

Perancangan, Simulasi, dan Optimisasi Mekanisme Robot Berjalan 4-Batang dengan Langkah Setengah-Menggelinding

Erick Jovan, Juan Frederick

Pembimbing: Eko Widiatmoko, M.Si.

SMAK PENABUR Gading Serpong - Kabupaten Tangerang, Banten

ejovan2004@gmail.com, juanfrederick7@gmail.com

Bidang: Rekayasa Teknologi

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Robot digunakan dalam berbagai bidang seperti robot penjajak ranjau di militer, robot eksplorasi gunung, robot pemotong rumput, dan robot penyedot debu. Di antara jenis-jenis robot yang bisa berpindah, yang paling sering digunakan yaitu robot beroda dan berkaki.

Rumusan Masalah

Dalam perancangan robot berkaki, perlu dicari bentuk kaki dengan bentuk optimal. Terdapat dua pendekatan, yaitu kontrol posisi kaki secara langsung dengan software atau gerakan kaki yang tetap berdasarkan konstruksi geometri.

Pada robot berkaki, biasanya ujung kaki dimodelkan sebagai titik dengan permukaan kontak atau telapak yang kecil sehingga sulit digunakan pada medan yang lunak atau tidak rata. Untuk medan sulit, rantai tank dan roda besar masih menjadi pilihan utama. Sedangkan, keunggulan kaki adalah kemampuannya untuk melewati rintangan.

Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mencari bentuk geometri yang optimal pada suatu rancangan mekanisme robot berjalan menggunakan kaki yang dibuat menyerupai gerak menggelinding roda pada sebagian langkahnya untuk mendapatkan kecepatan yang konstan dan pola melangkah yang paling baik.

2. STUDI LITERATUR

Terdapat berbagai jenis robot berkaki, yaitu robot yang berkaki 2, 4, and 6 sedangkan robot berkaki 1 dan robot dengan lebih dari 8 kaki juga bisa ditemukan. Contohnya Strandbeest (binatang pantai) karya Theo Jansen yang menggunakan Jansen's Linkage. Strandbeest merupakan mekanisme yang menggunakan energi angin untuk menggerakkan linkage. Penelitian untuk mencari karakteristik dari mekanisme Jansen linkage sudah cukup banyak dilakukan [1]. Contoh lain robot yang berjalan adalah BigDog, yaitu robot dengan empat kaki yang dapat bergerak di tempat yang tidak dapat dilalui roda, dan robot-robot penerusnya [2].

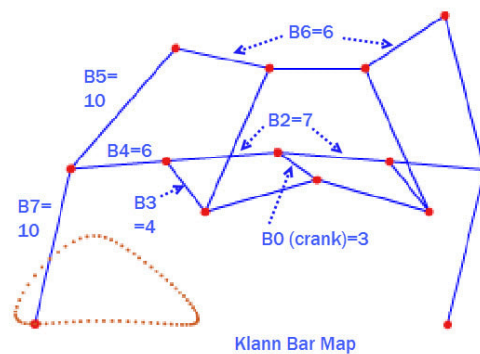
Dengan bertambahnya jumlah kaki, maka motor yang diperlukan juga bertambah. Ini menyebabkan bertambahnya degree of freedom, yang berarti gerakannya semakin fleksibel. Tetapi, penambahan motor meningkatkan kerumitan dan kesulitan untuk mengontrol robot. Salah satu cara yang digunakan untuk memperhalus cara mengontrol robot berkaki adalah dengan metode fuzzy logic [3]. Umumnya, mekanisme yang sering digunakan memiliki ujung kaki yang kecil atau telapak yang datar. Namun, untuk mengatur gerakan telapak kaki tersebut, diperlukan pegas, mekanisme tambahan atau 2 linkage yang dihubungkan dengan mekanisme jajargenjang seperti bakiak yang disarankan oleh Shigley [4].

Penggabungan linkage yang sederhana dengan bentuk kaki yang memiliki luas kontak tanah yang besar bisa menjadi suatu solusi dalam perancangan robot. Saat ini belum ditemukan penerapan linkage sederhana dengan kaki yang luas yang bisa disetarakan dengan roda kendaraan off-road. Penelitian ini berupaya menghasilkan suatu rancangan yang dapat menggabungkan linkage sederhana dengan kemampuan jalan di medan kasar dengan menggunakan bentuk kaki yang gerakannya menyerupai gerak menggelinding. Dalam perancangannya perlu dicari parameter terbaik, yang akan dicari dengan Particle Swarm Optimisation (PSO). Metode ini telah dipakai dalam beberapa perancangan geometri robot [5]

Penelitian ini berfokus pada mekanisme linkage yang digerakkan oleh satu motor. Mekanisme seperti ini memiliki derajat kebebasan (degree of freedom) berjumlah satu, artinya gerakannya hanya bisa maju atau mundur. Dalam dunia robotik, telah dirancang berbagai jenis linkage, di antaranya:

1. Klann Linkage

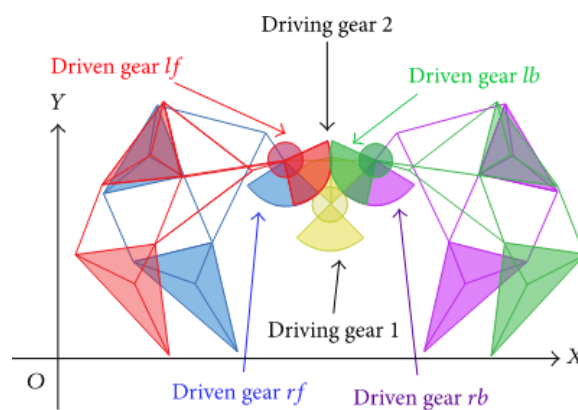
Linkage ini terdiri dari lima batang. Satu batang berperan sebagai engkol sumber gerakan, dua batang rocker yang satu ujungnya terpasang pada badan, dan dua batang penghubung. Ujung kaki pada Klann linkage bergerak dengan bentuk langkah seperti ditunjukkan Gambar 1. Ujung kaki ini menyentuh tanah selama kira-kira setengah siklus. Klann linkage telah digunakan dalam beberapa rancangan robot sederhana [6, 7].



Gambar 1: Klann linkage.

2. Jansen's linkage [8]

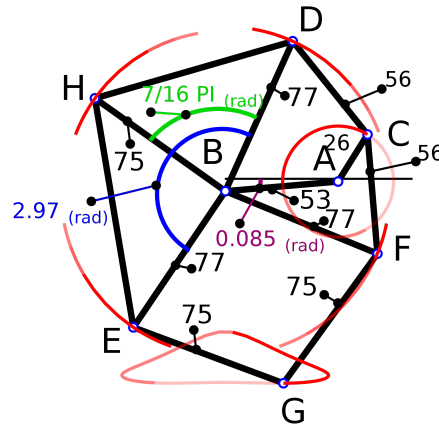
Linkage ini terdiri dari 13 batang dan 6 engsel. Rancangan ini cukup populer dan telah dicoba digunakan pada berbagai robot, mulai dari mainan hingga kursi berjalan. bentuk batang-batang pada rancangan ini menyerupai kaki makhluk yang berjalan secara alami. Rancangan Jansen's linkage ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2: Jansen's linkage

3. Ghassaei linkage [9]

Rancangan ini menghasilkan gerak langkah yang simetris, tetapi mungkin karena kerumitannya, rancangan ini belum banyak ditemukan dalam aplikasi robotik. Rancangan Ghassaei linkage ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Ghassaei linkage

4. Chebyshev lambda linkage [10, 11]

Linkage ini menghasilkan pola gerakan berjalan yang mulus dan rata, tapi letaknya berada di atas mekanisme sehingga belum ditemukan penggunaan yang efektif dari linkage ini. Rancangan Chebyshev linkage tampak pada Gambar 4.

