



Technische  
Universität  
Braunschweig

BACHELOR THESIS

# Motion Planning for Reconfigurable Magnetic Modular Cubes in the 2-Dimensional Special Euclidean Group

Kjell Keune

Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund

Supervised by  
Prof. Dr. Aaron T. Becker

February 20, 2023



### **Statement of Originality**

This thesis has been performed independently with the support of my supervisor/s. To the best of the author's knowledge, this thesis contains no material previously published or written by another person except where due reference is made in the text.

Braunschweig, February 20, 2023

---



# Aufgabenstellung / Task Description

**Deutsch:** Um spezifische Aufgaben besser zu bewältigen, lassen sich modulare, rekonfigurierbare Roboter zu größeren Strukturen zusammensetzen und wieder auseinandernehmen. Magnetic-modular-cubes sind skalierbare Einheiten, bei welchen Permanentmagneten in einen würfelförmigen Körper eingebettet sind. Diese Einheiten zählen als rekonfigurierbare Roboter, obwohl sie selber keine Logik oder Stromversorgung beinhalten. Stattdessen lassen sich diese durch ein externes, gleichmäßiges und sich zeitlich änderndes Magnetfeld steuern. Durch diese Steuerung können die magnetic-cubes auf der Stelle gedreht oder durch pivot-walking nach rechts und links bewegt werden. Obwohl sich das Magnetfeld auf alle Einheiten gleichermaßen auswirkt, kann durch Kollision mit der Arbeitsflächenbegrenzung eine Änderung der Anordnung bewirkt werden. Befinden sich zwei magnetic-cubes nah genug beieinander können sich diese durch die Permanentmagneten miteinander verbinden und so Polyominos als größere Strukturen aufbauen, welche auf die gleiche Weise wie einzelne cubes gesteuert werden können. Frühere Arbeiten betrachteten das "tilt-model", bei welchem sich Strukturen jeder Größe mit gleicher Geschwindigkeit in ganzzahligen Schritten und mit ausschließen 90° Drehungen bewegen lassen.

Herr Keunes Aufgabe in dieser Bachelorarbeit ist es, einen motion-planner für die beschriebenen magnetic-cubes zu entwerfen, welcher mit beliebigen Positionen und Rotationen umgehen kann. Dabei ist es erforderlich, eine Simulationsumgebung zu schaffen, welche die kinetischen und dynamischen Eigenschaften der magnetic-cubes repliziert. Es soll ein lokaler motion-planner entwickelt werden, um zwei Polyominos an gewünschten Kanten zu verbinden. Dieser local-planner soll Heuristiken und optimale Bewegungsabläufe mit möglichst wenig Schritten realisieren. Ebenfalls soll dieser global eingesetzt werden, um Bewegungsabläufe zu finden, die gewünschte Polyominos aus einer zufällig gegebenen Startkonfiguration erzeugen. Ein interessantes Ergebnis wird es sein, zu sehen, wie gut Probleminstanzen dieser Art in der Realität gelöst werden können und welche Parameter die gravierendsten Auswirkungen auf die Schwierigkeit von motion-planning Problemen haben.

**English:** Reconfigurable modular robots can dynamically assemble/disassemble to better accomplish a desired task. Magnetic modular cubes are scalable modular subunits with embedded permanent magnets in a 3D-printed cubic body. These cubes can act as reconfigurable modular robots, even though they contain no power, actuation or computing. Instead, these cubes can be wirelessly controlled by an external, uniform, time-varying magnetic field. This control allows the cubes to spin in place or pivot walk to the left or right direction. Although the applied magnetic field is the same for each

magnetic modular cube, collisions with workspace boundaries can be used to rearrange the cubes. Moreover, the cubes magnetically self-assemble when brought in close proximity of another cube, and form polyominoes, which can be controlled the same way as single cubes. Related work has considered the “tilt model,” where similar cubes and polyominoes move between integer positions, all move at the same speed, and only rotate by 90 degree steps.

In his thesis, Mr. Keune’s task is to design a motion planner for magnetic cubes that can assume arbitrary positions and orientations in the workspace. This requires designing a simulation environment that replicates the kinematics and dynamics of magnetic cubes. He will design local planners for moving two polyominoes to assemble at desired faces. Designing the local planner includes heuristics and computing optimal motion plans that minimize the number of steps. The local planner will be used to search for global planning sequences to generate desired polyominoes from a given starting configuration. One exciting outcome will be studying how well instances can be solved in practice and analyzing which parameters have the most significant effect on the difficulty of the motion planning problem.

# Abstract

Abstract [1] [3] [2]





# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Related Work . . . . .	1
1.2	Contribution . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Preliminaries</b>	<b>3</b>
2.1	Metrics . . . . .	3



# 1 Introduction

Motivation, applications...

## 1.1 Related Work

Motion planning is a crucial subject in the field of robotics. The goal is to change the initial state of a robot to a desired goal state, by performing actions which the robot is capable of. The state of the system is also called a configuration and all possible configurations a robot can be in is defined as the configuration-space. The dimension of the configuration-space gains rapidly in complexity by increasing the number of robots and static obstacles. It becomes necessary to avoid collision between those. It is difficult to engineer algorithms that explore these huge configuration-spaces and provide a sequence of actions to perform to reach the goal configuration or report failure, if the configuration is not reachable. A lot of research was done on motion planning for a great overview and detailed description of concepts you can see [3] and [4].

## 1.2 Contribution



## **2 Preliminaries**

### **2.1 Metrics**



# Bibliography

- [1] A. Becker, E. D. Demaine, S. P. Fekete, G. Habibi, and J. McLurkin. Reconfiguring massive particle swarms with limited, global control. In P. Flocchini, J. Gao, E. Kranakis, and F. Meyer auf der Heide, editors, *Algorithms for Sensor Systems*, pages 51–66, Berlin, Heidelberg, 2014. Springer Berlin Heidelberg.
- [2] A. Bhattacharjee, Y. Lu, A. T. Becker, and M. Kim. Magnetically controlled modular cubes with reconfigurable self-assembly and disassembly. *IEEE Transactions on Robotics*, 38(3):1793–1805, 2022.
- [3] S. M. LaValle. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2006. Available at <http://planning.cs.uiuc.edu/>.
- [4] A. Mueller. Modern robotics: Mechanics, planning, and control [bookshelf]. *IEEE Control Systems Magazine*, 39(6):100–102, 2019.