejezte a mozgásokat és nullázó jelet küldjön a mikrovezérlő változóinak.

Az intelligens megfogó működése a mikrokontroller folyamatábrája szerint történik (lásd: 8.9. ábra). Az egységet a felhasználó a „Feladatfüggő feltételrendszeren” keresztül taníthatja be.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

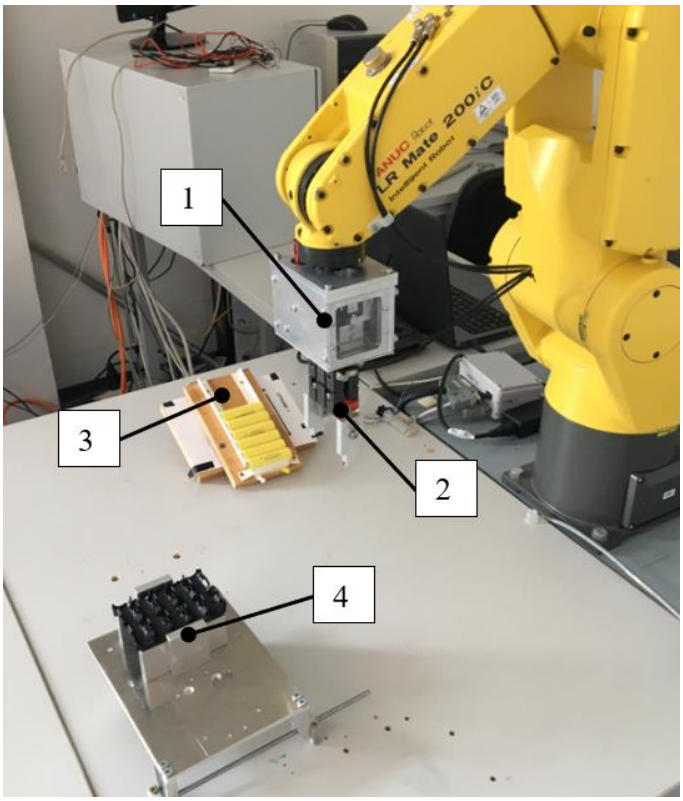
9. INTELLIGENS ROBOTMEGFOGÓ ALKALMAZÁSA SZERELÉSI FOLYAMATOKRA

Ebben a fejezetben néhány feladat kerül ismertetésre a megfogó működésének gyakorlati alkalmazhatóságának demonstrálására.

9.1. Akkumulátor cellák behelyezése

A 6. fejezetben bemutatott szerelési feladat végrehajtása az elkészült intelligens megfogóval is megvalósítható. Ebben az esetben mind az 5 akkumulátor behelyezése megtörténik.

A szerelési elrendezést mutatja a 9.1. ábra. A 3 jelű ejtő tárolóból a robot az 1 számozású intelligens megfogóval, és az arra rászerelt 2 pneumatikus megfogóval felveszi az első akkumulátort, majd behelyezi a 4 jelű műanyag cellatartóba. A cellatartón jelzett polaritások függvényében a robot az akkumulátorokat 6.2. ábrán megadott sorrendben tölti fel.

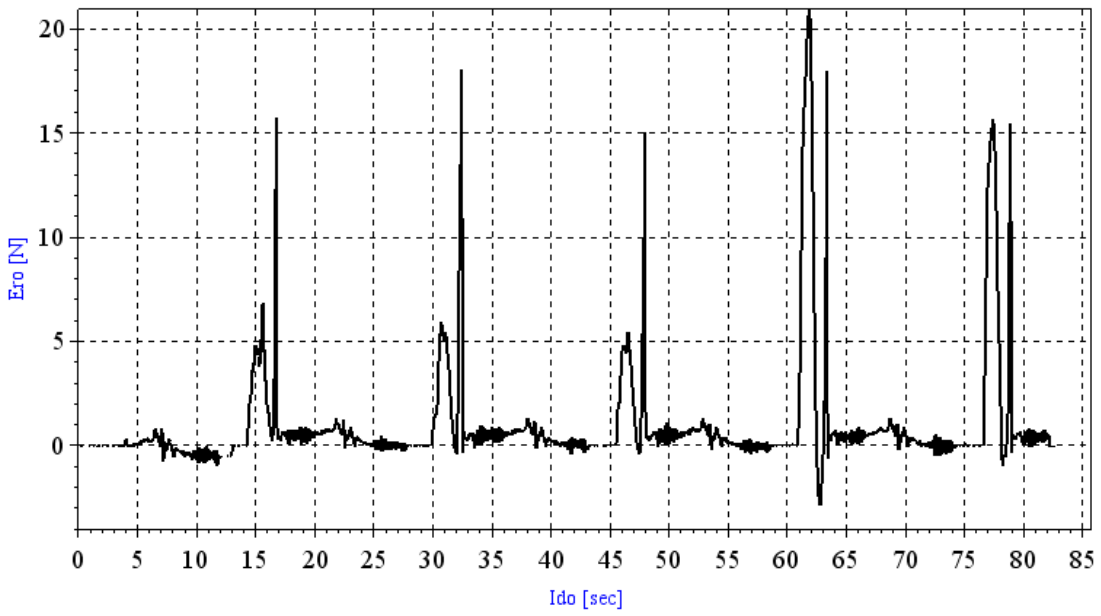


9.1. ábra: A mérési összeállítás

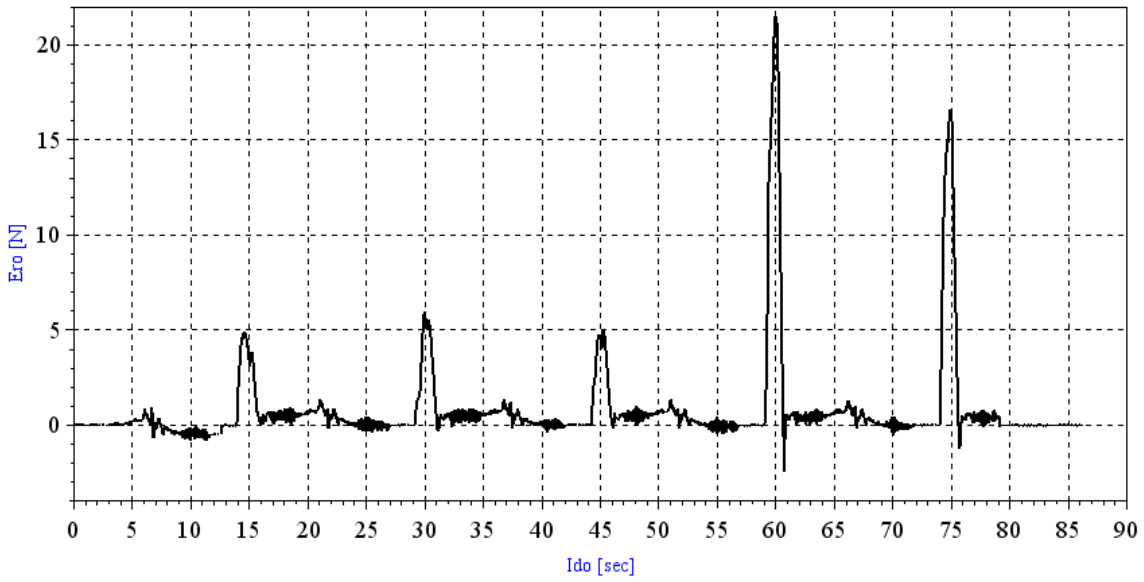
A mérések végeztével a laptopon futó mérésadatgyűjtő szoftver megjeleníti a mért erőértékeket. A 9.2. ábra először azt az esetet mutatja, amikor a megfogóban a feltételrendszer figyelése ki van kapcsolva. Jól látható, hogy a szerelés végén a túlzott előtolásból adódóan lényegesen nagyobb erők is ébredhetnek, mint a szerelés erőszükséglete. A második alkalommal a 4. táblázatban bemutatott feltételrendszer

DOI: 10.14750/ME.2020.011

alkalmazásával végrehajtott szerelésnél kapott erőket a 9.3. ábra szemlélteti. A megfogó intelligenciájának köszönhetően nem lépett fel túlterheléssel járó erőcsúcs.