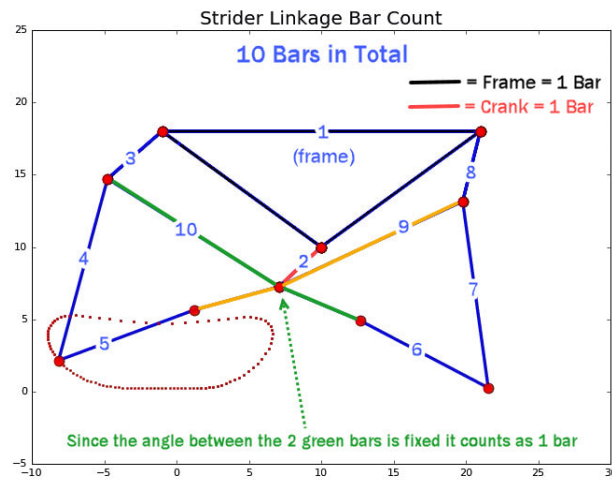


Gambar 4: Chebyshev linkage

5. Strider linkage [12]

Linkage ini terdiri dari 10 batang, yaitu 1 batang engkol, 3 batang rocker, dan 6 batang penghubung. Penerapan linkage ini relatif terbatas, baru terbuat dari LEGO. Bentuk jalan gerak ujung kaki strider linkage ditunjukkan pada Gambar 5. Dalam perancangan strider linkage sudah dicoba penggunaan ujung kaki yang

bukan berupa titik (“toes”) yang dapat meningkatkan kemulusan jalan dari mekanisme ini.



Gambar 5: Strider linkage

3. METODOLOGI

Sebagian besar robot berkaki memiliki ujung kaki yang praktis berupa satu titik. Robot lainnya memiliki telapak yang meningkatkan luas permukaan kontak tanah sehingga dapat berjalan di tanah lunak, karena tekanan berkurang.

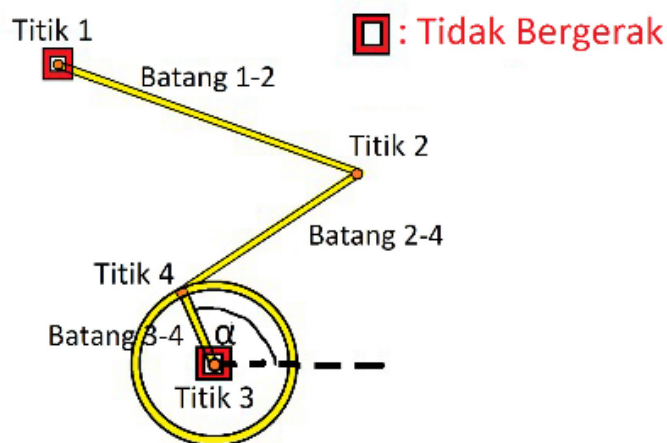
Untuk meningkatkan kemampuan sebuah robot dalam berjalan melintasi permukaan tidak rata atau lunak, maka dalam penelitian ini akan dipelajari penggunaan kaki yang berbentuk sedemikian rupa sehingga gerakannya seakan menggelinding. Diberikan nama “Rolling Step Linkage” untuk selanjutnya dalam tulisan ini.

Struktur Rolling Step Linkage

Dalam penelitian ini, dipilih struktur 4 batang yang paling sederhana yang dapat menghasilkan gerakan menyerupai langkah, yang tampak pada Gambar 6. Pada rancangan ini, titik 3 adalah poros engkol tempat sumber gerakan dan batang 3-4 adalah engkol yang berputar dengan kecepatan sudut konstan. Titik 1 terhubung dengan badan, batang 1-2 adalah rocker, dan batang 2-4 adalah batang penghubung yang akan dipasang kaki. Variabel yang menjadi parameter optimisasi ditunjukkan dalam Tabel 1.

Variabel	Penjelasan	Batas minimum	Batas maksimum
L12	Panjang batang 1-2	10	100
L24	Panjang batang 2-4	10	100
G	Jarak Tanah ke titik 3	20	100
X1	Koordinat X titik 1	-40	40
Y1	Koordinat Y titik 1	-100	-10

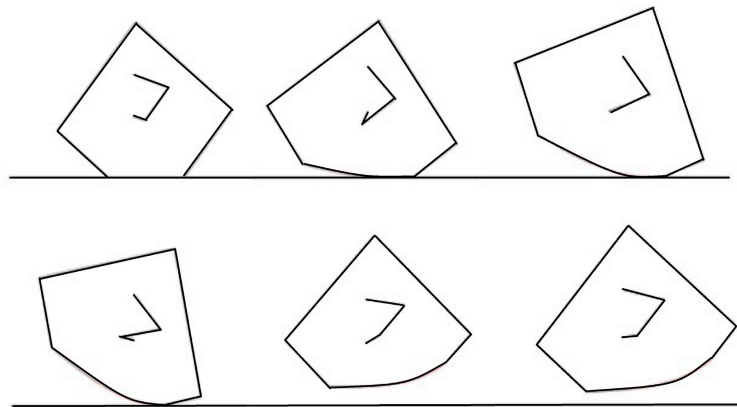
Tabel 1: Variabel yang menjadi parameter



Gambar 6: Linkage 4 batang yang digunakan dalam penelitian.

Untuk menentukan struktur dalam Rolling step, pertama ditentukan koordinat titik 1, panjang batang 1-2 (L12), dan batang 2-4 (L24). Titik 3 adalah titik origin struktur tersebut. Kemudian, titik 4 dicari dengan cara merotasi batang 3-4 sebesar sudut α terhadap titik 3. Titik 2 ditentukan dengan membuat lingkaran dengan pusat titik 1 dengan jari-jari L12, dan lingkaran dengan pusat titik 4 dengan jari-jari L24. Salah satu titik pertemuan lingkaran tersebut adalah titik 2.

Membentuk Lengkungan Kaki



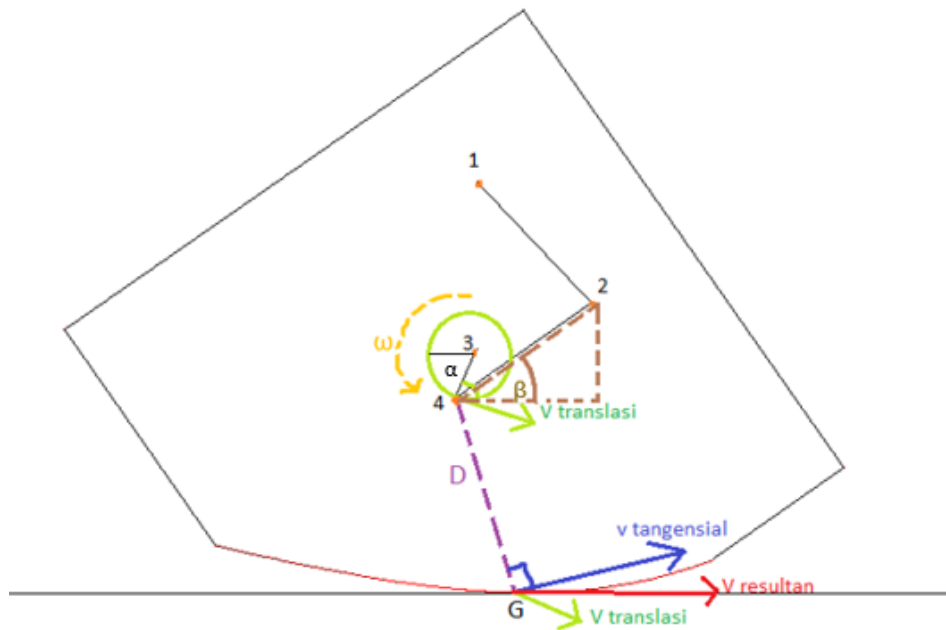
Gambar 7: Pembentukan lengkungan kaki

Suatu bentuk kaki akan dipasangkan dan ikut bergerak bersama batang 2-4, seperti tampak pada Gambar 7. Pertama dibuat kumpulan 4 titik awal yang di luar struktur dalam untuk merepresentasikan kaki linkage yang dinamakan polygon, dengan minimal 1 titik polygon berada di bawah tanah. Kedua, semua titik poligon akan bergerak mengikuti pergerakan batang 2-4. Pada setiap posisi, setiap titik-titik poligon dicek secara berurutan. Saat ditemukan adanya titik yang berada di bawah tanah, maka polygon akan dipotong sesuai dengan garis tanah. Proses ini diulangi sampai engkol menempuh satu putaran penuh dan poligon akan terbentuk menjadi bentuk kaki yang akan melangkah dengan rata.

Bagian putaran yang menyentuh tanah

Sesudah kaki dibentuk, batang 3-4 akan diputar sekali lagi. Dengan bertambahnya α , program akan mengecek adanya titik polygon yang menyentuh tanah, dengan mencari adanya titik yang memiliki koordinat-y sama seperti tanah. Kemudian, besarnya bagian dalam satu putaran yang menyentuh tanah akan diperhitungkan.

Kecepatan Linkage



Gambar 8: Diagram kinematika kaki pada Rolling step linkage.

