



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCATRONICA

**PROGETTAZIONE DI UN ROBOT MOBILE A ZAMPE ARTICOLATE (KLANN E
STRANDBEEST)**

Relatore: Boscariol Paolo

Beltrame Mattia Samuele
Molinarolo Matteo
Russo Nicolò

Sommario

Introduzione.....	4
ANALISI DI POSIZIONE E VELOCITA' PER IL MECCANISMO KLANN	5
Analisi di posizione.....	5
Parametri del Meccanismo	5
Maglia 1	6
Maglia 2	6
Maglia 3	7
Posizione e fase di tutti i vettori del meccanismo.....	8
Analisi di velocità	8
Maglia 1 - velocità.....	8
Maglia 2 - velocità.....	9
SOFTWARE MATLAB PER IL MECCANISMO KLANN.....	10
Codice	10
Traccia punto H	13
Esportazione dati su excel	13
SOFTWARE SOLIDWORKS PER IL MECCANISMO KLANN.....	16
Progetto 1	16
Progetto 2	16
Progetto 3	17
Progetto 4	18
ANALISI DI POSIZIONE E VELOCITA' PER IL MECCANISMO STRANDBEEST	20
Analisi di posizione.....	20
Parametri del Meccanismo	20
Maglia 1	21
Maglia 2	22
Maglia 3	22
Maglia 4	23
Maglia 5	23
Posizione e fase di tutti i vettori del meccanismo.....	24
Analisi di velocità	25
Maglia 1 - velocità.....	25
Maglia 2 - velocità.....	25

Maglia 3 - velocità.....	26
Maglia 4-velocità.....	27
Maglia 5-velocità.....	27
SOFTWARE MATLAB PER IL MECCANISMO STRANDBEEST	29
Codice	29
Traccia punto H	33
Esportazione dati su excel	33

Introduzione

Nell'ambito della robotica, i robot mobili con zampe articolate rappresentano una categoria affascinante e promettente, con potenziali applicazioni in diversi settori. Questi dispositivi si distinguono per la loro capacità di muoversi su terreni accidentati e irregolari, adattandosi a superfici che risulterebbero ostiche per i tradizionali robot con ruote o cingoli.

Lo scopo di questo progetto è quello di ideare, progettare e realizzare un robot mobile dotato di zampe articolate, sfruttando i principi dei meccanismi articolati piani. Esempi di robot con questa tipologia di zampe includono il Klann e lo Strandbeest, che hanno dimostrato notevoli capacità di movimento e adattamento.

ANALISI DI POSIZIONE E VELOCITA' PER IL MECCANISMO KLANN

Analisi di posizione

Si riporta l'analisi di posizione del meccanismo articolato klann, l'analisi è stata eseguita a partire dallo schema della Figura 1.

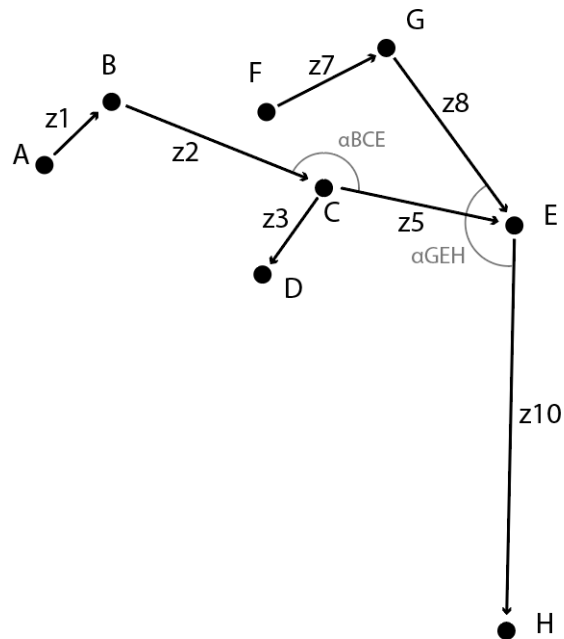


Figura 1

Parametri del Meccanismo

I seguenti parametri sono stati utilizzati per lo studio del meccanismo:

Lunghezze delle braccia:

AB = 11 cm

BC = 28 cm

CD = 13 cm

CE = 23 cm

FG = 17 cm

GE = 26 cm

EH = 49 cm

Angoli fissi (in gradi):

$\alpha_{BCE} = 170^\circ = 2.96706$ rad

$\alpha_{GEH} = 160^\circ = 2.792527$ rad

Punti a telaio:

A = [0 cm , 0 cm]

$$D = [26 \text{ cm} , -13 \text{ cm}]$$

$$F = [26 \text{ cm} , 6 \text{ cm}]$$

Maglia 1

L'equazione di posizione del meccanismo Klann è stata calcolata utilizzando il metodo delle triadi RRR e le relative formule trigonometriche, partendo da un angolo $\varphi_1 = \alpha = \pi/4$ rad.

La maglia 1 utilizzata è riportata in Figura 2:

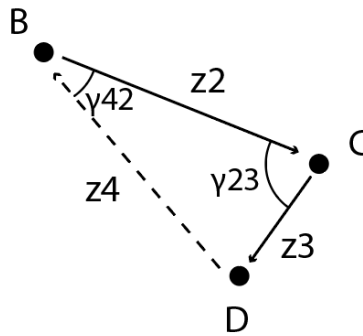


Figura 2

$$B = [AB \cdot \cos(\alpha) , AB \cdot \sin(\alpha)] = [7.7782 \text{ cm} , 7.7782 \text{ cm}]$$

Lunghezza e fase del vettore z4:

$$BD = z_4 = \sqrt{(X_B - X_D)^2 + (Y_B - Y_D)^2} = 27.6363 \text{ cm}$$

$$\varphi_4 = \tan^{-1}((Y_B - Y_D) / (X_B - X_D)) + \pi = 2.29074 \text{ rad}$$

Angoli interni:

$$\gamma_{24} = \cos^{-1}((z_2^2 + z_4^2 - z_3^2) / (2 \cdot z_2 \cdot z_4)) = 0.4715 \text{ rad}$$

$$\gamma_{23} = \cos^{-1}((z_2^2 + z_3^2 - z_4^2) / (2 \cdot z_2 \cdot z_3)) = 1.3078 \text{ rad}$$

Fasi dei vettori z2 e z3:

$$\varphi_2 = \varphi_4 - \pi + \gamma_{24} = -0.37935 \text{ rad}$$

$$\varphi_3 = \varphi_2 + \pi + \gamma_{23} = 4.07008 \text{ rad}$$

Maglia 2

La maglia 2 utilizzata è riportata in Figura 3:

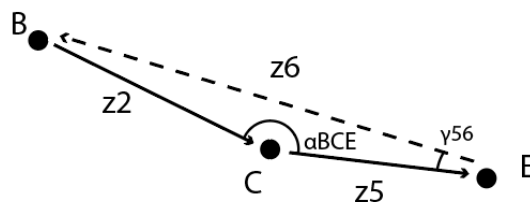


Figura 3

Lunghezza del vettore z6:

$$EB = z_6 = \sqrt{(z_2^2 + z_5^2 - (2 * z_2 * z_5 * \cos(\alpha_{BCE})))} = 50.8078 \text{ cm}$$

Angolo interno :

$$\gamma_{56} = \sin^{-1}(\sin(\alpha_{BCE}) * z_2 / z_6) = 0.095844 \text{ rad}$$

Fasi dei vettori z5 e z6:

$$\varphi_5 = \varphi_2 + \pi - \alpha_{BCE} = -0.204817 \text{ rad}$$

$$\varphi_6 = \varphi_5 + \pi - \gamma_{56} = 2.840932 \text{ rad}$$

Maglia 3

La maglia 3 utilizzata è riportata in Figura 4:

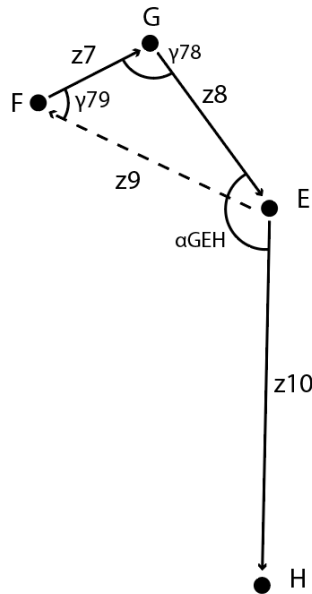


Figura 4

$$E = [X_B - z_6 * \cos(\varphi_6), Y_B - z_6 * \sin(\varphi_6)] = [56.3068 \text{ cm}, -7.2686 \text{ cm}]$$

Lunghezza e fase del vettore z9:

$$EF = z_9 = \sqrt{((X_F - X_E)^2 + (Y_F - Y_E)^2)} = 33.084 \text{ cm}$$

$$\varphi_4 = \tan^{-1}((Y_F - Y_E) / (X_F - X_E)) + \pi = 2.728923 \text{ rad}$$

Angoli interni:

$$\gamma_{78} = \cos^{-1}((z_7^2 + z_8^2 - z_9^2) / (2 * z_7 * z_8)) = 1.717877 \text{ rad}$$

$$\gamma_{79} = \cos^{-1}((z_7^2 + z_9^2 - z_8^2) / (2 * z_7 * z_9)) = 0.890511 \text{ rad}$$

Fasi dei vettori z7, z8 e z10:

$$\varphi_7 = \varphi_9 - \pi + \gamma_{79} = 0.47784 \text{ rad}$$

$$\varphi_8 = \varphi_7 - \pi + \gamma_{78} = -0.94587 \text{ rad}$$

$$\varphi_{10} = \varphi_8 - \pi + \alpha_{GEH} = -1.29494 \text{ rad}$$

Posizione e fase di tutti i vettori del meccanismo

$z_1 = 11 \text{ cm}$	$\varphi_1 = \pi/4 \text{ rad}$
$z_2 = 28 \text{ cm}$	$\varphi_2 = -0.37935 \text{ rad}$
$z_3 = 13 \text{ cm}$	$\varphi_3 = 4.07008 \text{ rad}$
$z_5 = 23 \text{ cm}$	$\varphi_5 = -0.204817 \text{ rad}$
$z_7 = 17 \text{ cm}$	$\varphi_7 = 0.47784 \text{ rad}$
$z_8 = 26 \text{ cm}$	$\varphi_8 = -1.240038 \text{ rad}$
$z_{10} = 49 \text{ cm}$	$\varphi_{10} = -1.5891 \text{ rad}$

Analisi di velocità

Per l'analisi di velocità del meccanismo sono stati usati i risultati dell'analisi di posizione e una velocità $v\varphi_1 = 1 \text{ rad/s}$.

Maglia 1 - velocità

La maglia 1 utilizzata per l'analisi di velocità è riportata in Figura 5:

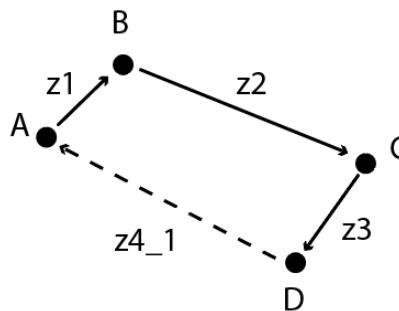


Figura 5

Equazione di chiusura: (il vettore z_{4-1} è fisso perchè a telaio, quindi ha velocità nulla)

$$vz_1 + vz_2 + vz_3 = 0$$

Risoluzione attraverso il calcolo matriciale:

$$\begin{bmatrix} -z_2 \sin \varphi_2 & -z_3 \sin \varphi_3 \\ z_2 \cos \varphi_2 & z_3 \cos \varphi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v\varphi_2 \\ v\varphi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \sin \varphi_1 \\ -z_1 \cos \varphi_1 \end{bmatrix} * v\varphi_1$$

Velocità dei vettori:

$$V\varphi_2 = 0.05801 \text{ rad/s}$$

$$V\varphi_3 = -0.8050 \text{ rad/s}$$

Inoltre, essendo fisso l'angolo tra z_2 e z_5 , ne consegue che la velocità del vettore z_2 è uguale alla velocità del vettore z_5 . Pertanto:

$$V\varphi_5 = 0.05801 \text{ rad/s}$$

Maglia 2 - velocità

La maglia 2 utilizzata per l'analisi di velocità è riportata in Figura 6:

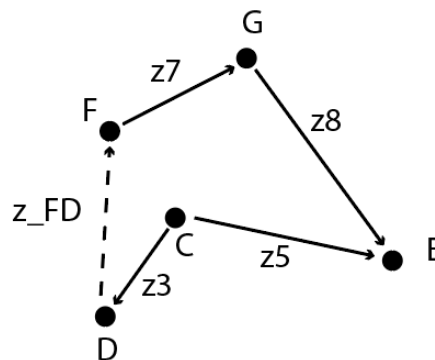


Figura 6

Equazione di chiusura: (il vettore z_{F-D} è fisso perchè a telaio, quindi ha velocità nulla)

$$vz_7 + vz_8 - vz_5 + vz_3 = 0$$

Risoluzione attraverso il calcolo matriciale:

$$\begin{bmatrix} -z_7 \sin \varphi_7 & -z_8 \sin \varphi_8 \\ z_7 \cos \varphi_7 & z_8 \cos \varphi_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v\varphi_7 \\ v\varphi_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z_5 \sin \varphi_5 & z_3 \sin \varphi_3 \\ z_5 \cos \varphi_5 & -z_3 \cos \varphi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v\varphi_5 \\ v\varphi_3 \end{bmatrix}$$

Velocità dei vettori:

$$V\varphi_7 = -0.04644 \text{ rad/s}$$

$$V\varphi_8 = 0.2198 \text{ rad/s}$$

Inoltre, essendo fisso l'angolo tra z_8 e z_{10} , ne consegue che la velocità del vettore z_8 è uguale alla velocità del vettore z_{10} .