9.2. ábra: A szerelés erő-visszacsatolás nélkül végrehajtva



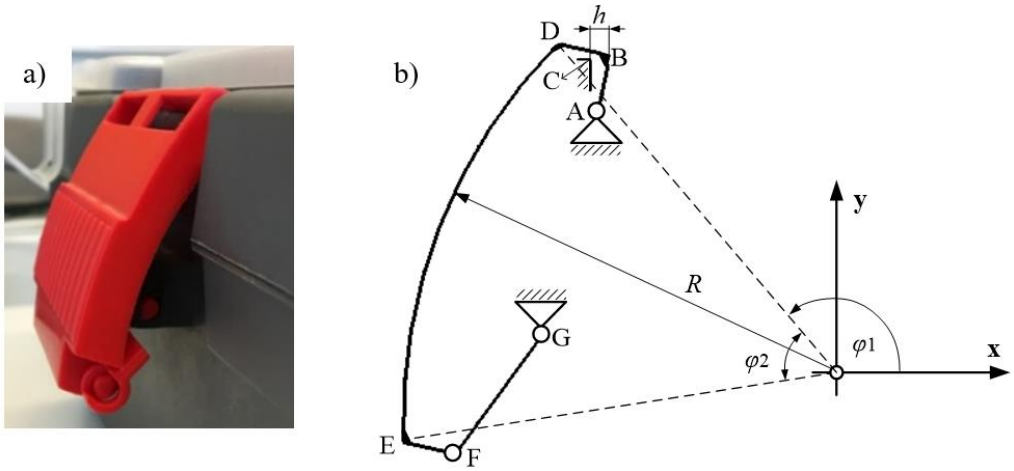
9.3. ábra: Erő-visszacsatolással történő szerelés

Megfigyelhető, hogy az utolsó két cellánál nagyobb erőre volt szükség a behelyezéshez, mivel ezen cellák melletti pozíciókban már a szomszédos akkumulátorok megtámasztják és merevebbé teszik a rugalmas cellatartó görbe íveit.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

9.2. Rugalmas csat bepattintási feladata

Egy műanyag, rugalmas csuklós szerkezet látható a 9.4a. ábrán, amelynek mechanikai modelljét a 9.4b. ábra szemlélteti. A szerkezet 3 db. csuklót tartalmaz, amelyeket A, F, G betűk mutatnak. A görbe elemnek a sugara $R_{cs} = 70\,mm$, valamint a φ_1 és φ_2 jellemző szögei radiánban rendre $2{,}35\,rad$ és $0{,}93\,rad$. A szerkezet végeselemes modellje 12 db. síkbeli egyenes rúdelemből épül fel, és 13 csomópontot tartalmaz. A merev falat reprezentáló C pontban a bepattanás előrehaladtával érintkezés lép fel, amely büntetőparaméteres technikával kerül figyelembevételre. Kezdetben a B és C pont között h hézag található.



9.4. ábra: a) A csuklós szerkezet b) A csuklós szerkezet modellje

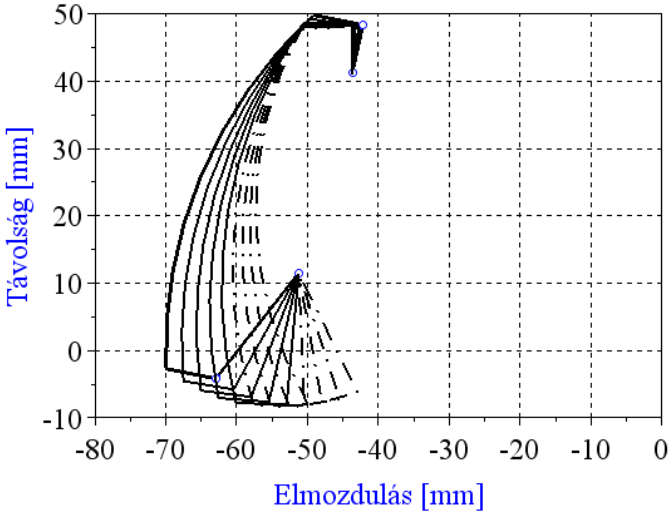
A 6.1. alfejezetben ismertetett Scilab szoftverben megírt VEM programmal modellezhető a bepattanási folyamat. A feladat megoldása során a súrlódás elhanyagolásra került.

A 9.4a. ábrán látható műanyag csat anyaga polipropilén (PP), amelynek rugalmassági modulusa $E = 1300\,MPa$. A csat három, egymástól különböző szerkezeti elemből épül fel, amelyeknek különböző geometriai jellemzőik vannak. Az első és második szerkezeti elemek keresztmetszete $A_{A-B} = A_{B-D} = 120\,mm^2$, a másodrendű tehetetlenségi nyomatékuk pedig $I_{A-B} = I_{B-D} = 40\,mm^4$. A harmadik szerkezeti elem jellemzői: $A_{D-E} = 142\,mm^2$, $I_{D-E} = 178\,mm^4$. A negyedik és ötödik rúdszakasz keresztmetszeti jellemzői pedig: $A_{E-F} = A_{F-G} = 36\,mm^2$, $I_{E-F} = I_{F-G} = 12\,mm^4$.

A (3.38) megoldása elmozdulás vezérléssel történik. Az E pont horizontális elmozdulását $\Delta u_E = 0{,}5\,mm$ egyenlő lépésközökkel összesen 40 lépésben írjuk elő. Meghatározásra került a szerkezet elmozdulása, amelyet a 9.5. ábra mutat. A szerkezet kezdeti pozícióját a vastag fekete folytonos vonal jelzi. A jobb láthatóság érdekében csak minden ötödik lépés

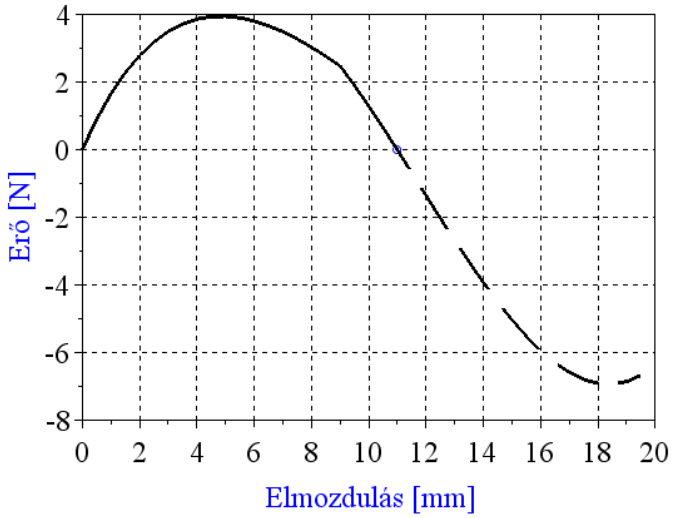
DOI: 10.14750/ME.2020.011

lett megjelenítve. A fekete vékony vonallal ábrázolt helyzetekben a szükséges szerelési erő pozitív előjelű, míg a pontvonallal jelzett helyzetekben negatív szerelési erő ébred, azaz vissza kell fogni a csatot, hogy ne pattanjon be magától.



9.5. ábra: A szerkezet elmozdulása

Az F_a szereléshez szükséges erőt a 9.6. ábra szemlélteti, ahol a pozitív erőértékeket a folytonos vonal jelöli. A szaggatott vonal pedig a negatív erőértékeket mutatja. Az átpattanást a folytonos és a szaggatott vonalak határa fogja jelölni, amely 11 mm elmozdulás közelében egy körrel lett kiemelve. A szerelési erő maximális értéke a szimuláció során 4 N-ra adódott.