Untuk mencari kecepatan jalan linkage yang sudah jadi, linkage akan dijalankan dan akan dihitung kecepatan sesaat setiap kali ada titik pada kaki yang menyentuh tanah. Kecepatan total akan dihitung menggunakan:

$$v = v_{x \text{ tangensial}} + v_{x \text{ translasi}}$$

Kecepatan translasi poin 4 dihitung dari $\Delta\alpha$ (diferensial dari α) dan R (panjang batang 3-4).

$$v_{\text{translasi}} = \Delta\alpha \cdot R$$

Karena nilai yang digunakan hanya nilai kecepatan yang horizontal, maka didapat rumus:

$$v_{x \text{ translasi}} = v_{\text{translasi}} \cdot \sin \alpha$$

Untuk menghitung kecepatan tangensial, akan digunakan beberapa variabel yaitu Δt (perubahan waktu), koordinat titik G (titik di mana kaki menyentuh tanah), D (jarak dari titik 4 ke G), β (sudut antara batang 2-4 dan horizontal), dan $\Delta\beta$ (diferensial dari β).

D dicari dengan menggunakan rumus Pythagoras:

$$D = \sqrt{(Y_4 - Y_G)^2 + (X_4 - X_G)^2}$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{Y_2 - Y_4}{X_2 - X_4} \right)$$

$$\Delta\beta = \beta_{i+1} - \beta_i$$

Untuk menghitung kecepatan horizontal tangensial, karena sudut garis D terhadap vertikal sama dengan sudut antara tanah dan velocity tangensial, maka dapat didapatkan rumus berikut.

$$v_{tangensial} = \Delta\beta \cdot D$$

$$v_{x tangensial} = v_{tangensial} \cdot \frac{Y_4 - Y_G}{D}$$

Jarak yang ditempuh dalam 1 langkah

Untuk mencari jarak yang ditempuh dalam 1 langkah, akan dilakukan integral dari kecepatan dari titik kontak tanah dengan kaki terhadap waktu. Untuk menghindari optimisasi yang memperbesar kaki tanpa batas untuk mencapai jarak langkah sebesar mungkin, maka jarak ini akan dibagi dengan tinggi total linkage, yaitu nilai koordinat-y titik tertinggi pada linkage terhadap tanah.

Simpangan baku kecepatan

Standard deviation suatu kecepatan akan membesar sebanding dengan kecepatan rata-rata bentuk tersebut, sehingga algoritma akan memberikan bentuk dengan kecepatan yang rendah, agar standard deviation juga rendah. Untuk mengatasi ini, standard deviation dibagi kecepatan rata-rata agar nilai sdx tidak terpengaruhi kecepatan rata-rata.

Tinggi langkah

Untuk mencari tinggi langkah, dicari jarak terdekat dari kaki dengan tanah untuk setiap nilai sudut α . Lalu, nilai terbesar dari semua data tersebut dicatat. Jarak tersebut adalah tinggi langkah.

Tinggi Linkage

Linkage yang tinggi meningkatkan jarak langkah, namun material yang dibutuhkan juga meningkat. Oleh karena itu, skor dibagi dengan tinggi linkage untuk mencegah algoritma membuat linkage yang sangat tinggi.

Posisi terendah titik 2

Dalam percobaan-percobaan awal diamati bahwa kadang-kadang titik 2 bergerak sampai menembus tanah. Kemudian, dipertimbangkan juga bahwa kurang baik jika engsel berada terlalu dekat dengan tanah. Karena itu, ditambahkan komponen penilaian yaitu jarak terdekat titik 2 terhadap tanah.

Penilaian keseluruhan

Setiap komponen penilaian diberikan bobot masing-masing, kemudian digabungkan dengan cara dikalikan. Bobot tiap komponen menjadi pangkat dari komponen itu. Nilai yang akan diminimumkan menjadi pembagi dengan cara memberikan bobot negatif, sedangkan nilai yang akan dimaksimumkan memiliki bobot positif. Komponen yang dianggap penting sehingga diberikan bobot besar adalah banyak bagian putaran yang menyentuh tanah. Perumusan nilai keseluruhan adalah sebagai berikut:

$$Skor = \prod_i s_i^{w_i}$$

Dengan komponen nilai s_i dijabarkan dalam Tabel 2.

Tabel 2: Komponen penilaian untuk optimisasi.

Komponen (i)	Penjelasan	Bobot (w_i)
1	Jarak tempuh satu langkah	2
2	Sudut fase menyentuh tanah	5
3	Tinggi langkah	1
4	Tinggi keseluruhan	-2
5	Simpangan baku kecepatan	-3
6	Posisi terendah titik 2	0.5
7	Jarak titik 1 dan 4	0.5
8	Akselerasi sudut batang 24	-0.8

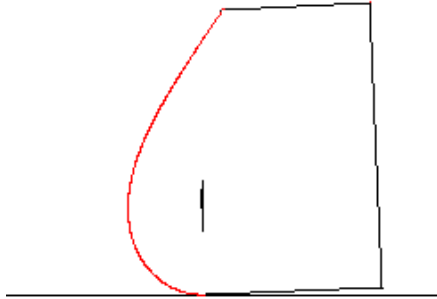
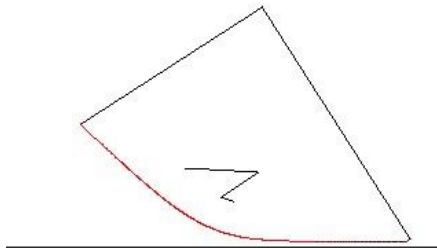
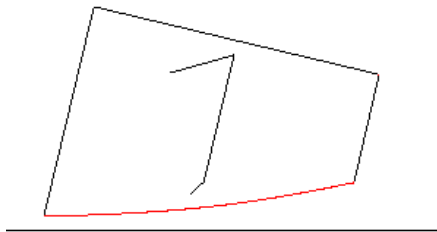
Particle Swarm Optimization[13]

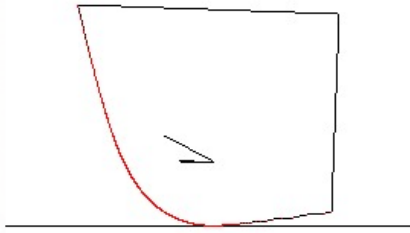
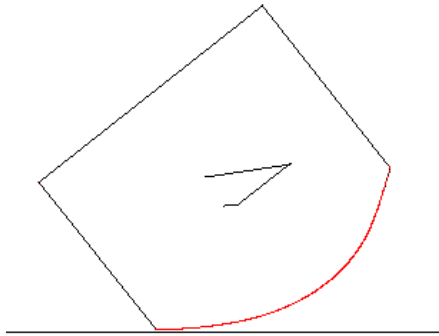
Particle swarm optimization adalah cara untuk mendapatkan nilai tertinggi menggunakan partikel. Partikel disini mewakili bentuk linkage yang dinyatakan 5 variabel. Mula mula dibuat N partikel di posisi random, lalu skor tiap partikel dihitung. Posisi setiap partikel kemudian diubah sesuai kecepatannya, dengan kecepatan diubah sesuai kecepatan sebelumnya, tambahan kecepatan ke arah posisi dengan skor terbaik global, dan tambahan kecepatan ke arah posisi terbaik yang pernah dicapai partikel. Pada setiap pengulangan, dicatat posisi partikel yang mendapatkan nilai tertinggi. Pengulangan dihentikan ketika nilai tertinggi yang dicapai tidak berubah setelah sejumlah iterasi tertentu.

4. HASIL DAN DISKUSI

Optimisasi dengan PSO berhasil dilakukan dengan 2000 partikel. PSO diberhentikan setelah nilai maksimal dari 20 iterasi terakhir konstan. Hasil berbagai optimisasi sebelumnya menunjukkan beberapa pola yang muncul, tergantung pengaturan bobot untuk masing-masing komponen. Pola-pola ini dijabarkan dalam Tabel 3.

Tabel 3: Pola yang ditemukan dengan pengaturan bobot yang berbeda.