Quindi otteniamo: $V\varphi_{10} = 0.2198 \text{ rad/s}$

SOFTWARE MATLAB PER IL MECCANISMO KLANN

Codice

Si riporta lo script Matlab che permette l'analisi di posizione e velocità del meccanismo klann, con rappresentazione di un giro completo della manovella AB ed esportazione su excel dei dati:

```
clear all;
close all;

%lunghezza braccia
z_AB = 11;
z_BC = 28;
z_CD = 13;
z_CE = 23;
z_FG = 17;
z_GE = 26;
z_EH = 49;

%Sono angoli fissi all'interno del meccanismo
alpha_BCE = 2.96706;
alpha_GEH = 2.792527;

%coordinata libera del meccanismo
phi_AB = 0:pi/40:2*pi;
v_phi_AB = -1;

for i = 1:length(phi_AB)

    %punti a telaio
    Ax(i) = 0;
    Ay(i) = 0;
    Fx(i) = 26;
    Fy(i) = 6;
    Dx(i) = 26;
    Dy(i) = -13;

    %punti che si muovono
    Bx(i) = z_AB*cos(phi_AB(i));
    By(i) = z_AB*sin(phi_AB(i));

%MAGLIA 1
    z_DB(i) = sqrt((Bx(i)-Dx(i))^2 + (By(i)-Dy(i))^2);
    phi_DB(i) = atan((By(i)-Dy(i))/(Bx(i)-Dx(i)));
    if Bx(i)<Dx(i)
        phi_DB(i) = atan((By(i)-Dy(i))/(Bx(i)-Dx(i))) + pi;
    end
    %angoli interni
    alpha_DBC(i) = acos((z_BC^2 + z_DB(i)^2 - z_CD^2)/(2*z_BC*z_DB(i)));
    alpha_BCD(i) = acos((z_BC^2 + z_CD^2 - z_DB(i)^2)/(2*z_BC*z_CD));
    %fasi dei vettori BC,CD
    phi_BC(i) = phi_DB(i) - pi + alpha_DBC(i);
    phi_CD(i) = phi_BC(i) + pi + alpha_BCD(i);

    %punti che si muovono
```

```

Cx(i) = Bx(i) + z_BC*cos(phi_BC(i));
Cy(i) = By(i) + z_BC*sin(phi_BC(i));

%MAGLIA 2
z_EB(i) = sqrt(z_BC^2 + z_CE^2 - (2*z_BC*z_CE*cos(alpha_BCE)))
%angoli interni
alpha_CEB(i) = asin((sin(alpha_BCE)*z_BC) / z_EB(i));
%fasi dei vettori CE,EB
phi_CE(i) = phi_BC(i) + pi - alpha_BCE;
phi_EB(i) = phi_CE(i) + pi - alpha_CEB(i);
%punti che si muovono
Ex(i) = Cx(i) + z_CE*cos(phi_CE(i));
Ey(i) = Cy(i) + z_CE*sin(phi_CE(i));

%-----
plot( [Ax(i) Bx(i)], [Ay(i) By(i)], [Bx(i) Cx(i)], [By(i) Cy(i)], [Cx(i) Dx(i)], [Cy(i) Dy(i)],
[Cx(i) Ex(i)], [Cy(i) Ey(i)], 'LineWidth', 3);
%-----

%MAGLIA 3
z_EF(i) = sqrt((Fx(i)-Ex(i))^2 + (Fy(i)-Ey(i))^2);
phi_EF(i) = atan((Fy(i)-Ey(i))/(Fx(i)-Ex(i)));
if Fx(i) < Ex(i)
    phi_EF(i) = atan((Fy(i)-Ey(i))/(Fx(i)-Ex(i))) + pi;
end
%angoli interni
alpha_EFG(i) = acos((z_FG^2 + z_EF(i)^2 - z_GE^2)/(2*z_FG*z_EF(i)));
alpha_FGE(i) = acos((z_FG^2 + z_GE^2 - z_EF(i)^2)/(2*z_FG*z_GE));

%fasi dei vettori FG,GE,EH
phi_FG(i) = phi_EF(i) - pi + alpha_EFG(i);
phi_GE(i) = phi_FG(i) - pi + alpha_FGE(i);
phi_EH(i) = phi_GE(i) -pi + alpha_GEH;

%punti che si muovono
Gx(i) = Fx(i) + z_FG*cos(phi_FG(i));
Gy(i) = Fy(i) + z_FG*sin(phi_FG(i));

Hx(i) = Ex(i) + z_EH*cos(phi_EH(i));
Hy(i) = Ey(i) + z_EH*sin(phi_EH(i));

%GRAFICO
hold on;
plot([Fx(i) Gx(i)], [Fy(i) Gy(i)], [Gx(i) Ex(i)], [Gy(i) Ey(i)], 'LineWidth', 3);
plot( [Ex(i) Hx(i)], [Ey(i) Hy(i)], 'LineWidth',3);
grid on;
axis ( [-20 100 -80 30]);
drawnow;
hold off;

plot(Hx(1:i), Hy(1:i), 'r-', 'LineWidth', 3);
hold on;

%-----
%-----
%
ANALISI DI VELOCITA

```

```

% x= matrice incognite
% J = Jacobiana
% f = matrice termini noti
% M = matrice delle velocità

%MAGLIA 1
J1 = [-z_BC*sin(phi_BC(i)) , -z_CD*sin(phi_CD(i)) ; z_BC*cos(phi_BC(i)) , z_CD*cos(phi_CD(i))];
f1 = [z_AB*sin(phi_AB(i)) ; -z_AB*cos(phi_AB(i))];
M1 = [v_phi_AB];
%x1 = [v_phi_BC(i) ; v_phi_CD(i)];
%x1 = (eye(2) - inv(J1)*J1)\(inv(J1)*M1*f1);
x1 = inv(J1)*(M1*f1);
v_phi_BC(i) = x1(1);
v_phi_CD(i) = x1(2);
v_phi_CE(i) = v_phi_BC(i)

vBx(i) = -f1(1)*v_phi_AB;
vBy(i) = -f1(2)*v_phi_AB;
vCx(i) = vBx(i) + (J1(1,1)*v_phi_BC(i));
vCy(i) = vBy(i) + (J1(2,1)*v_phi_BC(i));

%MAGLIA 2
J2 = [-z_FG*sin(phi_FG(i)) , -z_GE*sin(phi_GE(i)) ; z_FG*cos(phi_FG(i)) , z_GE*cos(phi_GE(i))];
f2 = [-z_CE*sin(phi_CE(i)) , z_CD*sin(phi_CD(i)) ; z_CE*cos(phi_CE(i)) , -z_CD*cos(phi_CD(i))];
M2 = [v_phi_CE ; v_phi_CD];
%x2 = [v_phi_FG(i) ; v_phi_GE(i)];
%x2 = (eye(2) - inv(J2)*J2)\(inv(J2)*M2*f2(:,1));
x2 = inv(J2)*f2*M2;
v_phi_FG(i) = x2(1);
v_phi_GE(i) = x2(2);
v_phi_EH(i) = v_phi_GE(i)

vEx(i) = vCx(i) + (f2(1,1)*v_phi_CE(i));
vEy(i) = vCy(i) + (f2(2,1)*v_phi_CE(i));
vGx(i) = (J2(1,1)*v_phi_FG(i));
vGy(i) = (J2(2,1)*v_phi_FG(i));
vHx(i) = vEx(i) + ((-z_EH*sin(phi_EH(i)))*v_phi_EH(i));
vHy(i) = vEy(i) + ((z_EH*cos(phi_EH(i)))*v_phi_EH(i));

%-----
-----

end
%esportazione dati in excel
fasi = table( phi_AB', phi_BC', phi_CD', phi_CE', phi_FG', phi_GE', phi_EH', 'VariableNames',
{'phi_AB', 'phi_BC', 'phi_CD', 'phi_CE', 'phi_FG', 'phi_GE', 'phi_EH'});
writetable ( fasi, 'Punti_meccanismo_klann.xlsx', 'Sheet', 'fasi_vettori');
coordinate_punti = table(phi_AB', Bx', By', Cx', Cy', Ex', Ey', Gx', Gy', Hx', Hy',
'VariableNames', {'phi_AB', 'Bx', 'By', 'Cx', 'Cy', 'Ex', 'Ey', 'Gx', 'Gy', 'Hx', 'Hy'});
writetable ( coordinate_punti, 'Punti_meccanismo_klann.xlsx', 'Sheet', 'coordinate_punti');
velocita = table( v_phi_BC', v_phi_CD', v_phi_CE', v_phi_FG', v_phi_GE', v_phi_EH',
'VariableNames', { 'v_phi_BC', 'v_phi_CD', 'v_phi_CE', 'v_phi_FG', 'v_phi_GE', 'v_phi_EH'});
writetable ( velocita, 'Punti_meccanismo_klann.xlsx', 'Sheet', 'velocita');
velocita_coordinate_punti = table( vBx', vBy', vCx', vCy', vEx', vEy', vGx', vGy', vHx', vHy',
'VariableNames', {'vBx', 'vBy', 'vCx', 'vCy', 'vEx', 'vEy', 'vGx', 'vGy', 'vHx', 'vHy'});
writetable ( velocita_coordinate_punti, 'Punti_meccanismo_klann.xlsx', 'Sheet',
'velocita_coordinate_punti');

```

Traccia punto H

Si riporta in figura 7 l'immagine relativa alla traccia del punto H, ovvero il punto del meccanismo che tocca terra e che permette il movimento del robot.

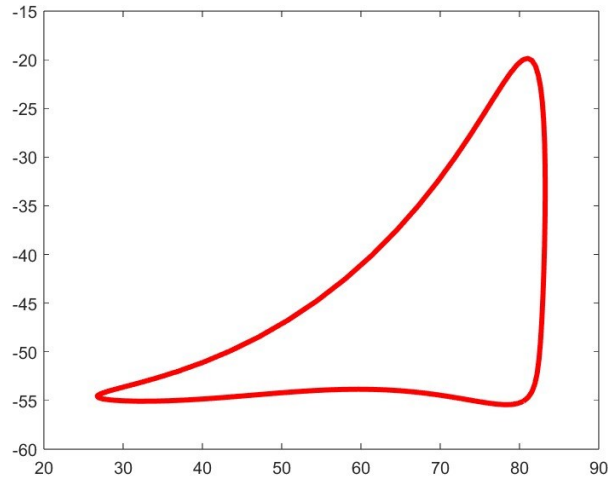


Figura 7

Esportazione dati su excel

La verifica dei risultati delle analisi di posizione e di velocità è stata eseguita tramite l'esportazione dell'analisi di Matlab su un file excel. In quest'ultimo sono stati scritti tramite software i seguenti parametri:

- fasi dei vettori in rad (Figura 8)
- coordinate dei punti in cm (Figura 9)
- velocità dei vettori in rad/s (Figura 10)
- velocità dei punti in rad/s (Figura 11)

per un giro completo della manovella AB a scatti di $\pi/40$.

La riga 12 rappresenta l'angolo scelto di $\pi/4$ della manovella AB.