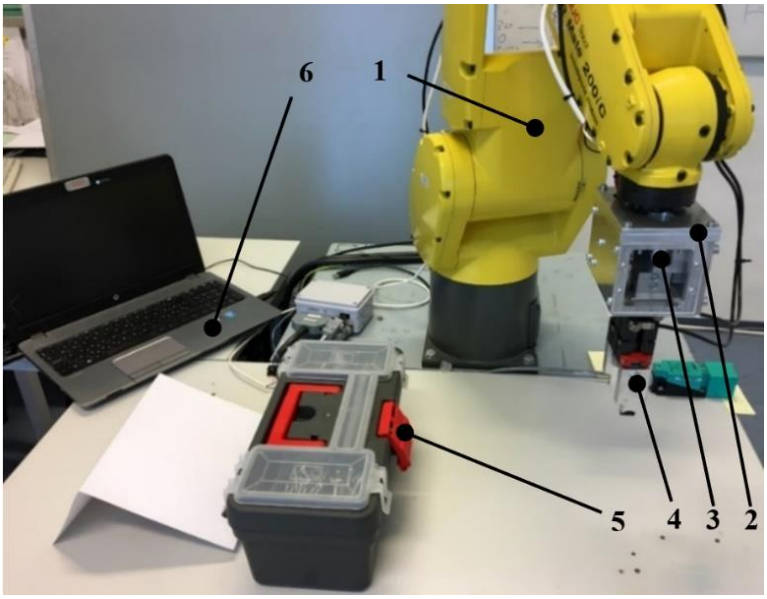
9.6. ábra: A bepattanás erő-elmozdulás diagramja

A szimuláció elvégzése mind a két geometriai merevségi mátrix előállítási módszerrel, a co-rotációs (3.16), (3.17) és a konzisztens (3.25) alkalmazásával is megtörtént. A (3.41) alatti

DOI: 10.14750/ME.2020.011

tol tolerancia értéke mind a két esetben 10^{-8} értékű volt. Az iterációs lépések száma a konzisztens módszer alkalmazásával eggyel kisebbnek bizonyult a co-rotációs módszerhez képest, vagyis a konzisztens módszer konvergenciája közel 10 %-kal jobb.

A rugalmas csuklós szerkezet bepattintásához szükséges mérési összeállítást a 9.7. ábra mutatja. A robot a folyamatot egy előre definiált alaphelyzetből kezdi, majd a rugalmas csuklós szerkezetet megközelíti, úgy, hogy a megfogó horizontális orientációba kerül. A robot küld egy jelet a digitális kimenetén a mikrovezérlőnek, hogy nullázza az erőmérő-cellát. Ezután a mikrokontroller méri az erőt. A robotprogramban megfogalmazott ciklus lépésenként 0,2 mm elmozdulást ír elő, amellyel a megfogó vízszintesen haladni fog. A megfogó előtolja a csatot és közben méri a fellépő szerelés irányú erőket. A bepattanás jelenségét a mikrovezérlő detektálni tudja a 8.2.2. alfejezetben ismertetett algoritmus segítségével. A jelenség bekövetkeztekor a mikrokontroller jelet küld a robotnak, hogy lépjen ki a ciklusból. A bepattanást követően a robot visszatér alaphelyzetébe, majd jelet küld a mikrovezérlőnek, hogy a szükséges változók kezdeti értékét beállítsa.



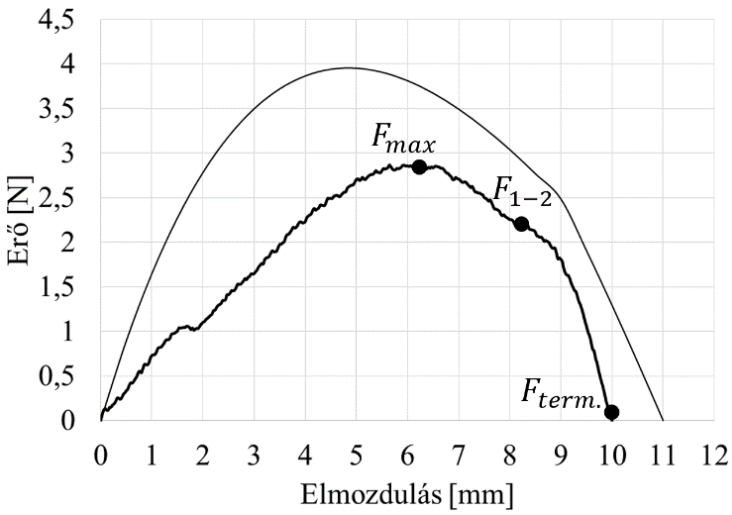
9.7. ábra: A mérési összeállítás elemei: 1-Fanuc ipari robot; 2-intelligens robotmegfogó; 3-erőmérő-cella; 4-pneumatikus megfogó; 5-műanyag rugalmas csat; 6-laptop

9.2.1. Mérési eredmények

A bepattanás mérési-, valamint szimulációs eredményét a 9.8. ábra szemlélteti. A szimulációval meghatározott erőket vékony fekete vonal mutatja, míg a mérés eredményét vastag fekete vonal szemlélteti. A mért görbét jellemző pontokat fekete körök mutatják. Az F_{max} jelöli a maximális erőt, a negatív meredekségű szakaszon tapasztalható tendencia

DOI: 10.14750/ME.2020.011

változást pedig F_{1-2} mutatja, amely a szerkezet C ponttal történő érintkezése hatására (lásd: 9.4b. ábra) tapasztalható. A roboton futó, elmozdulás növekményt előállító ciklus befejezési pontját az $F_{term.}$ jelöli. Ez a pont nullától nagyobb értékű, mivel a bepattanás nem tökéletesen kvázi-statikus, ez összhangban van a 6.2.3. alfejezet szerinti megállapítással.



9.8. ábra: A szimulációs- (——) és a mérési (∿∿) eredmények összevetése

A 9.8. ábrán látható két görbe lefutása mutat hasonlóságot, de a szimulációban használt modell merevebben viselkedik, mivel nem modellezi a valós szerkezetre jellemző hézagos csuklóillesztéseket.

9.3. Finommechanikai szerkezeti elem erő-elmozdulásának mérése

A kifejlesztett intelligens robotmegfogó nemcsak szerelési feladatokra, hanem minőségellenőrzési feladatokra is alkalmas. Szerelés, gyártás során több olyan ellenőrzési folyamat fordulhat elő, amikor a munkadarab vagy egy részösszeállítás működés közbeni erőértékének meghatározása a cél. Erre jó példa rugók, kiegyensúlyozó tömegek nyitási erőinek a mérése.

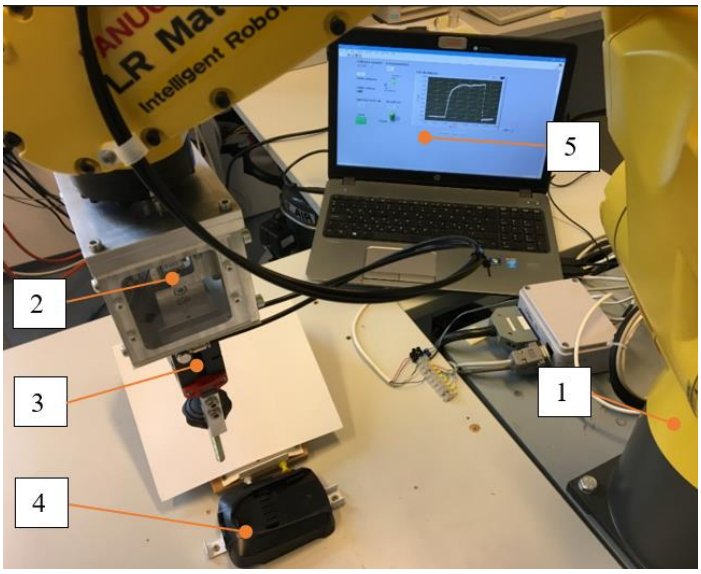
Az alfejezet egy akkumulátor pakk fedelének részösszeállításán keresztül mutatja be az erő-elmozdulás diagram felvételének lehetőségét. Ezen összeállítás tartalmaz egy műanyag fedelet, egy rugót és egy műanyag stiftet (lásd: 9.9. ábra).