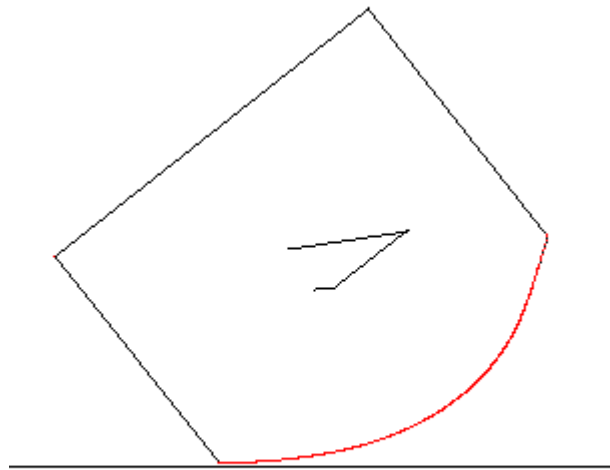
Pola	Contoh Gambar Kaki	Keterangan
Ketiga batang berimpit/ segaris		Kaki diangkat tepat ketika ketiga batang segaris, dengan percepatan sudut yang besar
Lengkungan kaki yang besar		Kaki lebar, sudut fase besar
Kaki yang terlalu lebar		Sudut fase yang menyentuh tanah menjadi sangat sedikit, dan kecepatan sangat konstan

Ujung kaki sangat tinggi		Dimensi struktur besar
Hasil paling optimal		Sudut fase besar melebihi 3.14 rad, ketiga batang tidak pernah segaris,

Hasil ini disebut Model 1 dan dijabarkan dalam Tabel 4. Wujud Model 1 ditampilkan pada Gambar 9.

Tabel 4: Parameter Model 1.

Parameter	Nilai
L12	60.6782
L24	47.3676
G	88.1454
Y1	-20.8691
X1	-12.9266

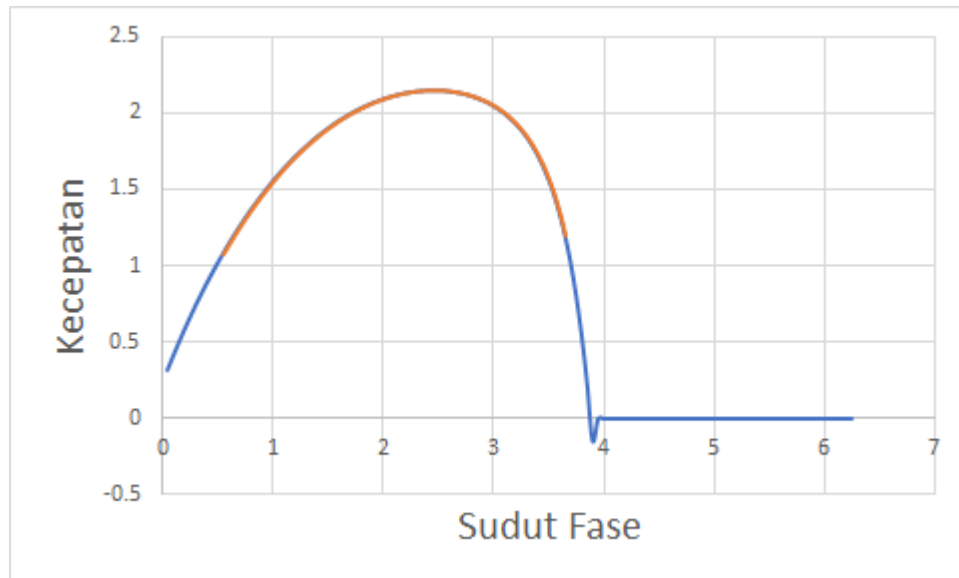


Gambar 9: Wujud Model 1.

Pada Model 1 dapat diamati hal-hal berikut:

- Sudut Fase yang menyentuh tanah = 3.85 rad
- Jarak yang ditempuh dalam satu langkah = 12.5 cm dengan crank 1 cm
- Tinggi langkah kaki = 1.97 cm
- Tinggi Linkage = 10.9 cm
- Jarak terdekat titik 1 dan titik 4 = 1.45 cm
- Posisi terendah titik 2 dari tanah = 6.68 cm

Untuk mengetahui kemulusan jalan model ini, dibuat grafik kecepatan terhadap sudut fase yang ditunjukkan pada Gambar 10. Karena hanya diperlukan fase menyentuh tanah sejauh π rad, kurva kaki dipotong sehingga hanya menyentuh tanah sejauh sekitar 3.14 rad. Dengan pemotongan ini, kecepatan bisa menjadi lebih seragam, seperti ditunjukkan dengan kurva berwarna jingga pada Gambar 10.



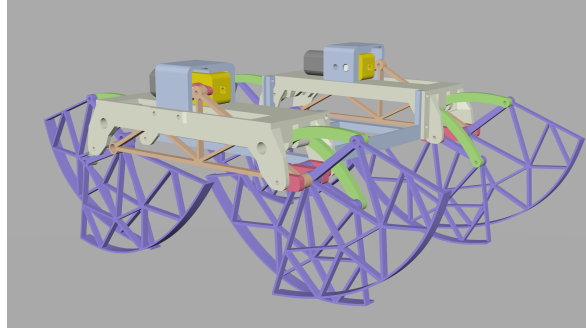
Gambar 10: Grafik kecepatan terhadap sudut fase pada Model 1. Garis jingga menandakan kecepatan dalam interval 3.14 radian yang paling mendekati datar.

Di tahap awal, ditemukan bahwa ketiga batang dapat segaris pada suatu saat pada pergerakan. Hal ini dapat mengakibatkan model yang dibuat bengkok saat dijalankan. Untuk mengatasi ini, dilakukan berbagai pendekatan. Salah satunya adalah percepatan sudut sesaat batang 2-4 dihitung dengan mengurangi dua kecepatan sudut sesaat terakhir. Percepatan sudut kemudian dimasukkan ke sistem skor dengan bobot pangkat tertentu. Setelah percepatan sudut (dinotasikan dengan `acc_angle`) dimasukkan ke sistem scoring, masalah ketiga batang segaris teratasi.

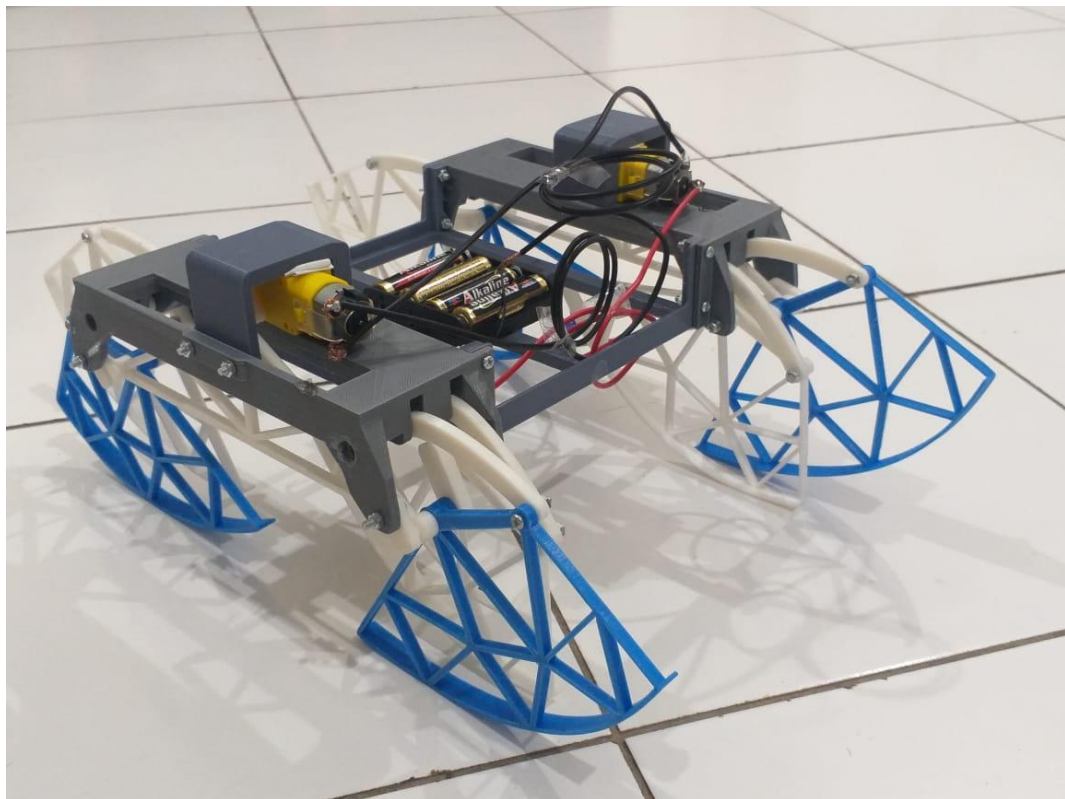
Hasil model 3 dimensi

Berdasarkan Model 1, kemudian dibuat rancangan 3 dimensi dengan Blender. Model dibuat dengan radius engkol (batang 3-4) sebesar 10 mm. Ukuran keseluruhan model adalah panjang 38 cm, lebar 25 cm, dan tinggi 15 cm. Model ini dapat bergerak dengan kecepatan 45 cm/detik. Jumlah kaki yang dibuat adalah 8, yaitu 4 di setiap sisi. Pasangan kaki depan dan pasangan belakang dihubungkan supaya bergerak bersama dengan suatu struktur segitiga yang memindahkan putaran motor ke dua poros yang sejajar. Penggerak yang dipilih adalah DC gear motor dengan spesifikasi tegangan 3-6V dan sumber tenaga yang dipakai adalah 4

baterai AA alkaline. Gambar rancangan ini ditampilkan pada Gambar 11. Model kemudian dibuat dengan pencetakan 3 dimensi (3D printing) menggunakan bahan PLA (Gambar 12). Total massa hasil pencetakan adalah 350 gram.