	A	B	C	D	E	F	G
1	phi_AB	phi_BC	phi_CD	phi_CE	phi_FG	phi_GE	phi_EH
2	0	-0,281127594	3,55577194	-0,10659494	0,152236857	-0,807877886	-1,156943539
3	0,078539816	-0,298954977	3,58833961	-0,124422323	0,162040745	-0,818352696	-1,16741835
4	0,157079633	-0,314044139	3,62751981	-0,139511485	0,180825521	-0,829891121	-1,178956775
5	0,235619449	-0,326885618	3,67206542	-0,152352965	0,206642417	-0,842342279	-1,191407932
6	0,314159265	-0,33788133	3,72096605	-0,163348676	0,237846734	-0,85554953	-1,204615184
7	0,392699082	-0,347355328	3,7734114	-0,172822675	0,273087808	-0,869382378	-1,218448032
8	0,471238898	-0,355566885	3,82875346	-0,181034232	0,311270079	-0,883747573	-1,232813226
9	0,549778714	-0,362722877	3,88647289	-0,188190224	0,351505323	-0,898589172	-1,247654826
10	0,628318531	-0,368988374	3,94615117	-0,194455721	0,393066725	-0,91388402	-1,262949674
11	0,706858347	-0,374495245	4,00744832	-0,199962591	0,435349195	-0,929636129	-1,278701783
12	0,785398163	-0,379348941	4,07008535	-0,204816288	0,477836878	-0,94587152	-1,294937173
13	0,86393798	-0,383633765	4,13383063	-0,209101111	0,52007729	-0,962634027	-1,311699681
14	0,942477796	-0,387416901	4,19848908	-0,212884247	0,561660971	-0,97998207	-1,329047723
15	1,021017612	-0,390751475	4,26389376	-0,216218821	0,602205582	-0,997986174	-1,347051827
16	1,099557429	-0,393678825	4,32989899	-0,219146172	0,64134355	-1,016726962	-1,365792616
17	1,178097245	-0,396230149	4,39637481	-0,221697496	0,678712657	-1,036293277	-1,385358931
18	1,256637061	-0,398427622	4,46320217	-0,223894968	0,713949278	-1,056780076	-1,405845729
19	1,335176878	-0,400285054	4,53026869	-0,2257524	0,746684263	-1,078285685	-1,427351338
20	1,413716694	-0,401808123	4,59746466	-0,227275469	0,776541819	-1,100907917	-1,449973571

Figura 8

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	phi_AB	Bx	By	Cx	Cy	Ex	Ey	Gx	Gy	Hx	Hy
2	0	11	0	37,9008099	-7,768296276	60,770265	-10,21533967	42,8033837	8,57804144	80,4751168	-55,0786745
3	0,078539816	10,96609067	0,863050053	37,7241449	-7,383557446	60,5463439	-10,23789293	42,7773017	8,7426534	79,7801884	-55,3051674
4	0,157079633	10,86457175	1,720779115	37,4951502	-6,928630892	60,2716832	-10,12699623	42,7228246	9,05730883	78,9842535	-55,4131941
5	0,235619449	10,69606912	2,567899002	37,2133837	-6,422764489	59,9469682	-9,913342471	42,6383305	9,48797348	78,0942369	-55,4290171
6	0,314159265	10,46162168	3,399186938	36,8784764	-5,882503913	59,572306	-9,622837782	42,5214085	10,005379	77,1168726	-55,3742114
7	0,392699082	10,16267486	4,209517756	36,4904107	-5,322026044	59,1477864	-9,277190142	42,3700257	10,5850037	76,0578229	-55,2668702
8	0,471238898	9,801071766	4,993895497	36,049652	-4,753516231	58,6737862	-8,894597228	42,183071	11,2065548	74,9214499	-55,1224397
9	0,549778714	9,379041808	5,747484212	35,5571982	-4,187510964	58,1511198	-8,490382669	41,9605431	11,8532951	73,7109242	-54,9542664
10	0,628318531	8,899186938	6,465637775	35,0145822	-3,633180488	57,5811009	-8,077528964	41,7035592	12,5113921	72,428455	-54,7739536
11	0,706858347	8,364465622	7,143928532	34,4238523	-3,098549981	56,9655545	-7,667101338	41,4142882	13,1693599	71,0755298	-54,5916002
12	0,785398163	7,778174593	7,778174593	33,7875406	-2,590667121	56,306803	-7,268574809	41,0958594	13,8176101	69,6531147	-54,4159604
13	0,86393798	7,143928532	8,364465622	33,1086273	-2,115726109	55,607639	-6,890081623	40,7522731	14,4481026	68,1618043	-54,2545507
14	0,942477796	6,465637775	8,899186938	32,3905028	-1,679157555	54,8712916	-6,538595528	40,3883182	15,0540764	66,6019282	-54,1137168
15	1,021017612	5,747484212	9,379041808	31,6369309	-1,285692091	54,1013906	-6,220066759	40,0095001	15,6298446	64,9736248	-53,9986658
16	1,099557429	4,993895497	9,801071766	30,8520119	-0,939403811	53,3019307	-5,939518588	39,6219754	16,1706335	63,2768995	-53,9134698
17	1,178097245	4,209517756	10,16267486	30,0401476	-0,643738132	52,4772364	-5,701113596	39,2324863	16,6724555	61,5116824	-53,8610429
18	1,256637061	3,399186938	10,46162168	29,2060076	-0,401527275	51,6319288	-5,508195376	38,8482888	17,1320022	59,6779052	-53,8430923
19	1,335176878	2,567899002	10,69606912	28,3544976	-0,214995469	50,7708949	-5,363309354	38,4770646	17,5465518	57,7756194	-53,8600498
20	1,413716694	1,720779115	10,86457175	27,4907296	-0,085754942	49,8992595	-5,26820456	38,1268029	17,9138848	55,8051808	-53,910985

Figura 9

	A	B	C	D	E	F
1	v_phi_BC	v_phi_CD	v_phi_CE	v_phi_FG	v_phi_GE	v_phi_EH
2	0,246793204	-0,366450936	0,246793204	-0,058503112	0,126121689	0,126121689
3	0,208413976	-0,459678575	0,208413976	-0,064627357	0,136209504	0,136209504
4	0,176868566	-0,535396185	0,176868566	-0,069087379	0,146107574	0,146107574
5	0,150987448	-0,596812495	0,150987448	-0,071769477	0,155729385	0,155729385
6	0,129700855	-0,646720437	0,129700855	-0,072665043	0,165081275	0,165081275
7	0,112100066	-0,687421509	0,112100066	-0,071814035	0,174222484	0,174222484
8	0,097442274	-0,720756341	0,097442274	-0,069266141	0,183237478	0,183237478
9	0,085132032	-0,748173474	0,085132032	-0,065058422	0,192219826	0,192219826
10	0,074695947	-0,770803639	0,074695947	-0,059204341	0,20126417	0,20126417
11	0,06575803	-0,789526153	0,06575803	-0,051689389	0,210462957	0,210462957
12	0,058018374	-0,805023533	0,058018374	-0,04247011	0,219905633	0,219905633
13	0,051235689	-0,817824464	0,051235689	-0,031474687	0,229678844	0,229678844
14	0,045213341	-0,828336697	0,045213341	-0,018604278	0,239866796	0,239866796
15	0,039788263	-0,836871723	0,039788263	-0,003734871	0,250551269	0,250551269
16	0,03482207	-0,843662884	0,03482207	0,013280145	0,261810891	0,261810891
17	0,030193786	-0,848878204	0,030193786	0,032606212	0,273719314	0,273719314
18	0,025793652	-0,852628902	0,025793652	0,054421902	0,286341928	0,286341928
19	0,021517548	-0,854974157	0,021517548	0,078910298	0,299730651	0,299730651
20	0,017261589	-0,855922412	0,017261589	0,106246256	0,313916321	0,313916321

Figura 10

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	vBx	vBy	vCx	vCy	vEx	vEy	vGx	vGy	vHx	vHy
2	0	-11	1,917162729	-4,361062931	2,521076408	1,282963183	0,150823447	-0,983050237	8,179315963	3,768172365
3	0,863050053	-10,96609067	2,581758309	-5,389338208	3,176641716	-0,632872969	0,177250439	-1,084272661	9,315232802	1,986959436
4	1,720779115	-10,86457175	3,250587858	-6,154459539	3,816278148	-2,126006802	0,211221454	-1,155336123	10,43293465	0,680841446
5	2,567899002	-10,69606912	3,925376337	-6,69228748	4,452409798	-3,259801572	0,250330034	-1,194124281	11,54053782	-0,433738566
6	3,399186938	-10,46162168	4,603030178	-7,035333029	5,08815468	-4,091923922	0,291051035	-1,200528856	12,64084977	-1,1956445
7	4,209517756	-10,16267486	5,278004446	-7,211333934	5,721378602	-4,671440613	0,329267617	-1,175597601	13,7338149	-1,725332062
8	4,993895497	-9,801071766	5,943705466	-7,243350406	6,347221817	-5,038803312	0,360637957	-1,120938874	14,81789507	-2,061622398
9	5,747484212	-9,379041808	6,593270539	-7,150442163	6,95958275	-5,226975704	0,380806144	-1,038367749	15,89086241	-2,236072812
10	6,465637775	-8,899186938	7,219978566	-6,948472765	7,551953383	-5,262845285	0,385502676	-0,929718872	16,95027053	-2,274604891
11	7,143928532	-8,364465622	7,817453739	-6,650851695	8,117872676	-5,168553769	0,370579833	-0,796755142	17,99374145	-2,19892664
12	7,778174593	-7,778174593	8,379757929	-6,269153468	8,651162527	-4,962622481	0,332014762	-0,641122813	19,0191382	-2,027693363
13	8,364465622	-7,143928532	8,901425466	-5,813609301	9,14604286	-4,660856933	0,265901386	-0,464323183	20,02465935	-1,777430766
14	8,899186938	-6,465637775	9,377469239	-5,293488002	9,597180667	-4,277056426	0,168444556	-0,267684273	21,00887256	-1,46326621
15	9,379041808	-5,747484212	9,803373047	-4,717388093	9,999703245	-3,823566262	0,035966226	-0,052323673	21,97069187	-1,099514164
16	9,801071766	-4,993895497	10,17507736	-4,093462358	10,3491917	-3,311709717	-0,13506749	0,180901812	22,9092946	-0,700154235
17	10,16267486	-4,209517756	10,48896138	-3,429593241	10,64166269	-2,752132579	-0,347988349	0,431461256	23,82396547	-0,279230231
18	10,46162168	-3,399186938	10,74182197	-2,733534775	10,87354159	-2,155088359	-0,605824736	0,699228316	24,71384919	0,148812027
19	10,69606912	-2,567899002	10,93084848	-2,013034638	11,04162757	-1,530688744	-0,911141842	0,984568885	25,57758716	0,568841912
20	10,86457175	-1,720779115	11,05359178	-1,275948832	11,14304909	-0,889142006	-1,265805656	1,288427414	26,41281179	0,964823075

Figura 11

SOFTWARE SOLIDWORKS PER IL MECCANISMO KLANN

Progetto 1

La prima realizzazione del meccanismo è stata fatta in 2 dimensioni, utilizzando le dimensioni riportate a pagina 5 con lo scopo di ottenere un'unica gamba e la geometria di figura 1. Si riporta in figura 12 il risultato.

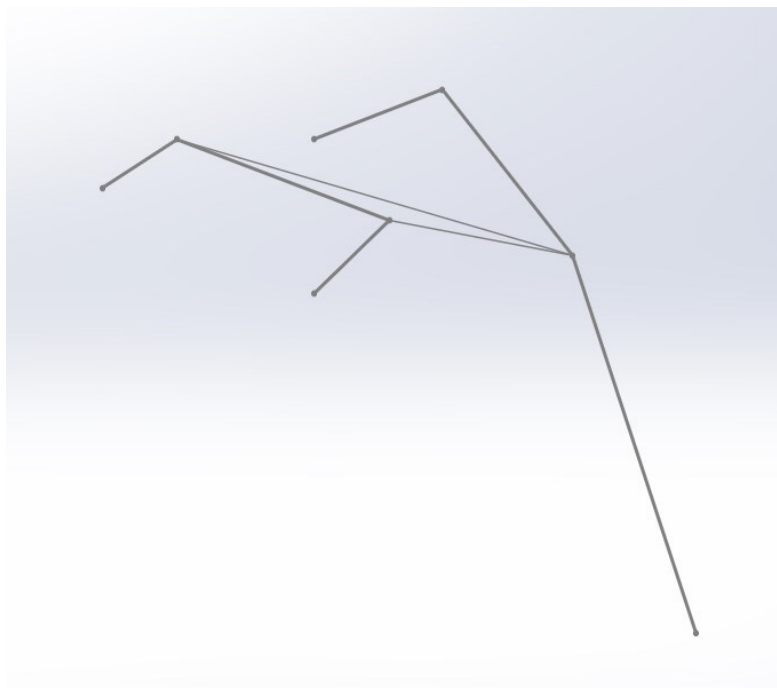


Figura 12

Progetto 2

Una volta studiata la base del robot (una gamba con meccanismo klann) si è poi passato a una realizzazione tridimensionale del robot (astratta) con un telaio al centro e due ruote solidali che trasmettono il movimento a due gambe per lato. Dopo aver testato con successo il movimento di tale assieme mantenendo il telaio fisso, è stata fatta una simulazione di movimento su una superficie orizzontale, con aggiunta di contatto e gravità allo studio di movimento. Si riporta in figura 13 un immagine del progetto.