A szerelési részfolyamat során először a rugó rákerül a stiftre, majd a stiftet be kell nyomni a fedélbe. A behelyezett stiften lévő nyelvet ezután rugó ellenében le lehet nyomni, hogy egy akkumulátoros fúróhoz rögzíteni lehessen a cellapakkot.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

9.9. ábra: Akkumulátorpakk fedele, a nyelv és a rugó

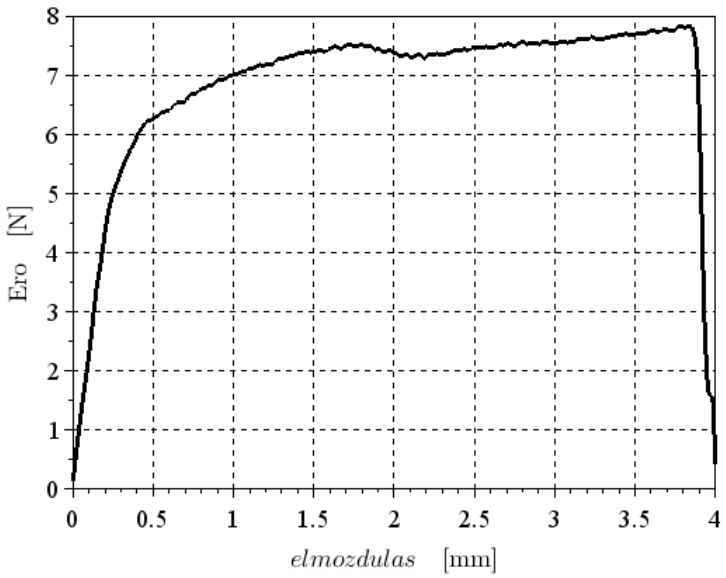
Minőségellenőrzési feladat során a nyelv lenyomási útja függvényében a rugóerő meghatározható, majd összevethető a minőségbiztosítás által előírt erőértékekkel. A mérési összeállítást a 9.10. ábrán lehet megfigyelni.



9.10. ábra: A tesztrendszer minőségellenőrzéshez: 1-Fanuc ipari robot; 2-intelligens robotmegfogó; 3-pneumatikus megfogó; 4-műanyag akkumulátor fedél; 5-laptop

A pneumatikus megfogó egy csapot tart, amellyel a nyelvet benyomja. A mikrovezérlő- és a robotprogram is tartalmaz egy biztonsági feltételt: ha a teszteléskor mérendő erő nagyobb, mint 50 N, akkor a robot abbahagyja az ellenőrzést és visszaáll alaphelyzetébe. A laptopon futó mérésadatgyűjtő program megjeleníti a mért erőértékeket és a mérés végeztével .csv fájlformátumban lementhetők. A robot alaphelyzetéből indulva a nyelv felé mozog, majd 0,1 mm növekményekkel, összesen 4 mm-rel nyomja le azt. A kapott erő-elmozdulás diagramot a 9.11. ábra szemlélteti, amely a lementett mérési fájl alapján Scilab szoftverkörnyezetben került megjelenítésre.

DOI: 10.14750/ME.2020.011



9.11. ábra: A nyelv lenyomása során kapott erő-elmozdulás diagram

Az erő-elmozdulás diagram alapján látható, hogy a nyelv működtetéséhez 7 – 8 N-ra van szükség. Kezdetben a karakterisztika 0,2 mm elmozdulásig lineáris, majd 5 N terhelés után lágyuló képet mutat a további 3,5 mm úton.

Ezen adatokat az Ipar 4.0 koncepció szerint a felhőben tárolva lehet nyomon követni a beszállító által biztosított termékek minőségi alakulását is.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az alábbiakban kerülnek megfogalmazásra azok a tézis értékű új tudományos eredmények, amelyek kidolgozása a doktori kutatómunka része volt.

T1. Bepattanás elméleti vizsgálatára egy végeselemes algoritmust fejlesztettem ki, amely a hajlékony, rugalmas szerkezeti elemeket nagy elmozdulással, kis alakváltozással modellezi. A síkbeli rudakkal modellezett szerkezeti elemek közötti érintkezést a modell részben büntetőparaméteresen, illetve kinematikai feltétel ($d = 0$) biztosításával, Coulomb súrlódás alkalmazása mellett veszi figyelembe. Az algoritmus közvetlenül szolgáltatja az érintkezési erő konzervatív- és nem konzervatív összetevőinek megfelelő irányú összetevőit a további elemzésekhez. Egy be- és kiszerelési példán keresztül méréssel igazoltam a szimulációval kapott erő-elmozdulás hiszterézis alakú zárt görbét.

Vonatkozó publikációk: [S1], [S2], [S3], [S4], [S6], [S7].

T2. Szerelési példáknál analitikusan L. Salvadori tétele segítségével meghatároztam azt az instabil egyensúlyi helyzetet, amelynél a megfogót kinyitva a szerelési folyamat autonóm módon végbemegy. Az egyensúlyi helyzet instabilitását kissebességi perturbációval numerikusan a Newmark módszer felhasználásával is ellenőriztem. Kimutattam, hogy a munkadarab kvázi-statikus behelyezésekor az instabil pont előtt megnyitva a megfogót a darab egy közbenső helyzetében beragadhat. A két megállapítást a mérési tapasztalatok is alátámasztják.

Vonatkozó publikációk: [S7], [S10].

T3. Elméletileg megmutattam, hogy a rugalmas bepattanással járó szerelési folyamatok dinamikusan történő végrehajtásakor a robot megfogója hamarabb is nyitható, mint a stabilitásvesztéssel járó egyensúlyi helyzet. Egy közelítő algoritmust dolgoztam ki a nyitási helyzet numerikus meghatározására, amely azon alapszik, hogy a kezdeti sebességgel rendelkező munkadarab kinetikus energiája képes fedezni a függőleges irányú támasztóerőkből származó súrlódási munka és az alakváltozási energia növekményt. Ennek jelentősége a szerelési ciklusidő rövidítésében jelentkezhet.

Vonatkozó publikáció: [S10].

DOI: 10.14750/ME.2020.011

T4. Egy erőmérő cellát tartalmazó, célirányos intelligens robotmegfogót fejlesztettem ki, amellyel a bepattanással járó, kvázi-statikus vagy dinamikus szerelési folyamatok végezhetők el, összhangban a T2, illetve a T3 tézisekkel. A csak szerelés irányú erők mérését két rugalmas lemezből álló párhuzamos mechanizmus biztosítja. A megfogó intelligenciáját adó központi egysége egy mikrokontroller, amely adott feladathoz- és a megfogó előírt sebességéhez alkalmasan választott feltételrendszer alapján képes a munkadarab elengedési pontját, azaz a megfogó nyitásának TCP helyzetét megadni a robot számára.

Vonatkozó publikációk: [S5], [S8], [S9], [S11], [S12].

DOI: 10.14750/ME.2020.011

ÖSSZEFOGLALÁS

A doktori disszertáció robotok heptikus tulajdonságának fejlesztésével foglalkozott, amely gyártási- és szerelési folyamatok intelligens végrehajtását teszi lehetővé. Az értekezés elején áttekintettem a rendelkezésemre álló szakirodalmat a heptikus visszacsatolásról, bepattanásra alkalmas műanyag elemekről, nemlineáris végeselemes mechanikai feladatok leírásának módjairól, mechanikai rendszerek stabilitásvizsgálatáról, amelyek tartalmazhatnak konzervatív vagy nem konzervatív erőket is. Továbbá, az irodalomkutatásban kitértem az erőmérőkre, valamint a különböző robotmegfogókra és intelligens alkalmazásukra.

A doktori munka során az egyik célkitűzésem a pillanatnyi stabilitásvesztéssel járó, emberi erővel, kézzel végzett szerelési folyamatok modellezése és átültetése robotos rendszerekre.