Gambar 11: Rancangan 3 dimensi Rolling Step linkage.



Gambar 12: Hasil pencetakan 3 dimensi.

Pengujian

Model diuji pada bidang yang keras dan datar yaitu ubin keramik. Diamati bahwa jalannya model ini cukup cepat untuk ukurannya, tidak ada selip. Ketika dijalankan di tanah, ternyata model ini masih belum dapat berjalan pada tanah,

dikarenakan dinamo yang digunakan kurang kuat untuk melawan gesekan yang besar pada tanah.

Saran

Untuk pengembangan selanjutnya, penggunaan Arduino dapat memungkinkan robot untuk bergerak di dua dimensi dengan mengendalikan sisi kanan dan kiri secara terpisah seperti tank. Peningkatan kekuatan dinamo diperlukan di masa depan untuk memungkinkan robot bergerak di berbagai medan. Penggunaan mekanisme Rolling Step juga dapat diimplementasikan pada linkage-linkage lain.

5. KESIMPULAN

Telah berhasil dirancang dan dibuat suatu linkage 4 batang sederhana dengan kaki yang dibentuk sehingga menyerupai gerakan menggelinding. Rancangan ini terbukti mampu berjalan mulus di medan datar. Namun, model saat ini tidak mampu berjalan di atas tanah karena dinamo tidak cukup kuat untuk melawan gesekan dari tanah.

Sumber

1. Ingram, A.J. 2006. *A New Type of Mechanical Walking Linkage*. Disertasi. University of Johannesburg.
2. <https://www.bostondynamics.com/legacy>
3. Atmaja, Brahmanto Utama, Harianto, Ihyaudin. 2012. *Rancang Bangun Robot Quadropod Pendeteksi Halangan Dengan Menggunakan Logika Fuzzy*. Program Studi S-1 Sistem Komputer, STIKOM Surabaya.
4. Shigley, JE. 1960. *The Mechanics of Walking Vehicles*, Land Locomotion Laboratory Report No. LL-71, U.S. Army Tank-Automotive Command, Warren, Michigan.
5. Ziqiang Zhang, Bin Chang, Jing Zhao, Qi Yang, Xingkun Liu, 2020. *Design, Optimization, and Experiment on a Bioinspired Jumping Robot with a Six-Bar Leg Mechanism Based on Jumping Stability*, Mathematical Problems in Engineering, vol. 2020, Article ID 3507203, 23 pages. <https://doi.org/10.1155/2020/3507203>
6. Farhana Mohd Isharudden et al., *Design and Prototyping of a Motorized Legged Robot with Klann Linkage Mechanism*. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 8(5), May 2020, 1941 – 1945. <http://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter77852020.pdf>

7. Sheba, Jaichandar Kulandaiaasan, Edgar Martínez-García, Mohan Rajesh Elara, Le Tan-Phuc. 2015. *Design and evaluation of reconfigurable Klann mechanism based four legged walking robot*. 1-5. 10.1109/ICICS.2015.7459939.
8. Nansai, Shunsuke, Mohan Rajesh Elara, Masami Iwase. 2013. *Dynamic Analysis and Modeling of Jansen Mechanism*. Procedia Engineering 64, 1562 – 1571.
9. Ghassaei, Amanda. 2011. *The Design and Optimization of a Crank-Based Leg Mechanism*. Thesis, Pomona College Department of Physics and Astronomy.
<https://amandaghassaei.com/files/thesis.pdf>
10. <https://demonstrations.wolfram.com/ChebyshevsLambdaMechanism/>
11. *Plantigrade Machine - Mechanisms by Tchebyshev*. <https://en.tccheb.ru/1>
12. Wade Vagle, *Strider's Linkage Dimensions and Prototype Performance*.
<https://www.diywalkers.com/strider-linkage-plans.html>
13. J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization" Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 1942-1948 vol.4, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968. <https://ieeexplore.ieee.org/document/48896>

Design, Simulation and Optimization of 4-Bar Linkage Walking Mechanism with Partial-Rolling Steps

Erick Jovan, Juan Frederick

Supervisor: Eko Widiatmoko, M.Si.

SMAK PENABUR Gading Serpong - Kabupaten Tangerang, Banten

ejovan2004@gmail.com, juanfrederick7@gmail.com

Category: Technological Engineering

1. INTRODUCTION

Background

Robots are used in various fields such as demining robots in the military, mountain exploration robots, lawn mower robots, and vacuum cleaner robots. Among the types of robots that can move, the most frequently used are wheeled and legged robots.

Problem Statement

In designing a legged robot, it is necessary to find the optimal shape of the leg. There are two approaches, namely direct foot position control with software or fixed foot movement based on geometric construction.

In legged robots, the toe is usually modeled as a point with a small contact surface or foot, making it difficult to use on soft or uneven terrain. For difficult terrain, tank chains and large wheels are still the main choice. Meanwhile, the advantage of the foot is its ability to pass obstacles.

Goal

This research aims to find the optimal geometric shape in a walking robot mechanism design using legs that are made to resemble the rolling motion of a wheel in part of its steps to obtain the best constant speed and stepping pattern.

2. STUDY OF LITERATURE

Legged robots have various numbers of legs, commonly 2, 4, and 6 legs while 1 legged robot and robots with more than 8 legs are also found. A well known

example is Theo Jansen's Strandbeest, utilizing what is later known as the Jansen's linkage. The Strandbeest is a mechanism using wind energy to drive the linkage. There are many researches to find the characteristics of the Jansen linkage [1]. Another example is BigDog, a four-legged robot which can traverse terrain impassable by wheeled robots, and its successors [2].

With more legs, the number of required motors are also increased, and subsequently the degree of freedom also increases, which means the movement is more flexible. However, additional motors also increase complexity and difficulty to control the robot. One approach to get smoother controlling is by fuzzy logic [3]. Usually, leg mechanisms have small pointed feet or small pads. To control the pads, further additional mechanisms are needed such as springs or two linkages connected together with parallelogram linkage proposed by Shigley [4].

Combining a simple linkage with a leg that has a large ground contact area can be a solution in robot design. Currently, there is no simple linkage application with broad legs that can be compared with wheels of off-road vehicles. This research seeks to produce a design that can combine simple linkage with the ability to walk on rough terrain using a leg shape that resembles a rolling motion. In the design, it is necessary to look for the best parameters, which will be sought with Particle Swarm Optimization (PSO). This method has been used in several robot geometry designs [5].

This research focuses on a linkage mechanism driven by a single motor. This mechanism has one degree of freedom, which means it can only go forward and backwards. There are several common designs with this type of linkage, which are as follows:

1. Klann Linkage

This linkage consists of five bars. One is the driving crank, two rockers which ends are connected to the body, and two connecting bars. The foot tip of the Klann linkage moves in a pattern shown in Fig. 1. This tip touches the ground for approximately half cycle. The Klann linkage is already used in several simple robot designs [6,7].

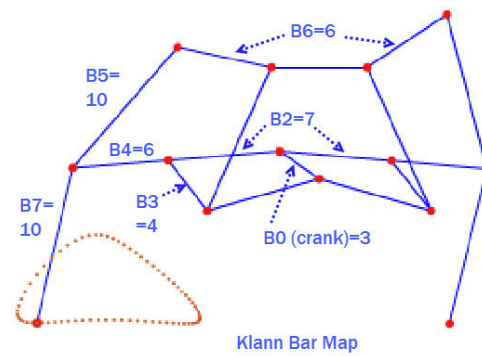


Figure 1: Klann linkage.

2. Jansen's linkage [8]

This linkage consists of 13 bars and 6 joints. This design is popular and already implemented in various robots, from toys to walking chairs. The overall shape resembles the gait of a natural walking animal. The design of Jansen's linkage is shown in Fig. 2.