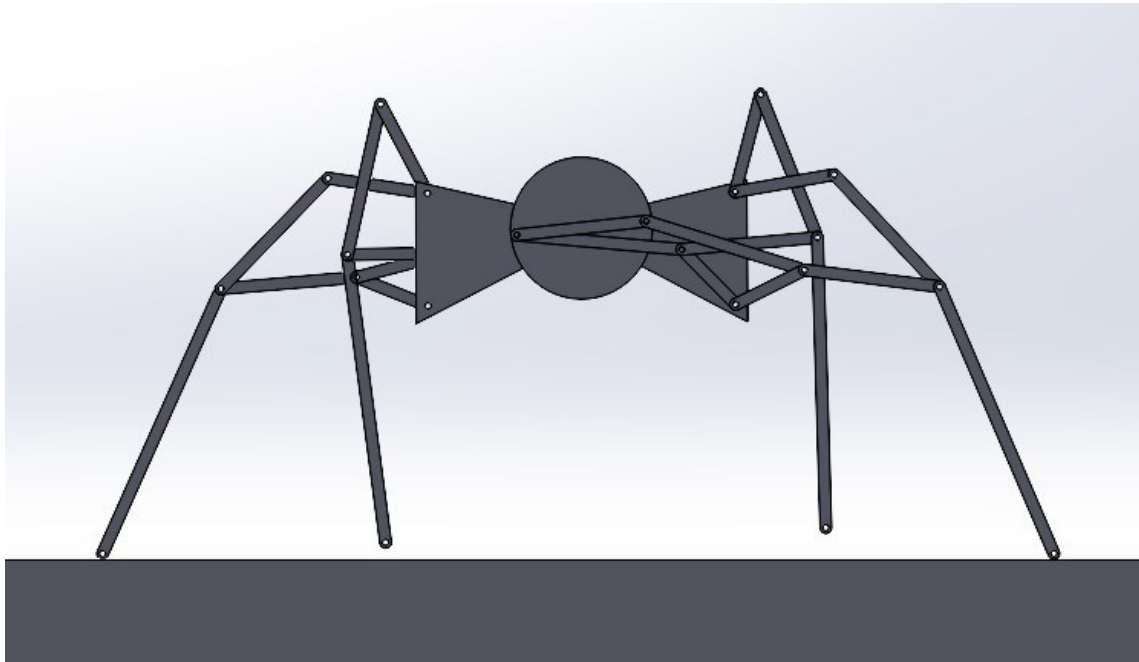


Figura 13

Progetto 3

Il progetto successivo è quello finale, ma in una versione 'chiusa', ovvero non assemblabile. Per questo modello sono state accorciate tutte le misure di un fattore 4 per una più concreta realizzazione tramite stampante 3D:

AB = 2.75 cm
 BC = 7 cm
 CD = 3.25 cm
 CE = 5.75 cm
 FG = 4.25 cm
 GE = 6.5 cm
 EH = 12.25 cm

Le novità di questo progetto sono state l'introduzione delle ruote dentate per la trasmissione del moto tramite il movimento di una manovella che fa ruotare l'albero centrale e di un supporto che tenga in piedi il meccanismo.

Per quanto riguarda le ruote dentate, è stata scelta per tutte e 3 la stessa misura, con una circonferenza primitiva di diametro $d=4$ cm e con un numero di denti $z=10$. A partire da questi dati è stato poi trovato il valore del modulo $m=d/z=0.4$ e da questo sono stati ricavati:

$$d_i = d - 2.5m = 3 \text{ cm} \quad (\text{diametro interno o di piede})$$

$$d_e = d + 2m = 4.8 \text{ cm} \quad (\text{diametro esterno o di testa})$$

Il telaio è stato progettato sulla base dei punti a telaio, i fori hanno tutti diametro pari a 1 cm, tutte le parti del meccanismo hanno una larghezza di 2 cm e una profondità di 0.5 cm.

Il modello è riportato in figura 14.

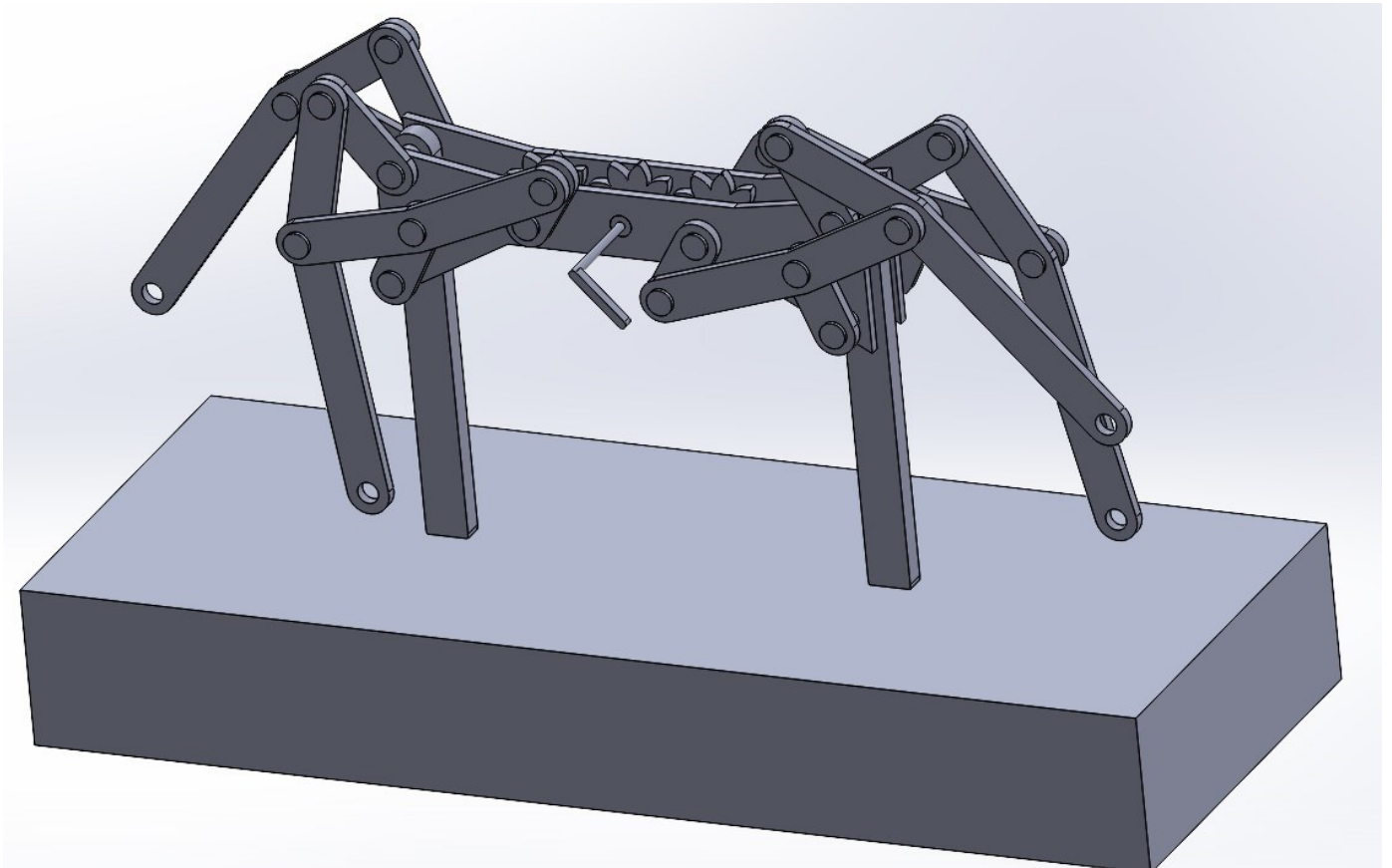


Figura 14

Progetto 4

L'ultimo progetto è stato una realizzazione assemblabile del modello precedente, nella quale sono stati tolti i perni e aggiunta una piccola tolleranza negli alberi che sono stati ridotti da 1 cm a un diametro di 0.9 cm. L'idea è quella in un futuro di fissare i diversi pezzi tramite viti e dadi.

Si riporta il modello in figura 15.

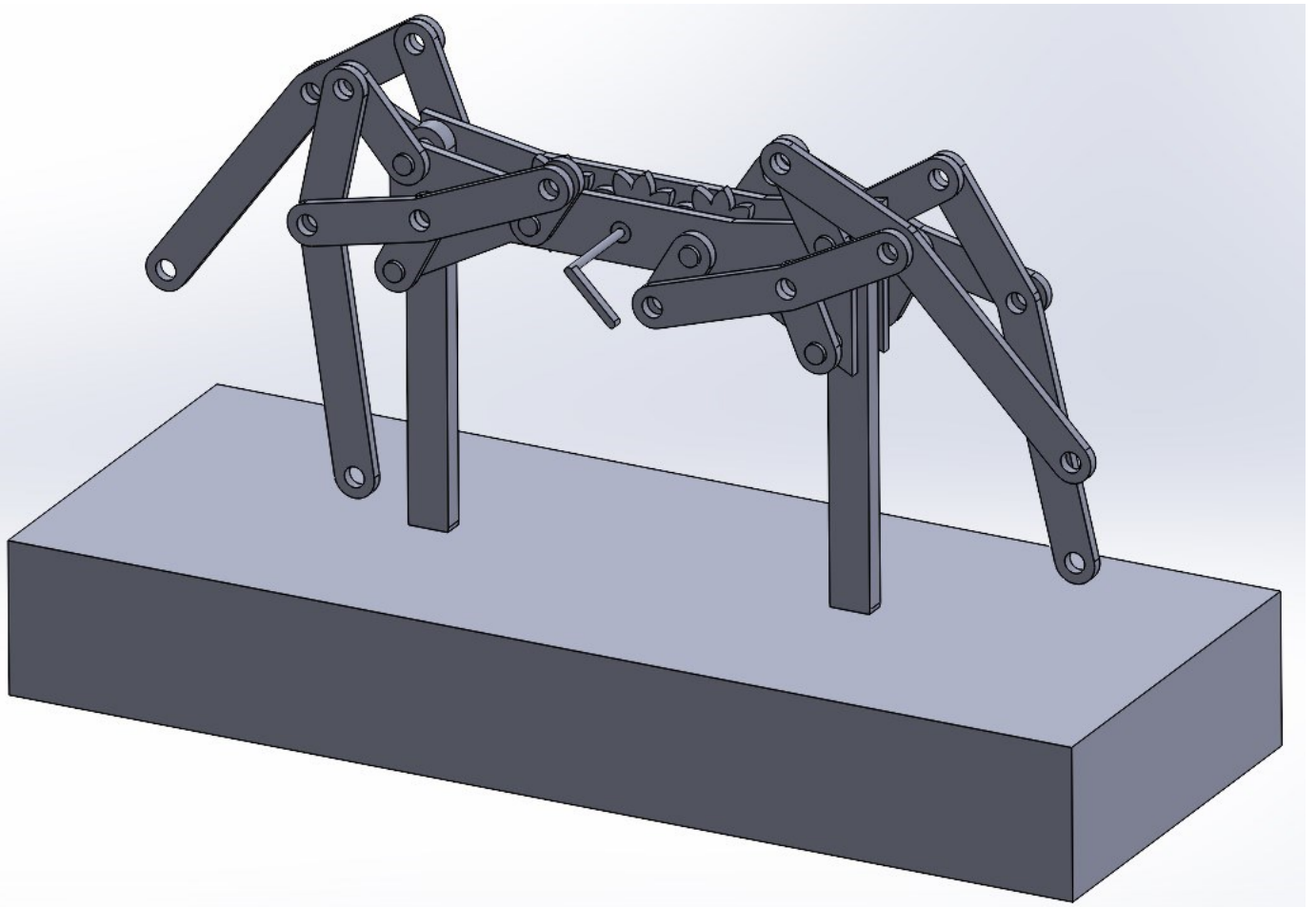


Figura 15

ANALISI DI POSIZIONE E VELOCITA' PER IL MECCANISMO STRANDBEEST

Analisi di posizione

Si riporta l'analisi di posizione del meccanismo articolato strandbeest, la quale è stata eseguita a partire dallo schema della Figura 16.