Az iparban gyakran alkalmazott bepattanásra alkalmas műanyag elemek szerelésének végeselemes modellezésére algoritmust dolgoztam ki, amellyel szimulációkat végeztem. Ezen alkatrészek a szerelés során nagy elmozdulást, nagy szögelfordulást és kis alakváltozást szenvednek el. A co-rotációs módszerrel az ilyen természetű feladatok jól kezelhetők. A szerelendő alkatrészek között gyakran érintkezés lép fel, amelynek figyelembevételét a kinematikai feltétellel és büntetőparaméteres technikával biztosítottam. Coulomb súrlódás feltételezésével meghatároztam a beszereléshez és a kiszereléshez szükséges erő-elmozdulás diagramokat.

A szerelésekor tapasztalható pillanatnyi stabilitásvesztések érdekében stabilitásvizsgálatot is végeztem analitikusan és numerikusan egyaránt. A disszipatív erőket, mint pl. a súrlódást tartalmazó összeszerelés Salvadori által kidolgozott tétel alapján vizsgálható volt. Nagy sebességgel történő szerelésnél egy olyan numerikus módszert javasoltam, amely képes meghatározni egy akkumulátor műanyag cellatartóba történő dinamikus behelyezésekor a robotmegfogó nyitásának stabilitásvesztés előtti helyzetét. A szerelési folyamat végrehajtásakor a munkadarab mozgási energiája képes fedezni az alakváltozási energia és a súrlódásból származó munka növekményt.

A stabilitásvesztéssel járó szerelésekre kifejlesztettem egy intelligens megfogót. A tervezési folyamat során két tervváltozatot is elkészítettem, amelyek képesek biztosítani az erőmérő cellának a csak szerelés irányú erő mérését. Az egyszerűbb változat műhelyrajzait elkészítettem, amelyek alapján az egység alkatrészeit a közreműködésemmel a

DOI: 10.14750/ME.2020.011

Szerszámgépek Intézeti Tanszékének-, illetve az Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézetnek a műhelyében legyártották. Továbbá, megterveztem és elkészítettem a megfogóhoz tartozó, intelligenciát szolgáltató elektronikai rendszert. Az erőmérő által szolgáltatott analóg információt egy HX711 típusú A/D konverter digitalizálja, majd egy Arduino fejlesztői platformon helyet kapott ATmega 328 típusú mikrokontroller skálázza és küldi a személyi számítógépnek.

A megfogó összeszerelése, elektronikai rendszerének behelyezése és kalibrálása után tesztméréseket végeztem. Egy gyakorlati feladat megoldásához szükség van az intelligens megfogó betanítására, amely egy próbamérésből áll, hogy meghatározzuk a bepattanásra jellemző erő-elmozdulás diagramot, annak paramétereit (F_{max}^{nom}, $\hat{F}_{nom}$, stb.), illetve nevezetes pontjait. A mikrokontroller programjában az adott feladatra össze kell állítani a megfogó nyitására alkalmas vezérlő feltételrendszert. Több olyan robottal elvégezhető folyamatot mutattam be a kutatómunka során, amelyeknél a kifejlesztett intelligens megfogót az iparban is alkalmazni lehet.

A jövőbeni tervek között szerepel a bepattanással járó szerelési folyamatok dinamikai modellezése és szimulációja. Bepattanáson kívül más ipari heptikus feladatok vizsgálata és robottal történő végrehajtása. Továbbá, a golyóskocsit tartalmazó másik megfogó konstrukció megépítésével összehasonlító mérések elvégzésére is lehetőség fog nyílni.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

SUMMARY

The doctoral dissertation was dealt with the development of haptic properties of robots, enabling intelligent execution of manufacturing and assembly processes. At the beginning of the dissertation I reviewed the available literature on haptic feedback, snap-fit plastic elements, nonlinear finite element methods for mechanical problems, and the stability analysis of mechanical systems, which may include conservative or non-conservative forces. Furthermore, in literature research force sensors have been discussed also various robot end-effectors and their intelligent applications.

One of the goals of the doctoral thesis is to model and execute human-hand-assembled operations with robot systems, which may include the loss of stability.

I have developed an algorithm for finite element modeling of assembly of snap-fit plastic elements. Using the models, I performed simulations. Snap-fit elements are subject to large displacements, large rotations and small deformations during assembly. These structures can be treated with the corotational method. There is often contact between the components of the structure. Kinematic condition and the penalty parameter technique are used to treat the mechanical contact problems assuming Coulomb friction. I determined the load-deflection diagrams of snap-in and snap-out process of a battery.

In order to obtain the loss of stability during assembly, I performed analytical and numerical stability analyses. Problems containing dissipative forces, e.g., friction could be investigated by the basis of theorem Salvadori. For high-speed assembling, I proposed a numerical method that can determine the position of the robotic end-effector opening before loss of stability, when dynamically inserting a battery into a plastic cell holder. During the assembly process, the kinetic energy of the workpiece can cover the increment of deformation energy and friction work.

I have developed an intelligent end-effector to handle snap-fit assembly operations. I have designed two variants of the end-effector that measures only forces in direction of the assembly. The technical drawings of the simpler version have been manufactured in the Department of Machine Tools and the Institute of Material Science and Technology. In addition, I designed and built the electronic system of the end-effector. The analogue information provided by the load cell is digitized by an HX711 A/D converter and scaled

DOI: 10.14750/ME.2020.011

and sent to a personal computer by an ATmega 328 microcontroller based on an Arduino development platform.

After the end-effector was assembled, the electronic system was built-in and calibrated, I performed test measurements. To solve a practical problem, the user needs to train the intelligent end-effector, which consists of a premeasurement to determine the load-deflection diagram, its parameters (F_{max}^{nom}, $\hat{F}_{nom}$, etc.) and its characteristic points. In the program of the microcontroller, the control conditions suitable for the opening of the end-effector must be set up for the given task. In the course of my research I have introduced several robotic processes, where the developed intelligent end-effector can be applied in the industry.

My plans in the future include dynamic modeling and simulation of snap-in assembly processes. Furthermore, investigating and performing different haptic assembling operations. The other end-effector construction, which will contain a linear guide rail system will be designed and manufactured to make comparative measurements.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Elsőként szeretnék köszönetet mondani Dr. Szabó Tamás egyetemi docensnek, intézeti tanszékvezetőnek, aki sok építőjellegű megjegyzést, segítséget nyújtott a 4 éves doktori képzésem során, és akivel számos közös publikációt készíthettem. A mechatronika iránti szeretetemet neki köszönhetem, hiszen már alapszakos hallgató korom óta foglalkozott velem, ráterelt a tudományos élet végtelen útjára.

Köszönet illeti még a Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszék munkatársait, különösképpen Lénárt József tanársegédet, az informatikai jellegű szakmai támogatásáért.

Külön szeretném megköszönni Dr. Gál Gaszton címzetes egyetemi docensnek, aki az intelligens robotmegfogó tervezése-, illetve az elkészítése során nyújtott segítséget.

A doktori munkám során felmerülő gyártási feladatok vonatkozásában szeretném köszönetemet kifejezni a Szerszámgépek Intézeti Tanszékének, különösképpen Boncsér Mártonnak és Kinszki Gábornak, akik a szükséges munkadarabokat legyártották számomra.

Ezúton szeretném megköszönni az akkori Kandó Kálmán Szakközépiskola tanárainak, akik szilárd alapot adtak a kezembe az egyetemi tanulmányaim megkezdéséhez.

És végül, de nem utolsó sorban szeretnék köszönetet mondani szüleimnek, akik mindvégig, minden tekintetben támogattak a doktori pályám során.

A disszertációban ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

IRODALOMJEGYZÉK

[1] A. ROJKO: Industry 4.0 Concept: Background and Overview, *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, Vol. 11, No. 5, 2017, pp. 77–90.

[2] M. XU, J. M. DAVID, S. H. KIM: The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges, *International Journal of Financial Research*, Vol. 9, No. 2, 2018, pp. 90–95.