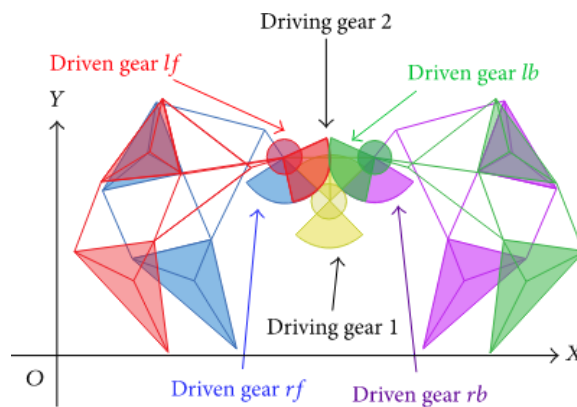


Figure 2: Jansen's linkage

3. Ghassaei linkage [9]

This design produces symmetrical stepping movement, but perhaps the complexity makes it rarely used in robotics. The design of Ghassaei linkage is shown in Fig. 3.

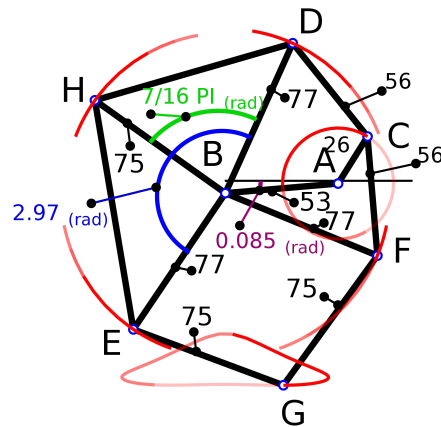


Figure 3: Ghassaei linkage.

4. Chebyshev lambda linkage [10, 11]

This linkage produces a smooth and flat walking movement, but the movement is produced above the mechanism. An effective implementation of this linkage is yet to be found. The design of Chebyshev linkage is shown in Fig. 4.



Figure 4: Chebyshev linkage

5. Strider linkage [12]

This linkage consists of 10 bars, namely 1 crank, 3 rockers, and 6 connectors. There is currently a limited implementation of this linkage, which is only made with LEGO. The foot movement of the Strider linkage is shown in Fig. 5. The designer of the Strider linkage already considered adding “toes” to the foot tip which is shown to improve the walking smoothness.

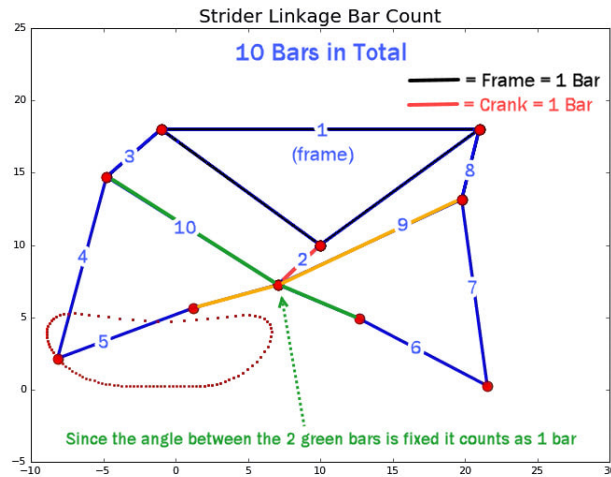


Figure 5: Strider linkage

3. METHODOLOGY

The majority of legged robots have practically one point as the foot tip. Other robots have foot pads to increase ground contact area, decreasing pressure and enabling it to walk on soft ground.

To improve the ability of a robot to traverse uneven or soft terrain, this research will study the usage of carefully shaped feet so that the stepping movement is like a rolling wheel. The concept is named “Rolling Step Linkage” in this paper.

Rolling Step Linkage Structure

In this research, a simple 4 bar linkage is chosen which can generate stepping-like movement, shown in Fig. 6. In this design, point 3 is the driving axis and bar 3-4 is the crank rotating with a constant rate. Point 1 is connected to the chassis, bar 1-2 is a rocker, and bar 2-4 is a connecting rod with the foot fixed to it. The optimization parameters are shown in Table 1.

Variable	Description	Minimum value	Maximum value
L12	Length of bar 1-2	10	100
L24	Length of bar 2-4	10	100
G	Ground height	20	100

	from point 3		
X1	X-coordinate of point 1	-40	40
Y1	Y-coordinate of point 1	-100	-10

Table 1: Optimization Parameters

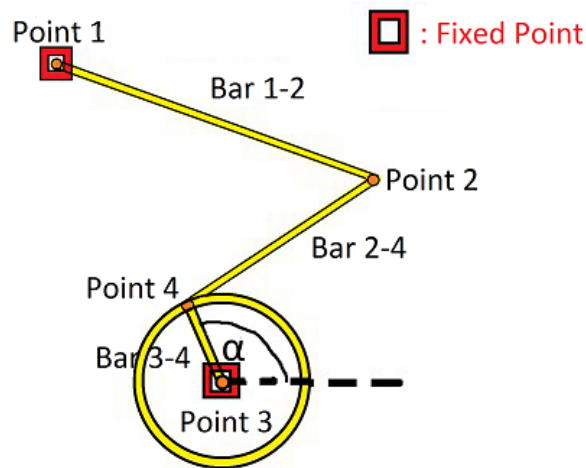


Figure 6: Four-bar linkage used in this research.

To construct the Rolling Step structure, first the coordinate of point 1, length of bars 1-2 (L_{12}) and 2-4 (L_{24}) are set. Point 3 is the coordinate origin. Point 4 location is calculated by rotating bar 3-4 for α radian with point 3 as pivot. Then, point 2 is determined by drawing a circle from center point 1 with radius L_{12} , and another circle from center point 4 with radius L_{24} . One of the intersection points of the circles is point 2.

Foot Curve Construction

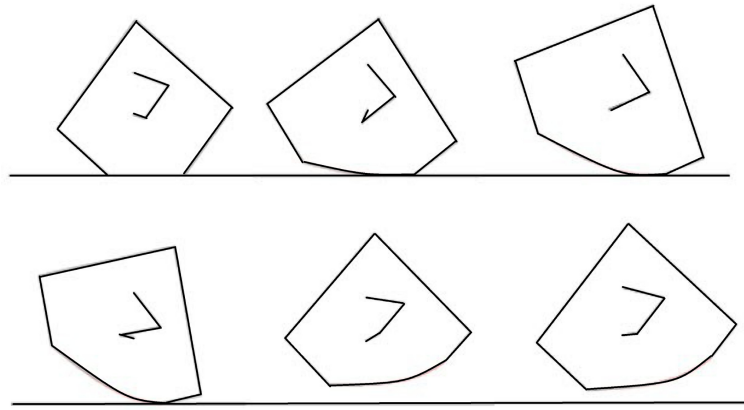


Figure 7: Steps of constructing the foot curve.

A rigid shape is attached to and moving with bar 2-4, as shown in Fig. 7. Initially 4 points represent the foot shape, named the polygon, with at least 1 point underground. Then, the polygon will move along with bar 2-4. For each time step, all points of the polygon are checked. If there are any points underground, the polygon is cut in a straight line according to the ground line. This process is repeated until the crank makes one full rotation and the polygon will take shape of the required foot shape for walking smoothly.

Ground contact phase

After the foot is shaped, bar 3-4 is rotated for another cycle. For all α steps, all points are checked whether there are any points touching the ground, by finding points that have the same y-coordinate as the ground. The portion of a cycle where the foot is in contact with ground is then calculated.

Walking Speed

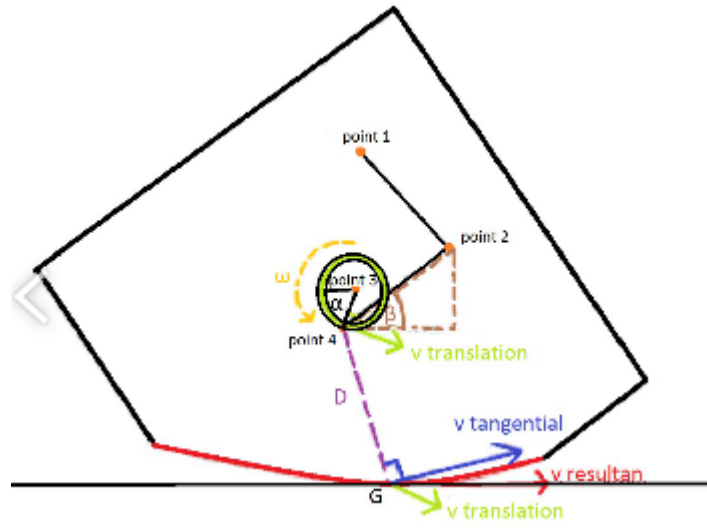


Figure 8: Kinematics diagram of the Rolling Step linkage.