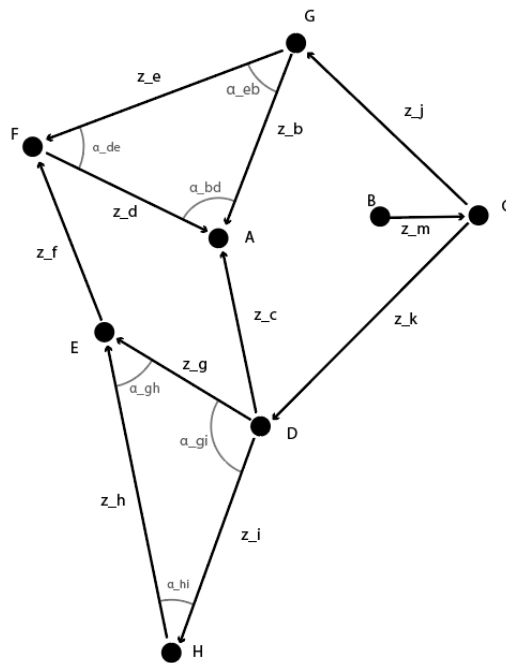


Figura 16

Parametri del Meccanismo

I seguenti parametri sono stati utilizzati per lo studio del meccanismo:

Lunghezze delle braccia:

- $BC = z_m = 150 \text{ mm}$
- $GC = z_j = 500 \text{ mm}$
- $GA = z_b = 415 \text{ mm}$
- $CD = z_k = 619 \text{ mm}$
- $DA = z_c = 393 \text{ mm}$
- $GF = z_e = 558 \text{ mm}$
- $FA = z_d = 401 \text{ mm}$
- $DE = z_g = 367 \text{ mm}$
- $EF = z_f = 394 \text{ mm}$
- $DH = z_i = 490 \text{ mm}$
- $HE = z_h = 657 \text{ mm}$
- $AB = z_{AB} = 387.9226 \text{ mm}$

Angoli fissi (in radianti):

$$\alpha_{AB} = 0.20245 \text{ rad}$$

$$\alpha_{hi} = 0.5842 \text{ rad}$$

$$\alpha_{gi} = 1.7295 \text{ rad}$$

$$\alpha_{gh} = 0.8278 \text{ rad}$$

$$\alpha_{eb} = 0.7996 \text{ rad}$$

$$\alpha_{ed} = 0.8363 \text{ rad}$$

$$\alpha_{bd} = 1.5056 \text{ rad}$$

Punti a telaio:

$$A = [0 \text{ cm} , 0 \text{ cm}]$$

$$B = [380 \text{ mm} , 78 \text{ mm}]$$

Maglia 1

L'equazione di posizione del meccanismo Strandbesst è stata calcolata utilizzando il metodo delle triadi RRR e le relative formule trigonometriche, partendo da un angolo $\varphi_m = \alpha = 0 \text{ rad}$.

La maglia 1 utilizzata è riportata in Figura 17:

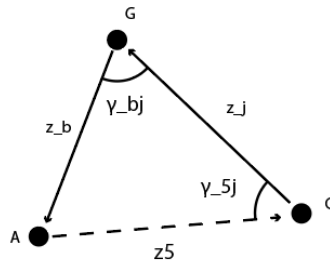


Figura 17

$$C = [z_{AB} \cos(\alpha_{AB}) + z_m \cos(\alpha) , z_{AB} \sin(\alpha_{AB}) + z_m \sin(\alpha)] = [530 \text{ mm} , 78 \text{ mm}]$$

Lunghezza e fase del vettore z_{AC} :

$$AC = z_{AC} = \sqrt{(X_A - X_C)^2 + (Y_A - Y_C)^2} = 535.7088 \text{ mm}$$

$$\varphi_{AC} = \tan^{-1}((Y_C - Y_A) / (X_C - X_A)) + \pi = 0.14612 \text{ rad}$$

Angoli interni:

$$\gamma_{jb} = \cos^{-1}((z_b^2 + z_j^2 - z_{AC}^2) / (2 * z_b * z_j)) = 1.2388 \text{ rad}$$

$$\gamma_{ACj} = \cos^{-1}((z_{AC}^2 + z_j^2 - z_b^2) / (2 * z_{AC} * z_j)) = 0.8218 \text{ rad}$$

Fasi dei vettori z_2 e z_3 :

$$\varphi_j = \varphi_{AC} - \pi + \gamma_{ACj} = 2.4659 \text{ rad}$$

$$\varphi_b = \varphi_j + \pi + \gamma_{bj} = 4.3687 \text{ rad}$$

Maglia 2

La maglia 2 utilizzata è riportata in Figura 18:

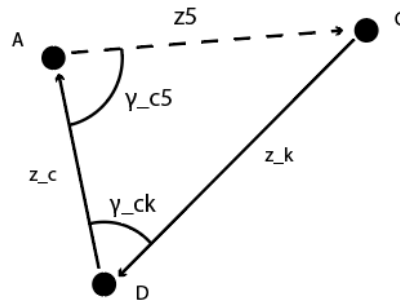


Figura 18

Angolo interni:

$$\alpha_{cAC} = \cos^{-1}((z_{AC}^2 + z_k^2 - z_c^2)/(2*z_{AC}*z_k)) = 0.6300 \text{ rad}$$

$$\alpha_{kc} = \cos^{-1}((z_c^2 + z_k^2 - z_{AC}^2)/(2*z_k*z_c)) = 1.0296 \text{ rad}$$

Fasi dei vettori z_k e z_c :

$$\varphi_k = \varphi_{AC} + \pi + \alpha_{cAC} = 3,9677 \text{ rad}$$

$$\varphi_c = \varphi_k + \pi + \alpha_{kc} = 8,1389 \text{ rad}$$

Maglia 3

La maglia 3 risulta essere essere una struttura iperstatica, viene riportata in Figura 19:

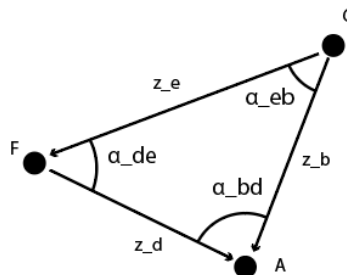


Figura 19

Angoli interni:

$$\alpha_{bd} = \cos^{-1}((z_d^2 + z_b^2 - z_e^2)/(2*z_d*z_b)) = 1.5056 \text{ rad}$$

$$\alpha_{eb} = \cos^{-1}((z_e^2 + z_b^2 - z_d^2)/(2*z_e*z_b)) = 0.7996 \text{ rad}$$

Fasi dei vettori z_e e z_d :

$$\varphi_e = \varphi_b - \alpha_{eb} = 3,5689 \text{ rad}$$

$$\varphi_d = \varphi_b + \alpha_{bd} = 5,8743 \text{ rad}$$

Maglia 4

La maglia 4 utilizzata è riportata in Figura 20:

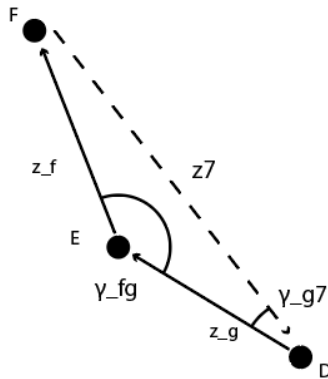


Figura 20

Lunghezza e fase del vettore z_{FD} :

$$z_{FD} = \sqrt{(D_x - F_x)^2 + (D_y - F_y)^2} = 638.6737 \text{ mm}$$

$$\varphi_{FD} = \tan^{-1}((D_y - F_y)/(D_x - F_x)) = 5.4360 \text{ rad}$$

Angoli interni:

$$\alpha_{gFD} = \cos^{-1}((z_{FD}^2 + z_g^2 - z_f^2)/(2*z_{FD}*z_g)) = 0.4724 \text{ rad}$$

$$\alpha_{fg} = \cos^{-1}((z_f^2 + z_g^2 - z_{FD}^2)/(2*z_f*z_g)) = 2.2315 \text{ rad}$$

Fasi dei vettori z_g e z_f :

$$\varphi_g = \varphi_{FD} + \pi + \alpha_{gFD} = 2,6457 \text{ rad}$$

$$\varphi_f = \varphi_g + \pi + \alpha_{fg} = 8,2600 \text{ rad}$$

Maglia 5

La maglia 5 utilizzata è riportata in Figura 21:

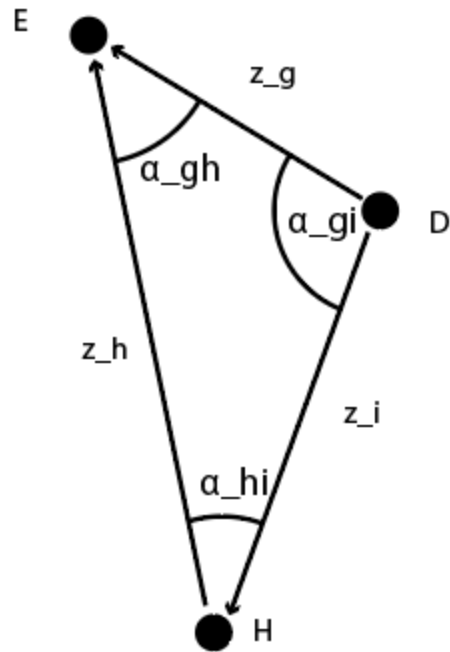


Figura 21

Angoli interni:

$$\alpha_{hi} = \cos^{-1}((z_h^2 + z_i^2 - z_g^2)/(2*z_h*z_i)) = 0.5842 \text{ rad}$$

$$\alpha_{gi} = \cos^{-1}((z_g^2 + z_i^2 - z_h^2)/(2*z_g*z_i)) = 1.7295 \text{ rad}$$

fasi dei vettori z_h e z_i:

$$\varphi_i = \text{phi}_g + \alpha_{gi} = 4,3752 \text{ rad}$$

$$\varphi_h = \text{phi}_i + \pi + \alpha_{hi} = 8,1011 \text{ rad}$$

Posizione e fase di tutti i vettori del meccanismo

z_m = 150 mm	$\varphi_m = 0 \text{ rad}$
z_j = 500 mm	$\varphi_j = 2.4658 \text{ rad}$
z_b = 415 mm	$\varphi_b = 4,3686 \text{ rad}$
z_c = 393 mm	$\varphi_c = 8,1389 \text{ rad}$
z_k = 619 mm	$\varphi_k = 3,9677 \text{ rad}$
z_g = 367 mm	$\varphi_g = 2,6457 \text{ rad}$
z_f = 394 mm	$\varphi_f = 8,2600 \text{ rad}$
z_e = 558 mm	$\varphi_e = 3,5689 \text{ rad}$
z_d = 401 mm	$\varphi_d = 5,8743 \text{ rad}$
z_h = 657 mm	$\varphi_h = 8,1011 \text{ rad}$
z_i = 490 mm	$\varphi_i = 4,3752 \text{ rad}$

Analisi di velocità

Per l'analisi di velocità del meccanismo sono stati usati i risultati dell'analisi di posizione e una velocità $v_{\varphi_m} = 1$ rad/s.