[3] B. P. SANTOS, F. CHARRUA-SANTOS T. M. LIMA: Industry 4.0: An Overview, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, UK, 2018, pp. 1–6.

[4] M. A. SRINIVASAN: What is Haptics, *Laboratory for Human and Machine Haptics*, The Touch Lab MIT, 2005, pp. 1–11.

[5] E. S. ABDULMOTALEB, O. MAURICIO, E. MOHAMAD, C. JONGEUN: Haptic Technologies, Bringing Touch to Multimedia, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2011

[6] B. S. HOMBERG, R. K. KATZSCHMANN, M. R. DOGAR, D. RUS: Haptic Identification of Objects using a Modular Soft Robotic Gripper, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2015, pp. 1698–1705.

[7] V. J. GOHIL, DR. S. D. BHAGWAT, A. P. RAUT, P. R. NIRMAL: Robotics Arm Control Using Haptic Technology, *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, Vol 2, 2013, pp. 98–102.

[8] C. HATZFELD, A. T. KERN: Engineering Haptic Devices, A Beginner's Guide, Second Edition, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2009

[9] VDI-RICHTLINIEN: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, *Verein Deutscher Ingenieure*, 2004

[10] R. M. KSHIRSAGARL, D. B. PAWAR: Design and Analysis of Snap Fit Joint in Plastic Part, *International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering*, 2015, pp. 83–87.

[11] C. KLAHN, D. SINGER, M. MEBOLDT: Design Guidelines for Additive Manufactured Snap-Fit Joints, *Procedia CIRP 50*, Vol 75, 2016, pp. 264–269.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

[12] BAYER MATERIALSCIENCE LLC: Snap-Fit Joints for Plastics, A design Guide, *Bayer Polycarbonates Business Unit*, Pittsburg, Pennsylvania, 1998

[13] B. BADER, R. KOCH: Numerical simulation (FEM) of snap-in and snap-out processes of ball snap-fits, *Computational Materials Science 3*, 1994, pp. 125–134.

[14] L. RUSLI, A. LUSCHER, C. SOMMERICH: Force and tactile feedback in preloaded cantilever snap-fits under manual assembly, *Elsevier, Int. J. of Industrial Ergonomics*, 2010, pp. 618–628.

[15] G. ERHARD: Designing with Plastics, ISBN 3-446-22590-0, Hanser, 2006

[16] BASF CORPORATION: Snap-Fit Design Manual (www.plasticsportal.com/usa), 2007

[17] F. PFEIFFER: Assembly processes with robotic systems, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 19, 1996, pp. 151–166.

[18] SUMIRIN, NUROJI, S. BESARI: Snap-Through Buckling Problem of Spherical Shell Structure, *International Journal of Science and Engineering*, Vol 8(1), 2015

[19] J. ZHAO, J. JIA, X. HE, H. WANG: Post-buckling and Snap-Through Behavior of Inclined Slender Beams, *J. Appl. Mech.*, Vol. 75, 2008, pp. 041020(1–7).

[20] E. RIKS: An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 15, Issue 7, 1979, pp. 529–551.

[21] R. H. PLAUT, L. N. VIRGIN: Snap-through under unilateral displacement control with constant velocity, *Elsevier, International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2017, pp. 292–299.

[22] J. JI, K.-M. LEE, S. ZHANG: Cantilever Snap-Fit Performance Analysis for Haptic Evaluation, *ASME J. Mech. Design*, Vol 133, 2011, pp. 121004(1–8).

[23] K.-J. BATHE, H. OZDEMIR: Elastic-plastic large deformation static and dynamic analysis, *Computers & Structures*, Vol. 6, Issue 2, 1976, pp. 81–92.

[24] P. NANAKORN, L. N. VU: A 2D field-consistent beam element for large displacement analysis using the total Lagrangian formulation, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 42, Issue14–15, 2006, pp. 1240–1247.

[25] L. L. Yaw: 2D Corotational Beam Formulation, *Walla Walla University*, USA, 2009

DOI: 10.14750/ME.2020.011

[26] M. A. CRISFIELD: Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, *John Wiley and Sons*, 1991

[27] R. M. DE SOUZA: Force-based Finite Element for Large Displacement Inelastic Analysis of Frames, *dissertation*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, 2000

[28] ROUCHE N., HABETS P., LALOY M.: Stability Theory by Liapunovs Direct method, *Springer-Verlag*, New York, 1977

[29] ROUCHE N., HABETS P., LALOY M.: A Ljapunov-féle direkt módszer (fordította: Szervánszky György), *Műszaki könyvkiadó*, Budapest, 1984

[30] J.-P. ORTEGA, TUDOR S. RATIU: A Dirichlet criterion for the stability of periodic and relative periodic orbits in Hamiltonian systems, *Journal of Geometry and Physics*, 1999, pp. 131–159.

[31] P. C. PARKS: A. M. Lyapunov's stability theory—100 years on, *Journal of Mathematical Control & Information*, Vol. 9, 1992, pp. 275–303.

[32] M. SABRA, B. KHASAWNEH, M. A. ZOHDY: Nonlinear Control of Interior PMSM Using Control Lyapunov Functions, *Journal of Power and Energy Engineering*, Vol. 2, 2014, pp. 17–26.

[33] BOUDAOUD M., REGNIER S.: An Overview on Gripping Force Measurement at the Micro and Nano-scales Using Two-fingered Microrobotic Systems, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 11, Issue 3, 2013, pp. 1–15.

[34] BYRNE G., O'DONNELL G. E.: An Integrated Force Sensor Solution for Process Monitoring of Drilling Operations, *CIRP Annals*, Vol. 56, Issue 1, 2007, pp. 89–92.

[35] F. VECCHI, C. FRESCHI, S. MICERA, A. M. SABATINI, P. DARIO, R. SACCHETTI: Experimental Evaluation of Two Commercial Force Sensors for Applications in Biomechanics and Motor Control, *in Annual Conf. of the Int. Functional Electrical Stimulation Society*, Denmark, 2000

[36] J. TAKAHASHI, T. FUKUKAWA, T. FUKUDA: Passive Alignment Principle for Robotic Assembly Between a Ring and a Shaft with Extremely Narrow Clearance, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 21, 2016, pp. 196–204.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

[37] D. HÉRIBAN, M. GAUTHIER: Robotic Micro-assembly of Microparts Using a Piezogripper, *IROS, IEEE/RSJ International Conference*, Nice, France, 2008, pp. 4042–4047.

[38] A. WAHRBURG, S. ZEISS, B. MATTHIAS, J. PETERS, H. DING: Combined Pose-Wrench and State Machine Representation for Modeling Robotic Assembly Skills, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Hamburg, Germany, 2015, pp. 852–857.

[39] G. BOOTHROYD: Use of Robots in Assembly Automation, *CIRP Annals*, Vol. 33, Issue 2, 1984, pp. 475–485.

[40] SCHUNK: SCHUNK Grippers, product overview, SCHUNK GmbH & Co. KG, 2016

[41] K. TELEGENOV, Y. TLEGENOV, A. SHINTEMIROV: A Low-Cost Open Source 3-D Printed Three-Finger Gripper Platform for Research and Educational Purposes, *IEEE*, Vol. 3, 2015, pp. 638–647.

[42] M. RADI, G. REINHART: Industrial Haptic Robot Guidance System for Assembly Processes, *IEEE Conference*, Lecco, Italy, 2009, pp.1–6.

[43] C. REN, Y. GONG, F. JIA, X. WANG: Theoretical analysis of a six-axis force/torque sensor with overload protection for polishing robot, *23rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, IEEE*, Nanjing, China, 2016, pp. 1–6.

[44] Y. KURITA, F. SUGIHARA, J. UEDA, T. OGASAWARA: Piezoelectric Tweezer-Type End Effector with Force- and Displacement-Sensing Capability, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 17, No. 6, 2012, pp. 1039-1048.