To obtain the walking speed, the linkage is run and the instantaneous velocity of the ground contact point is calculated. The instantaneous velocity is calculated by:

$$v = v_{x \text{ tangential}} + v_{x \text{ translation}}$$

Translational velocity of point 4 is calculated from $\Delta\alpha$ (differential of α) and R (length of bar 3-4).

$$v_{\text{translation}} = \Delta\alpha \cdot R$$

Since only horizontal component of the velocity is needed, we get:

$$v_{x \text{ translation}} = v_{\text{translation}} \cdot \sin \alpha$$

Tangential velocity is calculated from Δt (change in time), coordinates of point G (ground contact point), D (distance from point 4 to G), β (angle of bar 2-4 from horizontal), and $\Delta\beta$ (differential of β).

D is found using Pythagoras' formula:

$$D = \sqrt{(Y_4 - Y_G)^2 + (X_4 - X_G)^2}$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{Y_2 - Y_4}{X_2 - X_4}\right)$$

$$\Delta\beta = \beta_{i+1} - \beta_i$$

To calculate horizontal component of tangential velocity, because the angle which line D makes with horizontal is the same as the angle between ground line and tangential velocity, the following equation is formed:

$$v_{\text{tangential}} = \Delta\beta \cdot D$$

$$v_{x \text{ tangential}} = v_{\text{tangential}} \cdot \frac{Y_4 - Y_G}{D}$$

Distance travelled in 1 cycle

The distance travelled in one step is calculated by integrating the instantaneous velocity of the ground contact point. To avoid the optimization program maximizing this distance by enlarging the foot without limit, this distance is divided by the linkage's total height, which is the highest y-coordinate of the linkage calculated from the ground.

Velocity standard deviation

Standard deviation of speed will increase proportionally with the average speed of the linkage, so the algorithm will create shape with low velocity, to minimize the standard deviation. To overcome this, the standard deviation is divided by the average velocity so that the sdx value is not affected by the average velocity.

Step height

To calculate the step height, for every α the closest distance of the foot to the ground is searched. The maximum value of that distance is then taken as step height.

Linkage Height

A tall linkage increases the step distance, but it also increases the material needed to make the linkage. Therefore, the score is divided by the linkage height to prevent the algorithm from making a tall linkage.

Lowest position of point 2

In initial tries, it is observed that sometimes point 2 moves underground. It is later considered that a joint moving near the ground is not desirable. Therefore, the closest distance of point 2 to ground is included in the scoring system.

Overall scoring system

Every scoring component is given individual weights, then is combined by calculating the product. Weight of every component is the power of the component concerned. Components that want to be minimized are the denominator of the score, by assigning negative weights. Components that want to be maximized are assigned with positive weight. Important component so that it is assigned with large weight is the phase angle that hits the ground. Formulation of score is as follows:

$$Score = \prod_i s_i^{w_i}$$

With the component values of s_i are described in Table 2.

Table 2: Scoring components for optimization.

Component (i)	Description	Weight (w_i)
1	Distance travelled in one step	2
2	Ground contact phase	5
3	Step height	1
4	Overall height	-2
5	Velocity standard deviation	-3
6	Lowest position of point 2	0.5
7	Distance between point 1 and 4	0.5

8	Angular acceleration of bar 24	0.8
---	--------------------------------	-----

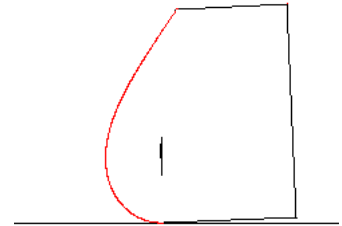
Particle Swarm Optimization [13]

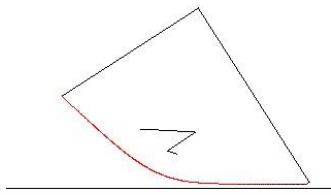
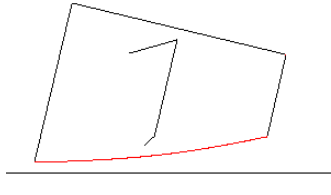
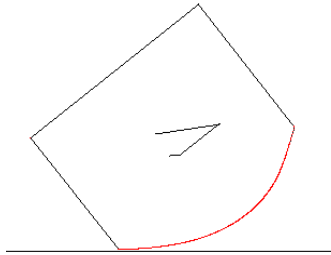
Particle swarm optimization is a method to get the highest score with particles. Particles resemble a linkage shape that is represented with 5 variables. Firstly, N particles are made in random positions then every particles' score is calculated. Position of every particle is then changed according to its speed, with the speed changed according to its previous speed, added to the speed with direction towards the position of the particle with the global best score, and also added with the speed with direction towards the position of the particle's personal best. In every iteration, the position of the particle with the highest score is noted. Iteration is stopped when the highest score doesn't change after a set amount of iterations.

4. RESULTS AND ANALYSIS

Optimization with PSO is successfully done with 2000 particles. PSO is stopped after the maximum score from the last 20 iterations is constant. Results from previous iterations show several patterns, depending on the weight of every component. This pattern is explained in Table 3.

Table 3: Different shapes found with various scoring weight settings.

Pattern	Weight	Note
The three bars coincide		The foot is lifted moments after the 3 bars coincide, with large angular acceleration

Large curvature of the foot		Wide foot, large phase angle
The foot is too wide		The total phase angle that touches the ground becomes very little
Best shape		Large phase angle over 3.14, no bars coincide.

This result is named Model 1 and is described in Table 4. Shape of Model 1 is shown in Fig. 9.

Table 4: Parameters of Model 1.

Parameter	Score
L12	60.6782
L24	47.3676
G	88.1454
Y1	-20.8691
X1	-12.9266

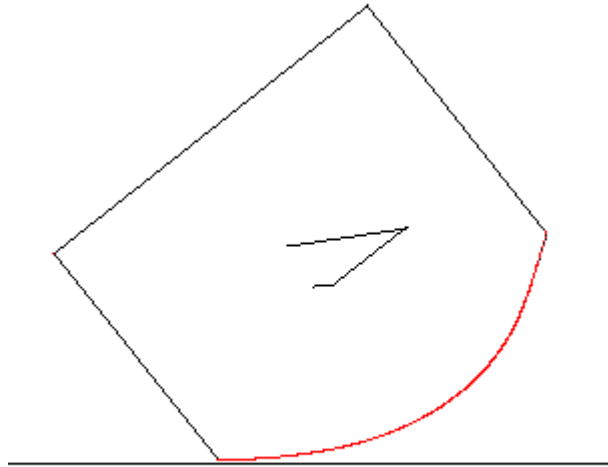


Figure 9: Model 1.

In Model 1, it is observed that:

- Phase angle that is in contact with the ground = 3.85 rad
- Distance travelled in one step: 12.5 cm with 1 cm crank
- Step height = 1.97 cm
- Linkage height = 10.9 cm
- Closest distance between point 1 and point 4 = 1.45 cm
- Lowest position of point 2 from ground = 6.68 cm

To observe the smoothness of the walk of this model, velocity over phase angle graph is made, which is shown in Fig. 10. Because the phase angle needed is only π rad, the feet curve is cut so it only touches the ground for just 3.14 rad. With this cut, the speed could be more uniform, which is shown with the orange part of the curve shown in Fig. 10.

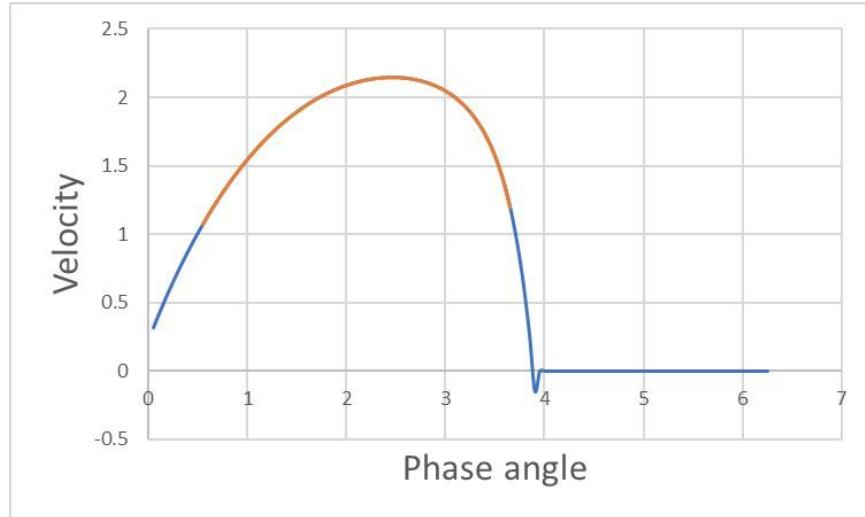


Figure 10: velocity to phase angle graph of Model 1. Orange line shows the most constant speed in interval 3.14 radian.