Maglia 1 - velocità

La maglia 1 utilizzata per l'analisi di velocità è riportata in Figura 22:

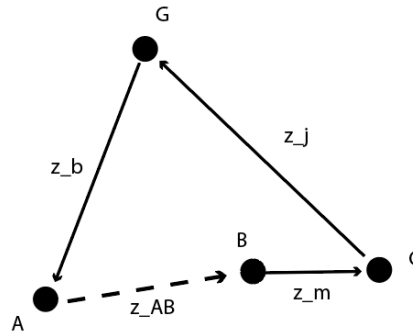


Figura 22

Equazione di chiusura: (il vettore z_{AB} è fisso perchè a telaio, quindi ha velocità nulla)

$$Vz_m + Vz_j + Vz_b = 0$$

Risoluzione attraverso il calcolo matriciale:

$$\begin{bmatrix} -z_j * \sin\varphi_j & -z_b * \sin\varphi_b \\ z_j * \cos\varphi_j & z_b * \cos\varphi_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\varphi_j} \\ v_{\varphi_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_m * \sin\varphi_m \\ -z_m * \cos\varphi_m \end{bmatrix} * V\varphi_m$$

Velocità dei vettori:

$$V\varphi_j = 0.2987 \text{ rad/s}$$

$$V\varphi_b = 0.2391 \text{ rad/s}$$

Maglia 2 - velocità

La maglia 2 utilizzata per l'analisi di velocità è riportata in Figura 23:

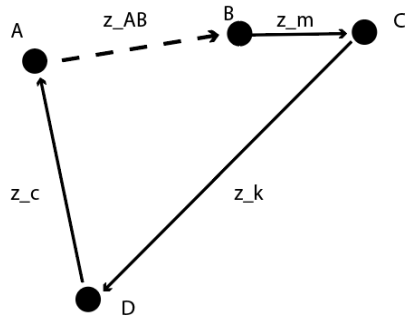


Figura 23

Equazione di chiusura: (il vettore z_{AB} è fisso perchè a telaio, quindi ha velocità nulla)

$$Vz_m + Vz_k + Vz_c = 0$$

Risoluzione attraverso il calcolo matriciale:

$$\begin{bmatrix} -z_k * \sin\varphi_k & -z_c * \sin\varphi_c \\ z_k * \cos\varphi_k & z_c * \cos\varphi_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\varphi_k} \\ v_{\varphi_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_m * \sin\varphi_m \\ -z_m * \cos\varphi_m \end{bmatrix} * V\varphi_m$$

Velocità dei vettori:

$$V\varphi_k = 0.2713 \text{ rad/s}$$

$$V\varphi_c = 0.3274 \text{ rad/s}$$

Maglia 3 - velocità

La maglia 3 utilizzata per l'analisi di velocità è riportata in Figura 24:

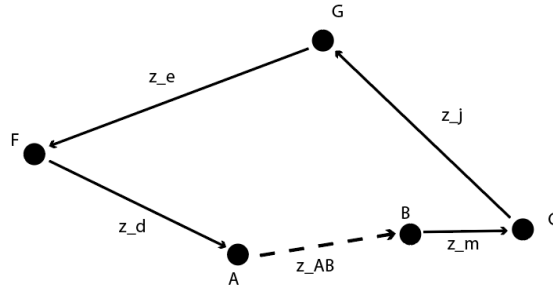


Figura 24

Equazione di chiusura: (il vettore z_{AB} è fisso perchè a telaio, quindi ha velocità nulla)

$$Vz_m + Vz_j + Vz_e + Vz_d = 0$$

Risoluzione attraverso il calcolo matriciale:

$$\begin{bmatrix} -z_e * \sin\varphi_e & -z_d * \sin\varphi_d \\ z_e * \cos\varphi_e & z_d * \cos\varphi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\varphi_e} \\ v_{\varphi_d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_m * \sin\varphi_m & z_j * \sin\varphi_j \\ -z_m * \cos\varphi_m & -z_j * \cos\varphi_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\varphi_m} \\ v_{\varphi_j} \end{bmatrix}$$

Velocità dei vettori:

$$v_{\varphi_e} = 0.2391 \text{ rad/s}$$

$$v_{\varphi_d} = 0.2391 \text{ rad/s}$$

Maglia 4-velocità

La maglia 4 utilizzata per l'analisi di velocità è riportata in Figura 25:

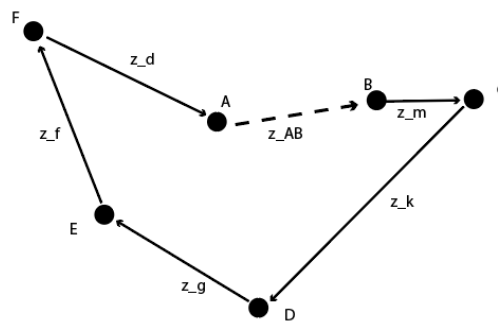


Figura 25

Equazione di chiusura: (il vettore z_{AB} è fisso perchè a telaio, quindi ha velocità nulla)

$$Vz_m + Vz_k + Vz_g + Vz_f + Vz_d = 0$$

Risoluzione attraverso il calcolo matriciale:

$$\begin{bmatrix} -z_g * \sin\varphi_g & -z_f * \sin\varphi_f \\ z_g * \cos\varphi_g & z_f * \cos\varphi_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\varphi_g} \\ v_{\varphi_f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & z_k * \sin\varphi_k & -z_d * \sin\varphi_d \\ -z_m & -z_k * \cos\varphi_k & -z_d * \cos\varphi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\varphi_m} \\ v_{\varphi_k} \\ v_{\varphi_d} \end{bmatrix}$$

Velocità dei vettori:

$$v_{\varphi_g} = 0.2206 \text{ rad/s}$$

$$v_{\varphi_f} = 0.3400 \text{ rad/s}$$

Maglia 5-velocità

La maglia 5 utilizzata per l'analisi di velocità è riportata in Figura 26:

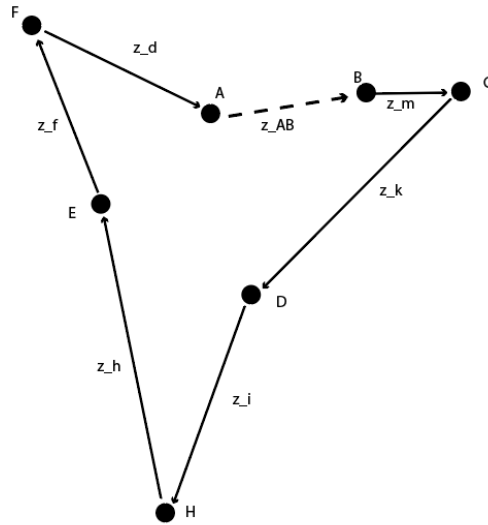


Figura 26

Equazione di chiusura: (il vettore z_{AB} è fisso perchè a telaio, quindi ha velocità nulla)

$$Vz_m + Vz_k + Vz_j + Vz_h + Vz_f + Vz_d = 0$$

Risoluzione attraverso il calcolo matriciale:

$$\begin{bmatrix} -z_i \sin \varphi_i & -z_h \sin \varphi_h \\ z_i \cos \varphi_i & z_h \cos \varphi_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\varphi_i} \\ v_{\varphi_h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & z_k \sin \varphi_k & z_f \sin \varphi_f & z_d \sin \varphi_d \\ -z_m & -z_k \cos \varphi_k & -z_f \cos \varphi_f & -z_d \cos \varphi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\varphi_m} \\ v_{\varphi_k} \\ v_{\varphi_f} \\ v_{\varphi_d} \end{bmatrix}$$

Velocità dei vettori:

$$v_{\varphi_i} = 0.2206 \text{ rad/s}$$

$$v_{\varphi_h} = 0.2206 \text{ rad/s}$$

SOFTWARE MATLAB PER IL MECCANISMO STRANDBEEST

Codice

Si riporta lo script Matlab che permette l'analisi di posizione e velocità del meccanismo Strandbeest, con rappresentazione di un giro completo della manovella BC (z_m) ed esportazione su excel dei dati:

```
clear all;
close all;

%lunghezza braccia
z_m= 150;
z_j = 500;
z_b = 415;
z_k = 619;
z_c = 393;
z_e = 558;
z_d = 401;
z_g = 367;
z_f = 394;
z_i = 490;
z_h = 657;
z_AB = 387.9226;
    %Sono angoli fissi all'interno del meccanismo
alpha_AB = 0.20245;
alpha_hi = 0.5842;
alpha_gi = 1.7295;
alpha_gh = 0.8278;
alpha_eb = 0.7996;
alpha_ed = 0.8363;
alpha_bd = 1.5056;
    %coordinata libera del meccanismo
phi_m = 0:pi/50:2*pi;
v_phi_m = 1;

for i = 1:length(phi_m)

    %punti a telaio
Ax(i) = 0;
Ay(i) = 0;
Bx(i) = 380;
By(i) = 78;
    %punti che si muovono
Cx(i) = Bx(i) + z_m*cos(phi_m(i));
Cy(i) = By(i) + z_m*sin(phi_m(i));

%MAGLIA 1

z_AC(i) = sqrt((Ax(i)-Cx(i))^2 + (Ay(i)-Cy(i))^2);
phi_AC(i) = atan((Cy(i)-Ay(i))/(Cx(i)-Ax(i)));
    if Cx(i)<Ax(i)
        phi_AC(i) = atan((Cy(i)-Ay(i))/(Cx(i)-Ax(i))) + pi;
```

```

    end
    %angoli interni
    alpha_jb(i) = acos((z_j^2 + z_b^2 - z_AC(i)^2)/(2*z_j*z_b));
    alpha_jAC(i) = acos((z_AC(i)^2 + z_j^2 - z_b^2)/(2*z_j*z_AC(i)));
    %fasi dei vettori j,b
    phi_j(i) = phi_AC(i) + pi - alpha_jAC(i);
    phi_b(i) = phi_j(i) + pi - alpha_jb(i);

%punti che si muovono
    Gx(i) = Cx(i) + z_j*cos(phi_j(i));
    Gy(i) = Cy(i) + z_j*sin(phi_j(i));

    %-----
plot( [Bx(i) Cx(i)], [By(i) Cy(i)], [Cx(i) Gx(i)], [Cy(i) Gy(i)], [Gx(i) Ax(i)], [Gy(i) Ay(i)],
'LineWidth', 3);
    %-----

%MAGLIA 2

    %angoli interni
    alpha_cAC(i) = acos((z_AC(i)^2 + z_k^2 - z_c^2)/(2*z_AC(i)*z_k));
    alpha_kc(i) = acos((z_c^2 + z_k^2 - z_AC(i)^2)/(2*z_k*z_c));
    %fasi dei vettori k, c
    phi_k(i) = phi_AC(i) + pi + alpha_cAC(i);
    phi_c(i) = phi_k(i) + pi + alpha_kc(i);
    %punti che si muovono
    Dx(i) = Cx(i) + z_k*cos(phi_k(i));
    Dy(i) = Cy(i) + z_k*sin(phi_k(i));

%MAGLIA 3--TRIANGOLO FISSO (angoli interni NON variano)

alpha_bd = acos((z_d^2 + z_b^2 - z_e^2)/(2*z_d*z_b));
alpha_eb = acos((z_e^2 + z_b^2 - z_d^2)/(2*z_e*z_b));

phi_e(i) = phi_b(i) - alpha_eb;
phi_d(i) = phi_b(i) + alpha_bd;

%punti che si muovono
Fx(i) = Gx(i) + z_e*cos(phi_e(i));
Fy(i) = Gy(i) + z_e*sin(phi_e(i));

%MAGLIA 4

z_FD(i) = sqrt((Dx(i)-Fx(i))^2 + (Dy(i)-Fy(i))^2);
phi_FD(i) = atan(((Dy(i)-Fy(i)))/(Dx(i)-Fx(i)));
    if Dx(i) < Fx(i)
        phi_FD(i) = atan(((Dy(i)-Fy(i)))/(Dx(i)-Fx(i))) + pi;
    end

%angoli interni
    alpha_gFD(i) = acos((z_FD(i)^2 + z_g^2 - z_f^2)/(2*z_FD(i)*z_g));
    alpha_fg(i) = acos((z_f^2 + z_g^2 - z_FD(i)^2)/(2*z_f*z_g));

%fasi dei vettori g,f
    phi_g(i) = phi_FD(i) + pi + alpha_gFD(i);
    phi_f(i) = phi_g(i) + pi + alpha_fg(i);

%Punti che si muovono
    Ex(i) = Dx(i) + z_g*cos(phi_g(i));