[45] J. LOSKE, R. BIESENBACH: Force-torque sensor integration in industrial robot control, *15th International Workshop on Research and Education in Mechatronics, IEEE*, El Gouna, Egypt, 2014, pp. 1–5.

[46] A. ZAPCIU, G. CONSTANTIN: Additive Manufacturing Integration of Thermoplastic Conductive Materials in Intelligent Robotic End Effector Systems, *Proceedings in Manufacturing Systems*, Vol. 11, 2016 pp. 201–206.

[47] J. LIU, P. LI, Z. LI: A Multi-Sensory End-Effector for Spherical Fruit Harvesting Robot, *International Conference on Automation and Logistics, IEEE*, Jinan, China, 2007, pp. 258–262.

DOI: 10.14750/ME.2020.011

[48] M. SUZUKI, K. MASAMUNE, L-JONG JI, T. DOHI, H. YANO: Development of a robot arm controlled by force sensors as a walking aid for elderly, *Robotica*, Vol. 16, Cambridge University Press, 1998, pp. 537–542.

[49] T. VITTOR, H. STAAB, S. BREISCH, S. SOETEBIER, T. STAHL, A. HACKBARTH, S. KOCK: A Flexible Robotic Gripper for Automation of Assembly Tasks, *in Proc. IEEE Int. Symp. Assembly Manuf.*, 2011, pp. 1–6.

[50] G. ZENG, A. HEMAMI: An overview of robot force control, *Robotica*, Vol. 15, Cambridge University Press, 1997, pp. 473–482.

[51] E. FREUND, J. PESARA: High-bandwidth force and impedance control for industrial robots, *Robotica*, Vol. 16, Cambridge University Press, 1998, pp. 75–87.

[52] K. SUH CHIN, M. MARAN RATNAM, R. MANDAVA: Force-guided robot in automated assembly of mobile phone, *Assembly Automation*, Vol. 23, Issue:1, 2003, pp. 75–86.

[53] S. JÖRG, J. LANGWALD, J. STELTER, G. HIRZINGER, C. NATALE: Flexible Robot-Assembly using a Multi-Sensory Approach, *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2000, pp. 3687–3694.

[54] R. CARELLI, E. OLIVA, C. SORIA, O. NASISI: Combined force and visual control of an industrial robot, *Robotica*, Vol. 22, Cambridge University Press, 2004, pp. 163–171

[55] W. S. NEWMAN, M. S. BRANICKY, H. A. PODGURSKI, S. CHHATPAR, L. HUANG, J. SWAMINATHAN, H. ZHANG: Force-Responsive Robotic Assembly of Transmission Components, *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 1999, pp. 2096–2102.

[56] W. HASKIYA, K. MAYCOCK, J. KNIGHT: Robotic assembly: Chamferless peg-hole assembly, *Robotica*, Vol. 17, Cambridge University Press, 1999, pp. 621–634.

[57] K. J. BATHE: Finite Element Procedures, *Prentice Hall*, Upper Saddle River, New Jersey, 1996

[58] W. MCGUIRE, R. H. GALLAGHER, R. D. ZIEMIAN: Matrix structural analysis, Second Edition, *John Wiley and Sons*, Printed in USA, 2000

DOI: 10.14750/ME.2020.011

[59] PÁCZELT I.: Végeselem-módszer a mérnöki gyakorlatban I. kötet, *Miskolci Egyetemi Kiadó*, 1999

[60] A. SIGNORINI: Sopra akune questioni di elastostatica. *Ph.D. thesis*, Atti della Societa Italiana per il Progresso delle Scienze, 1933

[61] BÉDA GY., KOZÁK I.: Rugalmas testek mechanikája, *Műszaki könyvkiadó*, Budapest, 1987

[62] S. ANDERSSON, A. SÖDERBERG, S. BJÖRKLUND: Friction models for sliding dry, boundary and mixed lubricated contacts, *Elsevier Ltd., Tribology International*, 2005, pp. 580–587.

[63] Y. F. LIU, Z. M. ZHANG, X. H. HU, W. J. ZHANG: Experimental comparison of five friction models on the same test-bed of the micro stick-slip motion system, *Mech. Sci.*, Vol. 6, 2015, pp. 15–28.

[64] B. DRINČIĆ: Mechanical Models of Friction That Exhibit Hysteresis, Stick-Slip, and the Stribeck Effect, *dissertation*, University of Michigan, 2012

[65] H. SCHIESSEL, R: METZLER, A. BLUMEN, T. F. NONNENMACHER: Generalized viscoelastic models: their fractional equations with solutions, *J. Phys. A: Math Gen.*, Vol. 28, 1995, pp. 6567–6584.

[66] A. ENRIQUE, LÓPEZ-GUERRA S. D. SOLARES: Modeling viscoelasticity through spring–dashpot models in intermittent-contact atomic force microscopy, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, Vol. 5, 2014, pp. 2149–2163.

[67] D. ROYLANCE: Engineering Viscoelasticity, *Massachusetts Institute of Technology*, 2001, pp. 1–37.

[68] B. DUNN: Load Cells (Introduction and Applications), BD Tech Concepts LLC, 2016

[69] J. M. CIMBALA: Stress, Strain, and Strain Gages, *Penn State University*, 2013

[70] J. MANOJLOVIĆ, P. JANKOVIĆ: Bridge Measuring Circuits in the Strain Gauge Sensor Configuration, *Facta Universitatis/Mechanical Engineering*, Vol. 11, 2013, pp. 75–84.

[71] DATASHEET: 3133 – Micro Load Cell (0-5 kg) – CZL635, 2012

[72] VPG TRANSCUDERS: Load Cell Technology, Technical Note VPGT-01, 2015

DOI: 10.14750/ME.2020.011

[73] M. VAHIDI, V. JAFARI, M. H. ABYANEH, S. H. VAHDANI: Displacement Field Approximations for Force-Based Elements in Large Displacement Analyses, *Journal of Applied Mathematics*, Hindawi Publishing Corp., 2012, pp. 1–11.

[74] FANUC ROBOT SERIES: R-30iA Mate Controller, LR Handling Tool – Operator's Manual, FANUC Robotics America Inc., 2008

[75] RÓNAI L.: Mechatronikai laboratóriumok, *oktatási segédlet*, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2017

[76] ATMEL: 8-bit AVR Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes In-System Programmable Flash, *datasheet*, Rev. 8025I–AVR–02/09, 2009

[77] N. ZLATANOV: Arduino and Open Source Computer Hardware and Software, *ResearchGate*, pp.1–7.

[78] W. M. SPONG, S. HUTCHINSON, M. VIDYASAGAR: Robot Modelling and Control, *Wiley*, 2006

DOI: 10.14750/ME.2020.011

DISSZERTÁCIÓHOZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

[S1] RÓNAI L., SZABÓ T.: Geometrically Nonlinear Modeling of a Snap Fitting Process, *Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering*, Debrecen, 2016, pp. 430–435., ISBN 978-963-473-944-9

[S2] RÓNAI L., SZABÓ T.: Molex 39-01-2040 típusú csatlakozó bepattanásának modellezése, *XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia, OGÉT*, Kolozsvár, Románia, 2017, pp. 352–355., ISSN 2068-1267

[S3] RÓNAI L.: Elektromos kapcsoló mechanizmus átpattanási jelenségének modellezése, *Doktoranduszok Fóruma 2016*, Miskolci Egyetem, 2017, pp. 79–84.

[S4] RÓNAI L.: Számítógépes mérés erőmérő-cellával, *Doktoranduszok Fóruma 2017*, Miskolci Egyetem, 2018, pp. 91–96.

[S5] RÓNAI L., SZABÓ T.: Designing of Robotic Double-function Fingertips, *Design of Machines and Structures*, Vol. 7., No. 2, 2018, pp. 13–19., HU ISSN 2064-7522

[S6] RÓNAI L.: Erőmérő-cella terhelési eseteinek vizsgálata, *Doktoranduszok Fóruma 2018*, Miskolci Egyetem, 2019, pp. 79–84.