In early stages, it is found that the three rods can be in line at one moment in the movement. This could result in bending of the linkage when the constructed model is run. To overcome this, various approaches were taken. One of which is by calculating the instantaneous angular acceleration of bar 2-4, calculated by subtracting two last instantaneous angular acceleration. Angular acceleration is then used to calculate the scoring system with a certain power assigned to it. After angular acceleration (denoted with acc_angle) is calculated in the scoring, the problem of the three bars being inline is solved.

Implementation

Based on Model 1, a 3D design was made using Blender. The model has a crank radius (bar 3-4) of 10 mm. Overall size is 38 cm length, 25cm width, and 15 cm height. The total number of legs of the robot is 8, with 4 legs on each side. Front and rear leg pairs move synchronously with means of a triangle structure to translate the motor rotation to 2 other parallel axes. The motion source is a DC gear motor with 3-6V voltage specification for each side, powered from 4 alkaline AA batteries. The design is shown in Figure 11. The model was then fabricated by 3D printing from PLA material (Figure 12). Total printed mass is 350 grams.

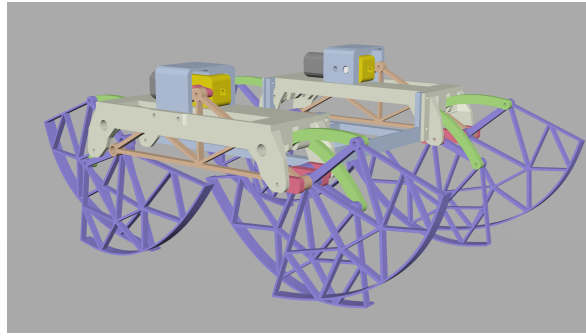


Figure 11: 3D design of the Rolling Step model.

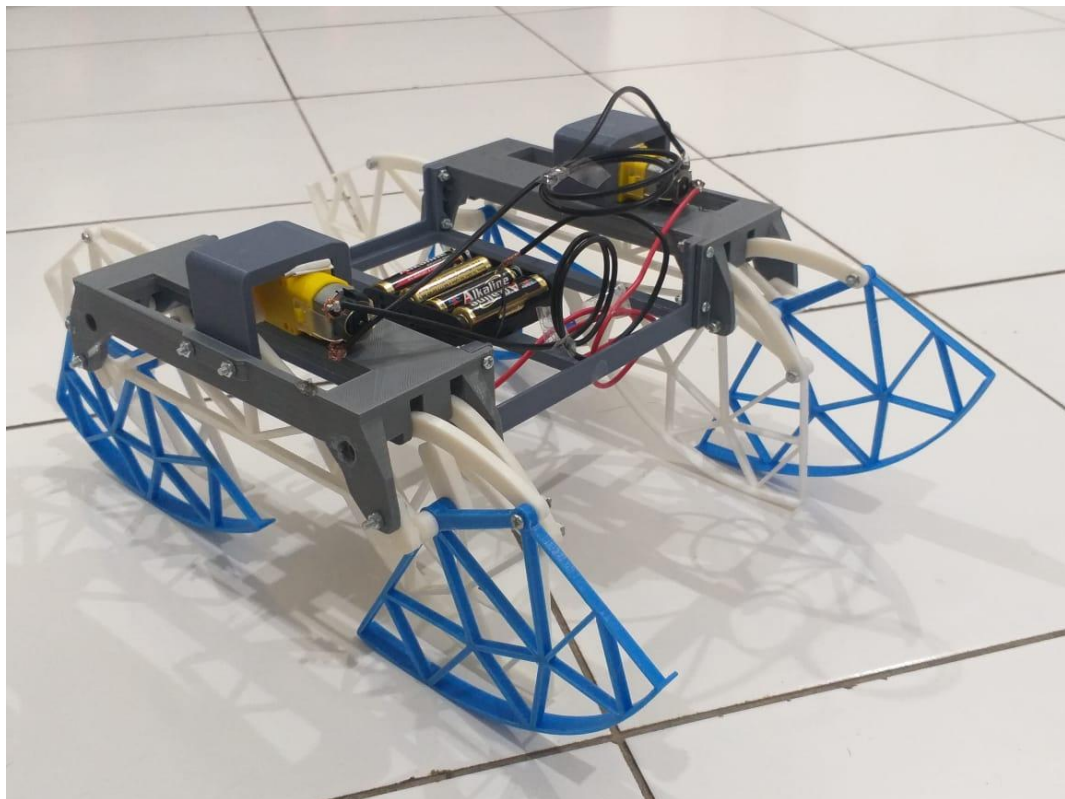


Figure 12: The Rolling Step model.

Performance

We tried to run the model on a hard, flat surface (ceramic tiles). It walks reasonably fast for its size without slipping. On dirt, it turned out that the current model is not capable of walking on dirt because the motor is not sufficiently powerful to overcome the high friction from the ground.

Future Works

For improvements, addition and usage of Arduino is possible to enable the robot to move in two dimensions by separately controlling left and right side like a tank. Increasing the power output is also necessary to enable the model to move in rougher terrains. The Rolling Step mechanism could also be applied to other linkages.

5. CONCLUSION

A simple 4 bar linkage which resembles rolling motion has been designed, manufactured, and tested. The design is proven to be capable of walking smoothly across flat, level terrain. However, the current model is not capable of walking on dirt because the dynamo is not sufficiently powerful to overcome the friction from the ground.

REFERENCES

1. Ingram, A.J. 2006. *A New Type of Mechanical Walking Linkage*. Disertasi. University of Johannesburg.
2. <https://www.bostondynamics.com/legacy>
3. Atmaja, Brahmento Utama, Harianto, Ihyaudin. 2012. *Rancang Bangun Robot Quadropod Pendeteksi Halangan Dengan Menggunakan Logika Fuzzy*. Program Studi S-1 Sistem Komputer, STIKOM Surabaya.
4. Shigley, JE. 1960. *The Mechanics of Walking Vehicles*, Land Locomotion Laboratory Report No. LL-71, U.S. Army Tank-Automotive Command, Warren, Michigan.
5. Ziqiang Zhang, Bin Chang, Jing Zhao, Qi Yang, Xingkun Liu, 2020. *Design, Optimization, and Experiment on a Bioinspired Jumping Robot with a Six-Bar Leg Mechanism Based on Jumping Stability*, Mathematical Problems in Engineering, vol. 2020, Article ID 3507203, 23 pages. <https://doi.org/10.1155/2020/3507203>
6. Farhana Mohd Isharuddin et al., *Design and Prototyping of a Motorized Legged Robot with Klann Linkage Mechanism*. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 8(5), May 2020, 1941 – 1945. <http://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter77852020.pdf>
7. Sheba, Jaichandar Kulandaiaasan, Edgar Martínez-García, Mohan Rajesh Elara, Le Tan-Phuc. 2015. *Design and evaluation of reconfigurable Klann mechanism based four legged walking robot*. 1-5. 10.1109/ICICS.2015.7459939.
8. Nansai, Shunsuke, Mohan Rajesh Elara, Masami Iwase. 2013. *Dynamic Analysis and Modeling of Jansen Mechanism*. Procedia Engineering 64, 1562 – 1571.

9. Ghassaei, Amanda. 2011. *The Design and Optimization of a Crank-Based Leg Mechanism*. Thesis, Pomona College Department of Physics and Astronomy.
<https://amandaghassaei.com/files/thesis.pdf>
10. <https://demonstrations.wolfram.com/ChebyshevsLambdaMechanism/>
11. *Plantigrade Machine - Mechanisms by Tchebyshev*. <https://en.tccheb.ru/1>
12. Wade Vagle, *Strider's Linkage Dimensions and Prototype Performance*.
<https://www.diywalkers.com/strider-linkage-plans.html>
13. J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization" Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 1942-1948 vol.4, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968. <https://ieeexplore.ieee.org/document/48896>