```

```
Ey(i) = Dy(i) + z_g*sin(phi_g(i));
```

```
%MAGLIA 5
```

```
%angoli interni
```

```
alpha_hi(i) = acos((z_h^2 + z_i^2 - z_g^2)/(2*z_h*z_i));  
alpha_gi(i) = acos((z_g^2 + z_i^2 - z_h^2)/(2*z_g*z_i));  
%fasi dei vettoi h,i  
phi_i(i) = phi_g(i) + alpha_gi(i);  
phi_h(i) = phi_i(i) + pi + alpha_hi(i);  
%punti che si muovono  
Hx(i) = Dx(i) + z_i*cos(phi_i(i));  
Hy(i) = Dy(i) + z_i*sin(phi_i(i));
```

```
%GRAFICO
```

```
hold on;  
plot([Cx(i) Dx(i)], [Cy(i) Dy(i)], [Dx(i) Ax(i)], [Dy(i) Ay(i)], 'LineWidth', 3);  
plot( [Gx(i) Fx(i)], [Gy(i) Fy(i)], [Fx(i) Ax(i)], [Fy(i) Ay(i)], 'LineWidth',3);  
plot( [Dx(i) Ex(i)], [Dy(i) Ey(i)], [Ex(i) Fx(i)], [Ey(i) Fy(i)], 'LineWidth', 3);  
plot( [Dx(i) Hx(i)], [Dy(i) Hy(i)], [Hx(i) Ex(i)], [Hy(i) Ey(i)], 'LineWidth', 3);  
grid on;  
axis equal;  
axis ( [-800 600 -1000 600]);  
drawnow;  
hold off;
```

```
plot(Hx(1:i), Hy(1:i), 'r-', 'LineWidth', 3);
```

```
hold on;
```

```
%-----  
-----
```

```
                %calcolo distanza che percorre il punto H
```

```
max_estensione_dx = max(Hx);  
max_estensione_sx = min(Hx);  
distanza_Hx = max_estensione_dx - max_estensione_sx;
```

```
%trovo i valori di i in cui il punto H inizia e finisce la tratta orizzontale
```

```
%-----
```

```
max_estensione_sup = max(Hy);  
max_estensione_inf = min(Hy);  
distanza_Hy = max_estensione_sup - max_estensione_inf;
```

```
distanza_tot = table( distanza_Hx', max_estensione_dx', max_estensione_sx',distanza_Hy',  
max_estensione_sup', max_estensione_inf', 'VariableNames', {'distanza_Hx','max_estensione_dx',  
'max_estensione_sx','distanza_Hy',' max_estensione_sup', 'max_estensione_inf'});  
writetable ( distanza_tot, 'Punti_meccanismo.xlsx','Sheet', 'distanza_tot');
```

```
%-----%
```

```
ANALISI DI VELOCITA
```

```
% x= matrice incognite  
% J = Jacobiana  
% f = matrice termini noti  
% M = matrice delle velocità
```

```
%MAGLIA 1
```

```
J1 = [-z_j*sin(phi_j(i)) , -z_b*sin(phi_b(i)) ; z_j*cos(phi_j(i)) , z_b*cos(phi_b(i))];  
f1 = [z_m*sin(phi_m(i)) ; -z_m*cos(phi_m(i))];
```

```

M1 = [v_phi_m];
x1 = inv(J1)*(M1*f1);
v_phi_j(i) = x1(1);
v_phi_b(i) = x1(2);

vCx(i) = -f1(1)*v_phi_m;
vCy(i) = -f1(2)*v_phi_m;
vGx(i) = vCx(i) + (J1(1,1)*v_phi_j(i));
vGy(i) = vCy(i) + (J1(2,1)*v_phi_j(i));

%MAGLIA 2
J2 = [-z_k*sin(phi_k(i)) , -z_c*sin(phi_c(i)) ; z_k*cos(phi_k(i)) , z_c*cos(phi_c(i))];
f2 = [z_m*sin(phi_m(i)) ; -z_m*cos(phi_m(i))];
M2 = [v_phi_m];
x2 = inv(J2)*(M2*f2);
v_phi_k(i) = x2(1);
v_phi_c(i) = x2(2);

vDx(i) = vCx(i) + (J2(1,1)*v_phi_k(i));
vDy(i) = vCy(i) + (J2(2,1)*v_phi_k(i));

%MAGLIA 3
J3 = [-z_e*sin(phi_e(i)) , -z_d*sin(phi_d(i)) ; z_e*cos(phi_e(i)) , z_d*cos(phi_d(i))];
f3 = [-z_b*sin(phi_b(i)) ; z_b*cos(phi_b(i))];
M3 = [v_phi_b(i)];
x3 = inv(J3)*(M3*f3);
v_phi_e(i) = x3(1);
v_phi_d(i) = x3(2);

%MAGLIA 4
J4 = [-z_g*sin(phi_g(i)) , -z_f*sin(phi_f(i)) ; z_g*cos(phi_g(i)) , z_f*cos(phi_f(i))];
f4 = [z_d*sin(phi_d(i)) , -z_c*sin(phi_c(i)) ; -z_d*cos(phi_d(i)) , z_c*cos(phi_c(i))];
M4 = [v_phi_d(i); v_phi_c(i)];
x4 = inv(J4)*f4*M4;
v_phi_g(i) = x4(1);
v_phi_f(i) = x4(2);

vEx(i) = vDx(i) + (J4(1,1)*v_phi_g(i));
vEy(i) = vDy(i) + (J4(2,1)*v_phi_g(i));
vFx(i) = vEx(i) + (J4(1,2)*v_phi_f(i));
vFy(i) = vEy(i) + (J4(2,2)*v_phi_f(i));

%MAGLIA 5
J5 = [-z_i*sin(phi_i(i)) , -z_h*sin(phi_h(i)) ; z_i*cos(phi_i(i)) , z_h*cos(phi_h(i))];
f5 = [-z_g*sin(phi_g(i)) ; z_g*cos(phi_g(i))];
M5 = [v_phi_g(i)];
x5 = inv(J5)*(M5*f5);
v_phi_i(i) = x5(1);
v_phi_h(i) = x5(2);

vHx(i) = vDx(i) + (J5(1,1)*v_phi_i(i));
vHy(i) = vDy(i) + (J5(2,1)*v_phi_i(i));

```


%esportazione dati in excel

```
fasi = table( phi_m', phi_j', phi_b', phi_c', phi_k', phi_g', phi_f', phi_e', phi_d', phi_h',  
phi_i', 'VariableNames', {'phi_m', 'phi_j', 'phi_b', 'phi_c', 'phi_k', 'phi_g', 'phi_f', 'phi_e',  
'phi_d', 'phi_h', 'phi_i'});  
writetable ( fasi, 'Punti_meccanismo.xlsx', 'Sheet', 'fasi_vettori');  
coordinate_punti = table(phi_m', Cx', Cy', Gx', Gy', Dx', Dy', Ex', Ey', Fx', Fy', Hx', Hy',  
'VariableNames', {'phi_m', 'Cx', 'Cy', 'Gx', 'Gy', 'Dx', 'Dy', 'Ex', 'Ey', 'Fx', 'Fy', 'Hx',  
'Hy'});  
writetable ( coordinate_punti, 'Punti_meccanismo.xlsx', 'Sheet', 'coordinate_punti');  
velocita = table( v_phi_j', v_phi_b', v_phi_c', v_phi_k', v_phi_g', v_phi_f', v_phi_e', v_phi_d',  
v_phi_h', v_phi_i', 'VariableNames', { 'v_phi_j', 'v_phi_b', 'v_phi_c', 'v_phi_k', 'v_phi_g',  
'v_phi_f', 'v_phi_e', 'v_phi_d', 'v_phi_h', 'v_phi_i'});  
writetable ( velocita, 'Punti_meccanismo.xlsx', 'Sheet', 'velocita');  
velocita_coordinate_punti = table( vCx', vCy', vGx', vGy', vDx', vDy', vEx', vEy', vFx', vFy',  
vHx', vHy', 'VariableNames', { 'vCx', 'vCy', 'vGx', 'vGy', 'vDx', 'vDy', 'vEx', 'vEy', 'vFx',  
'vFy', 'vHx', 'vHy'});  
writetable ( velocita_coordinate_punti, 'Punti_meccanismo.xlsx', 'Sheet',  
'velocita_coordinate_punti');
```

Traccia punto H

Si riporta in figura 27 l'immagine relativa alla traccia del punto H, ovvero il punto del meccanismo che tocca terra e che permette il movimento del robot.

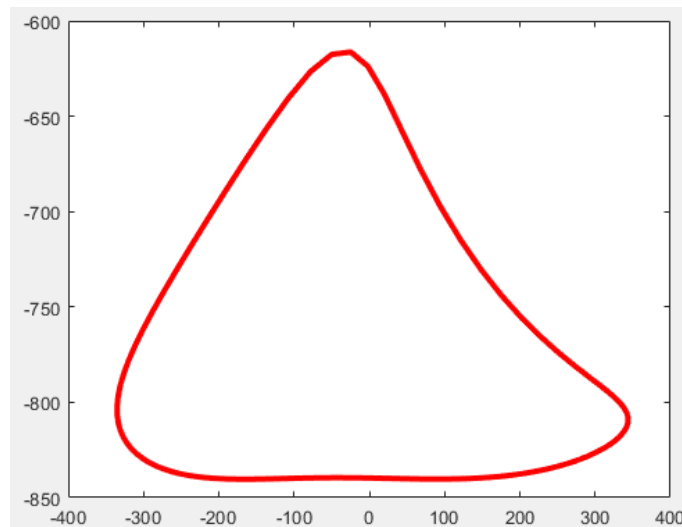


Figura 27

Esportazione dati su excel

La verifica dei risultati delle analisi di posizione e di velocità è stata eseguita tramite l'esportazione dell'analisi di Matlab su un file excel. In quest'ultimo sono stati scritti tramite software i seguenti parametri:

- fasi dei vettori in rad (Figura 28)
- coordinate dei punti in cm (Figura 29)
- velocità dei vettori in rad/s (Figura 30)

-velocità dei punti in rad/s (Figura 31)

per un giro completo della manovella BC (z_m) a scatti di $\pi/50$.

La prima riga rappresenta l'angolo scelto di 0 radianti della manovella BC.

phi_m	phi_j	phi_b	phi_c	phi_k	phi_g	phi_f	phi_e	phi_d	phi_h	phi_i
0	2,46589484	4,3686356	8,13893935	3,96770426	2,64570752	8,26004535	3,56898257	5,87430161	8,10110737	4,37526368
0,062831853	2,48448889	4,38405982	8,1590531	3,98483676	2,66014668	8,28083442	3,58440679	5,88972583	8,11554653	4,38970284
0,125663706	2,50270989	4,40027136	8,17823291	4,00212772	2,67572777	8,30044848	3,60061832	5,90593737	8,13112755	4,40528386
0,188495559	2,52053224	4,41725017	8,19645672	4,01955886	2,6924404	8,31885603	3,61759713	5,92291618	8,14784025	4,42199656
0,251327412	2,53793247	4,43497508	8,21370249	4,03710973	2,71026785	8,33603098	3,63532204	5,94064109	8,16566769	4,439824
0,314159265	2,55488901	4,45342365	8,22994813	4,05475759	2,72918595	8,35195278	3,65377062	5,95908966	8,18458579	4,4587421
0,376991118	2,57138215	4,47257205	8,24517128	4,07247734	2,74916347	8,36660622	3,67291902	5,97823806	8,20456331	4,47871963
0,439822972	2,58739387	4,49239495	8,25934929	4,09024134	2,77016232	8,37998086	3,69274191	5,99806096	8,22556216	4,49971847
0,502654825	2,60290769	4,51286543	8,27245891	4,10801928	2,79213812	8,39207029	3,71321239	6,01853144	8,24753797	4,52169428
0,565486678	2,61790853	4,5339549	8,28447622	4,12577808	2,81504107	8,40287107	3,73430186	6,03962091	8,27044091	4,54459722
0,628318531	2,63238254	4,55563302	8,29537631	4,14348167	2,8388168	8,41238162	3,75597998	6,06129903	8,29421664	4,56837295
0,691150384	2,64631691	4,57786762	8,30513313	4,16109086	2,86340741	8,42060101	3,77821459	6,08353364	8,31880725	4,59296356
0,753982237	2,6596997	4,60062466	8,31371916	4,17856317	2,88875236	8,42752783	3,80097163	6,10629067	8,3441522	4,61830852
0,81681409	2,67251964	4,62386811	8,32110514	4,19585261	2,91478933	8,43315903	3,82421507	6,12953412	8,37018917	4,64434548
0,879645943	2,68476591	4,6475599	8,32725975	4,21290945	2,94145488	8,43748898	3,84790687	6,15322591	8,39685472	4,67101103
0,942477796	2,69642792	4,67165985	8,33214926	4,22968	2,968685	8,44050856	3,87200681	6,17732586	8,42408484	4,69824115
1,005309649	2,70749507	4,69612552	8,33573714	4,24610635	2,99641546	8,44220441	3,89647248	6,20179153	8,4518153	4,72597161
1,068141502	2,71795654	4,72091214	8,33798366	4,26212601	3,02458201	8,44255831	3,92125911	6,22657816	8,47998186	4,75413817
1,130973355	2,72780099	4,74597247	8,33884544	4,27767163	3,05312045	8,4415466	3,94631943	6,25163848	8,5085203	4,78267661
1,193805208	2,73701632	4,77125657	8,33827497	4,29267061	3,08196654	8,43913973	3,97160353	6,27692258	8,53736639	4,8115227
1,256637061	2,74558938	4,79671168	8,3362201	4,30704467	3,1105584	8,43530177	3,99705865	6,3023777	8,56645569	4,840612
1,319468915	2,75350567	4,82228197	8,33262346	4,32070942	3,14032344	8,42999006	4,02262893	6,32794798	8,59572328	4,8698796