[S7] RÓNAI L., SZABÓ T.: Snap-fit Assembly Process with Industrial Robot Including Force Feedback, *Robotica*, Cambridge University Press, 2020, pp. 317–336. doi:10.1017/S0263574719000614, (**Q2, IF.:1.184**)

[S8] RÓNAI L.: Design Aspects of a Robotic End-effector, *Design of Machines and Structures*, Vol. 8., No. 2, 2019, pp. 52–58., HU ISSN 2064-7522

[S9] RÓNAI L., SZABÓ T.: Modeling and Robotic Handling of a Snap-Fitting Box Buckle, *Pollack Periodica*, Akadémiai kiadó, 2020, pp. 1–12. (cikk elfogadva, megjelenés alatt), **Q3**

[S10] RÓNAI L., SZABÓ T.: Stability Analysis of an Assembly Process Using Simulation, *Acta Technica Jaurinensis*, Vol. 13, No. 1, 2020, pp. 14–24., doi: 10.14513/actatechjaur.v13.n1.531.

[S11] RÓNAI L.: Intelligens robotmegfogó elektronikai rendszerének tervezése, *Doktoranduszok Fóruma 2019*, Miskolci Egyetem, 2020 (megjelenés alatt)

[S12] RÓNAI L., SZABÓ T.: Intelligens robotmegfogó fejlesztése, *Multidiszciplináris tudományok*, Miskolci Egyetem, 2020, pp.1–6. (megjelenés alatt)

DOI: 10.14750/ME.2020.011

ÁBRAJEGYZÉK

2.1. ábra: A gépi heptikus visszacsatolás egy példája 4
2.2. ábra: Hagyományos rögzítő fül részei 5
2.3. ábra: a) L alakú-, b) U alakú műanyag rögzítő fülek 6
2.4. ábra: Rögzítő elemek csoportosítása 6
3.1. ábra: Egy rúdelem kezdeti és pillanatnyi konfigurációja 10
3.2. ábra: Rugalmas rúd érintkezése merev felülettel 16
4.1. ábra: Súrlódási erő a csúszási sebesség függvényében 20
4.2. ábra: A Voigt-Kelvin viszkoelasztikus modell 21
5.1. ábra: A teljes hidas mérőcella kapcsolása és a bélyegek elhelyezkedése 22
5.2. ábra: A terhelések egyes esetei 24
5.3. ábra: Az erőmérő cella megfogási peremfeltétele 25
5.4. ábra: Az erőmérő εy megnyúlása 200 N terhelésnél 25
5.5. ábra: A névleges terhelés során kapott elmozdulás mm-ben 26
5.6. ábra: A tiszta húzás 26
5.7. ábra: A húzás eredményei 27
5.8. ábra: A tiszta hajlítás esete 27
5.9. ábra: A tiszta hajlításra kapott eredmények 28
6.1. ábra: Lítium ionos akkumulátorpakk szerelése 29
6.2. ábra: Az akkumulátorok behelyezésének sorrendje 29
6.3. ábra: a) A cella- és a cellatartó 2D-s modellje, b) a kinematikai érintkezési feladat ... 30
6.4. ábra: A szimulációs folyamat 32
6.5. ábra: Az akkumulátor behelyezésének és kivételének szimulációja 32
6.6. ábra: Szabadtest ábra alig behelyezett pozíció a) pozitív-, b) negatív sebesség 33
6.7. ábra: Szabadtest ábra majdnem behelyezett helyzet a) pozitív-, b) negatív sebesség .. 33
6.8. ábra: A merevségi együttható meghatározása 34
6.9. ábra: Az egyensúlyi pontok definiálása 35
6.10. ábra: a) Az A és B pontokban az elmozdulások, b) sebességek 40
6.11. ábra: a) A C pontban az elmozdulások, b) sebességek 40
6.12. ábra: Erő-elmozdulás diagram az akkumulátor behelyezésekor 41
6.13. ábra: A belső erő numerikus integrálja 42
6.14. ábra: Beszerelés és kiszerelés erőszükséglete (—— mérés; ---- szimuláció) 43
7.1. ábra: A szerelést elvégző robot 44

DOI: 10.14750/ME.2020.011

7.2. ábra: A robotvezérlő egység ... 45
7.3. ábra: Arduino Nano fejlesztői platform ... 45
7.4. ábra: Arduino IDE fejlesztőkörnyezet ... 46
7.5. ábra: A HX711 modul ... 46
7.6. ábra: Akkumulátortartó rögzítő szerkezete ... 47
7.7. ábra: A rögzítő szerkezet fényképe ... 47
7.8. ábra: a) A tartókonzol 3D-s modellje, b) legyártva ... 47
7.9. ábra: A mérés blokkvázlata ... 48
7.10. ábra: A saját készítésű NYÁK kapcsolása ... 49
7.11. ábra: A NYÁK terv és az összeszerelt elektronikai rendszer ... 49
7.12. ábra: Az elkészült mérőrendszer, (1) robot, (2) Schunk megfogó, (3) akkumulátorok, (4) akkumulátor tartó, (5) akkumulátor tartó rögzítő állvány, (6) mérőcella, (7) elektronika, (8) relék, (9) személyi számítógép ... 50
7.13. ábra: A behelyezési folyamat ... 52
7.14. ábra: A kiértékelő program felhasználói felülete ... 53
7.15. ábra: A program folyamatábrája ... 54
7.16. ábra: A kifejlesztett mérésadatgyűjtő program részlete ... 54
7.17. ábra: a) Erő-visszacsatolás nélküli eset, b) erő-visszacsatolással történő szerelés ... 55
8.1. ábra: A lineáris vezetéket tartalmazó modell ... 57
8.2. ábra: A két párhuzamos rugalmas lemezt tartalmazó megfogó változat terve ... 58
8.3. ábra: A támasztó lemez mechanikai modellje ... 58
8.4. ábra: A túlterhelési védelmet megvalósító elem ... 60
8.5. ábra: Az elkészült és összeszerelt intelligens megfogó ... 60
8.6. ábra: Az elektronika rendszer ... 61
8.7. ábra: a) A NYÁK terv, b) a maratott lapka ... 61
8.8. ábra: Az átlagos erőérték (-----) meghatározása ... 62
8.9. ábra: A mikrovezérlőn futó program folyamatábrája ... 63
9.1. ábra: A mérési összeállítás ... 64
9.2. ábra: A szerelés erő-visszacsatolás nélkül végrehajtva ... 65
9.3. ábra: Erő-visszacsatolással történő szerelés ... 65
9.4. ábra: a) A csuklós szerkezet b) A csuklós szerkezet modellje ... 66
9.5. ábra: A szerkezet elmozdulása ... 67
9.6. ábra: A bepattanás erő-elmozdulás diagramja ... 67

DOI: 10.14750/ME.2020.011

9.7. ábra: A mérési összeállítás elemei: 1-Fanuc ipari robot; 2-intelligens robotmegfogó; 3-erőmérő-cella; 4-pneumatikus megfogó; 5-műanyag rugalmas csat; 6-laptop 68
9.8. ábra: A szimulációs- (——) és a mérési (〰) eredmények összevetése 69
9.9. ábra: Akkumulátorpakk fedele, a nyelv és a rugó 70
9.10. ábra: A tesztrendszer minőségellenőrzéshez: 1-Fanuc ipari robot; 2-intelligens robotmegfogó; 3-pneumatikus megfogó; 4-műanyag akkumulátor fedél; 5-laptop..... 70
9.11. ábra: A nyelv lenyomása során kapott erő-elmozdulás diagram 71

DOI: 10.14750/ME.2020.011

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat: A mérőcella adatai 24
2. táblázat: Szimulációhoz szükséges adatok 31
3. táblázat: Az akkumulátor behelyezéséhez megírt szubrutin..... 50
4. táblázat: A stabilitás határát jelző pont megkeresésének algoritmusa..... 51
5. táblázat: Az acéllemezek tulajdonságai 59