Figura 28

phi_m	Cx	Cy	Gx	Gy	Dx	Dy	Ex	Ey	Fx	Fy	Hx	Hy
0	530	78	139,864649	390,720975	110,47893	-377,151702	-212,31515	-202,529302	-367,943654	159,431702	-51,6011052	-839,569329
0,062831853	529,704009	87,4185779	133,821684	392,831716	118,042009	-374,853417	-207,239735	-204,909934	-370,358899	153,737718	-37,344441	-839,563059
0,125663706	528,817205	96,799985	127,435974	394,949456	125,209474	-372,520587	-202,680572	-207,665748	-372,802447	147,713693	-22,9177572	-839,594803
0,188495559	527,343088	106,107197	120,712156	397,056136	131,977051	-370,177063	-198,622246	-210,824921	-375,256595	141,362965	-8,32378504	-839,661542
0,251327412	525,287474	115,303483	113,655777	399,133266	138,341099	-367,846082	-195,046354	-214,412689	-377,703164	134,689717	6,43182131	-839,75703
0,314159265	522,658477	124,352549	106,273415	401,162014	144,298472	-365,550203	-191,931819	-218,450947	-380,123582	127,699108	21,3399257	-839,87203
0,376991118	519,466473	133,218683	98,5727914	403,123312	149,846367	-363,311253	-189,255315	-222,957951	-382,49898	120,397384	36,3875002	-839,994676
0,439822972	515,724058	141,866894	90,5628762	404,997982	154,982161	-361,150287	-186,9918	-227,948149	-384,810301	112,791988	51,5573749	-840,110947
0,502654825	511,446002	150,263051	82,2539784	406,766866	159,703253	-359,087553	-185,115125	-233,432127	-387,038423	104,891656	66,8281389	-840,205224
0,565486678	506,649189	158,374019	73,6578256	408,410975	164,006881	-357,142469	-183,598692	-239,416662	-389,1643	96,7065005	82,1741729	-840,260889
0,628318531	501,352549	166,167788	64,7876303	409,911653	167,889949	-355,333597	-182,416134	-245,904861	-391,169113	88,2480887	97,56578	-840,260923
0,691150384	495,576986	173,613598	55,6581428	411,25074	171,348829	-353,678638	-181,541992	-252,896357	-393,034424	79,5295009	112,969378	-840,188493
0,753982237	489,345294	180,682066	46,2856905	412,41076	174,379172	-352,194413	-180,952362	-260,387544	-394,742355	70,5653812	128,347719	-840,027484
0,81681409	482,682066	187,345294	36,6882032	413,375103	176,975692	-350,896857	-180,625507	-268,371816	-396,275764	61,3719732	143,660101	-839,762965
0,879645943	475,613598	193,576986	26,885226	414,128222	179,13196	-349,801002	-180,542425	-276,839802	-397,61843	51,9671449	158,862551	-839,381589
0,942477796	468,167788	199,352549	16,8979177	414,655834	180,840166	-348,920957	-180,687378	-285,779571	-398,75525	42,3703997	173,907962	-838,871919
1,005309649	460,374019	204,649189	6,74903932	414,945117	182,090885	-348,26988	-181,04838	-295,176811	-399,672431	32,6028778	188,746171	-838,224682
1,068141502	452,263051	209,446002	-3,53707017	414,984926	182,87282	-347,859931	-181,617657	-305,014951	-400,357695	22,6873463	203,32398	-837,43296
1,130973355	443,866894	213,724058	-13,9345264	414,765993	183,172531	-347,702206	-182,39209	-315,27525	-400,800478	12,6481805	217,585119	-836,492318
1,193805208	435,218683	217,466473	-24,4159408	414,281139	182,974149	-347,806643	-183,373651	-325,936825	-400,992136	2,51133743	231,470149	-835,400878
1,256637061	426,352549	220,658477	-34,9524673	413,525483	182,259065	-348,181897	-184,569835	-336,976628	-400,926149	-7,6956759	244,916321	-834,159333
1,319468915	417,303483	223,287474	-45,5138529	412,496654	181,005604	-348,835163	-185,9941	-348,369361	-400,598326	-17,9438383	257,857388	-832,770906
1,382300768	408,107197	225,343088	-56,0684897	411,194996	179,188674	-349,771953	-187,666329	-360,087321	-400,007013	-28,2026513	270,223368	-831,24125
1,445132621	398,799985	226,817205	-66,5834652	409,623781	176,779396	-350,995791	-189,613297	-372,100164	-399,153295	-38,4401743	281,940291	-829,578267
1,507964474	389,418578	227,704009	-77,0246077	407,789418	173,744715	-352,507835	-191,869166	-384,374588	-398,041202	-48,6230552	292,9299	-827,791847

Figura 29

v_phi_j	v_phi_b	v_phi_c	v_phi_k	v_phi_g	v_phi_f	v_phi_e	v_phi_d	v_phi_h	v_phi_i
0,298757951	0,239116617	0,327435083	0,271322063	0,220690565	0,340030972	0,239116617	0,239116617	0,220690565	0,220690565
0,293035466	0,251801102	0,31274688	0,273978991	0,238911501	0,321608437	0,251801102	0,251801102	0,238911501	0,238911501
0,286888883	0,264174952	0,297706939	0,276361098	0,257020968	0,302642918	0,264174952	0,264174952	0,257020968	0,257020968
0,280352078	0,276221236	0,28231645	0,278435133	0,274916028	0,283218343	0,276221236	0,276221236	0,274916028	0,274916028
0,273457113	0,287920767	0,266575001	0,280165942	0,292485183	0,263422826	0,287920767	0,287920767	0,292485183	0,292485183
0,266234116	0,299252342	0,250480288	0,281516421	0,309613748	0,243343672	0,299252342	0,299252342	0,309613748	0,309613748
0,258711144	0,310192972	0,234027799	0,282447453	0,326189323	0,22306223	0,310192972	0,310192972	0,326189323	0,326189323
0,250914031	0,320718081	0,217210479	0,282917813	0,342106807	0,202649149	0,320718081	0,320718081	0,342106807	0,342106807
0,242866227	0,330801685	0,200018387	0,282884055	0,357272432	0,182160501	0,330801685	0,330801685	0,357272432	0,357272432
0,234588623	0,340416524	0,182438324	0,282300365	0,371606493	0,161635067	0,340416524	0,340416524	0,371606493	0,371606493
0,226099384	0,349534161	0,164453456	0,281118383	0,385044659	0,141092902	0,349534161	0,349534161	0,385044659	0,385044659
0,217413765	0,358125031	0,146042915	0,279286983	0,397537927	0,120535105	0,358125031	0,358125031	0,397537927	0,397537927
0,208543945	0,366158444	0,127181387	0,276752016	0,409051454	0,099944579	0,366158444	0,366158444	0,409051454	0,409051454
0,199498846	0,37360252	0,107838673	0,273456	0,419562577	0,079287487	0,37360252	0,37360252	0,419562577	0,419562577
0,190283959	0,380424082	0,087979248	0,26933777	0,429058349	0,058515097	0,380424082	0,380424082	0,429058349	0,429058349
0,18090117	0,386588472	0,067561779	0,264332068	0,437532873	0,037565741	0,386588472	0,386588472	0,437532873	0,437532873
0,171348579	0,392059312	0,046538633	0,258369083	0,444984683	0,016366674	0,392059312	0,392059312	0,444984683	0,444984683
0,161620304	0,396798185	0,024855356	0,251373933	0,451414312	-0,005164312	0,396798185	0,396798185	0,451414312	0,451414312
0,151706287	0,400764253	0,002450125	0,24326609	0,456822141	-0,027117608	0,400764253	0,400764253	0,456822141	0,456822141
0,141592071	0,4039138	-0,020746823	0,233958747	0,461206564	-0,049590847	0,4039138	0,4039138	0,461206564	0,461206564

Figura 30

vCx	vCy	vGx	vGy	vDx	vDy	vEx	vEy	vFx	vFy	vHx	vHy
0	150	-93,4278777	33,44396175	123,4926989	36,17467755	84,95518283	-35,0629303	-38,1227693	-87,9814418	225,543907	0,405143008
-9,418577929	149,7040093	-98,9154591	33,69644762	117,2342366	36,9172699	76,63278396	-40,7962795	-38,7113269	-93,2567791	228,258715	-0,206339976
-18,79998503	148,8172052	-104,335754	33,6653922	110,9019637	37,27572924	68,53081349	-46,9988878	-39,0222579	-98,4850686	230,949831	-0,796075095
-28,10719719	147,3430876	-109,675337	33,34326089	104,5070743	37,25929238	60,6986163	-53,627753	-39,0474528	-103,653841	233,575882	-1,311656042
-37,30348307	145,2874742	-114,918756	32,72385852	98,05856986	36,8782786	53,18157565	-60,6326117	-38,7799666	-108,748585	236,08553	-1,703230653
-46,35254916	142,6584774	-120,048672	31,80256835	91,56312025	36,14392296	46,01916824	-67,9575977	-38,2142571	-113,752872	238,419679	-1,925733504
-55,2186829	139,4664729	-125,046018	30,57658712	85,02493273	35,06821532	39,24318418	-75,5431327	-37,3464223	-118,648495	240,513976	-1,940855489
-63,86689373	135,7240579	-129,890176	29,04515192	78,44562681	33,66374947	32,87626867	-83,3278707	-36,1744301	-123,415621	242,301329	-1,71857395
-72,26305112	131,446002	-134,559165	27,20975469	71,82411309	31,94358696	26,93089331	-91,2505134	-34,6983365	-128,032962	243,714193	-1,238130823
-80,37401925	126,6491888	-139,029845	25,07434096	65,15647324	29,92114051	21,40879923	-99,2513475	-32,9204907	-132,477958	244,686415	-0,488425306
-88,16778784	121,3525492	-143,278125	22,64548998	58,43583798	27,6100823	16,30088773	-107,273404	-30,8457216	-136,726968	245,154515	0,532136631
-95,61359846	115,5769864	-147,279184	19,93257414	51,65225936	25,0242826	11,58748065	-115,263203	-28,481505	-140,755465	245,058379	1,81623654
-102,6820659	109,3452941	-151,007682	16,94789638	44,79257376	22,17778483	7,238840695	-123,171096	-25,8381101	-144,538246	244,341401	3,348552186
-109,3452941	102,6820659	-154,43798	13,70680518	37,84025151	19,08482388	3,215832685	-130,951257	-22,9287238	-148,049624	242,950176	5,106848373
-115,5769864	95,61359846	-157,544349	10,2277874	30,77522914	15,75989517	-0,529382941	-138,561403	-19,7695534	-151,263626	240,833867	7,063136001
-121,3525492	88,16778784	-160,301165	6,532540195	23,57372064	12,21788335	-4,052711282	-145,962302	-16,3799081	-154,154183	237,943372	9,184816228
-126,6491888	80,37401925	-162,683097	2,646023711	16,20800426	8,474260926	-7,417598445	-153,11715	-12,7822618	-156,695298	234,230386	11,43576126
-131,446002	72,26305112	-164,665265	-1,403503021	8,646182495	4,545369073	-10,69465486	-159,990849	-9,00229783	-158,861207	229,646454	13,77731555
-135,7240579	63,86689373	-166,223383	-5,58446008	0,851913848	0,448795588	-13,96143764	-166,549217	-5,06893861	-160,626504	224,142059	16,16922747
-139,4664729	55,2186829	-167,333869	-9,861935449	-7,215882787	-3,79613225	-17,30238644	-172,758143	-1,01436384	-161,966258	217,665779	18,57054106
-142,6584774	46,35254916	-167,973922	-14,19768131	-15,60334781	-8,16771813	-20,80889479	-178,582651	3,12598115	-162,856076	210,163521	20,94049041
-145,2874742	37,30348307	-168,121566	-18,55011461	-24,36201717	-12,6411042	-24,57949076	-183,985887	7,31338343	-163,272155	201,577851	23,23944822
-147,3430876	28,10719719	-167,755643	-22,87431913	-33,54916208	-17,187284	-28,7200932	-188,927944	11,5058645	-163,191271	191,847396	25,42998528
-148,8172052	18,79998503	-166,85577	-27,12204673	-43,22811123	-21,7718833	-33,34430304	-193,364518	15,6581848	-162,590732	180,906347	27,47810269
-149,7040093	9,418577929	-165,402225	-31,24171673	-53,46852347	-26,3536649	-38,5736793	-197,245311	19,7218495	-161,448281	168,684057	29,35470253

Figura 31