

DISS. ETH NO. 25728

MATERIALS-BASED DESIGN OF AUTONOMOUS MACHINES
USING 4D PRINTING

A dissertation submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

TIAN CHEN

Master of Science, Delft University of Technology
Bachelor of Applied Science, University of Toronto

born on December 31, 1987
citizen of Canada

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Kristina Shea, examiner
Prof. Dr. Chiara Daraio, co-examiner
Prof. Dr. Paolo Ermanni, co-examiner

2019

ABSTRACT

The concept of “The Material Is the Machine” as proposed by Bhattacharya and James refers to the design of tiny machines where the motors and power supplies are inherently replaced by the self-reconfiguring ability of the functional material. When these materials are used in conjunction with 3D printing in a concept known as 4D printing, there is the potential to extend the aforementioned concept to polymeric machines with significant complexity and tunability on the macro-scale.

4D printing refers to 3D printing of designs that transform over time when exposed to certain stimuli. Thus far, the concept of 4D printing has been applied primarily in shape reconfiguration. Functionalities useful to mechanical engineering systems are less explored. This thesis investigates the design of mechanical systems to achieve autonomous functional transformation using a materials-based approach. In particular, it identifies and addresses the following technical gaps between the current state-of-the-art, e.g. shape reconfigurable systems, and future material-based autonomous machines.

- Current reconfigurable systems are not in static equilibrium after shape transformation. The transformed geometries and load-bearing capacity is difficult to predict.
- In dynamic systems, rudimentary functions such as material-based propulsion has not been addressed.
- Little connection has been made between 4D printing and mechanical design, i.e. material-based analogs do not exist for components such as actuators and power supplies.
- Few computational design methods exist for the algorithmic generation of complex 4D printed systems.
- Design guidelines and proof-of-concept solutions are lacking for 4D printed machines that solve current engineering challenges.

The principle of mechanical bistability is exploited to achieve large stable shape reconfiguration as bistable mechanisms inherently possess two equilibrium states. A 3D printed Shape Memory Polymer (SMP) is characterized and used to provide power for autonomous transformation. By combining the two, autonomous deployment of structures and autonomous propulsion of robots are demonstrated. In these works, the functionalities of mechanical components such as actuators, power sources and controllers are encoded within the constituting materials. The timing and sequence of the transformations are tunable and controlled through material composition and design dimensions.

Moving beyond proof-of-concept demonstrations, scalability and modularity are studied as a necessary step towards tackling complex engineering problems. A computational method is proposed for the inverse problem of designing a flat modular surface that deploys to assume

given target shapes. As a demonstration, two doubly-curved target surfaces are achieved from a single flat 3D printed multi-stable designs. As a credible solution to an existing engineering challenge, a self-deploying solar panel is demonstrated. Fabricated entirely using a 3D printer, the solar panel is able to achieve an area expansion ratio of ten times in under 40 seconds.

The demonstrated principles are not limited to snap-through bistability or shape memory polymers. With advances in material science and fabrication technologies, it is expected that functional materials become more efficient and the printing resolution and speed increases. Similarly, advanced computational methods and deeper understanding of mechanics will enable new types of functional transformation. This is the first work towards a material-based design approach using 4D printing for the next generation of mechanical systems.

ZUSAMMENFASSUNG

Das von Bhattacharya und James vorgeschlagene Konzept von "The Material Is the Machine" bezieht sich auf das Design winziger Maschinen, bei denen Motoren und Stromversorgungen von Natur aus durch die Fähigkeit zur Selbstkonfiguration des konstituierenden Materials ersetzt werden. Wenn diese Materialien in Verbindung mit dem 3D-Druck in einem als 4D-Druck bekannten Konzept verwendet werden, besteht die Möglichkeit, das vorgenannte Konzept auf polymere Maschinen mit erheblicher Komplexität im Makromaßstab auszuweiten.

4D-Drucken bezieht sich auf das 3D-Drucken von Designs, die sich im Laufe der Zeit verändern, wenn sie bestimmten Reizen ausgesetzt sind. Bisher wurde das Konzept des 4D-Drucks vor allem bei der Formkonfiguration angewendet. Funktionen, die für Maschinenbausysteme nützlich sind, werden weniger erforscht. Diese Dissertation untersucht den Entwurf mechanischer Systeme, um mithilfe eines materialbasierten Ansatzes eine autonome funktionelle Transformation zu erreichen. Insbesondere werden die folgenden technischen Lücken zwischen dem gegenwärtigen Stand der Technik, z. rekonfigurierbare Systeme und zukünftige materialbasierte Maschinen.

- Derzeit rekonfigurierbare Systeme befinden sich nach der Formtransformation nicht im statischen Gleichgewicht. Die transformierten Geometrien und die Tragfähigkeit sind schwer vorherzusagen.
- In dynamischen Systemen wurden rudimentäre Funktionen wie der Antrieb auf Materialbasis nicht angesprochen.
- Es wurde kaum Verbindung zwischen 4D-Druck und mechanischem Design hergestellt, d. H. Keine materialbasierten Analoga für Komponenten wie Aktuatoren oder Stromversorgungen.
- Für die algorithmische Erzeugung komplexer 4D-Drucksysteme gibt es nur wenige Berechnungsmethoden.
- Konstruktionsrichtlinien und Proof-of-Concept-Lösungen für gedruckte 4D-Maschinen, die die realen technischen Herausforderungen meistern, fehlen.

Das Prinzip der mechanischen Bistabilität wird genutzt, um eine stabile Rekonfiguration der Form zu erreichen, da bistabile Mechanismen von Natur aus zwei Gleichgewichtszustände besitzen. Ein 3D-gedrucktes Shape Memory Polymer (SMP) wird charakterisiert und verwendet, um Energie für die autonome Transformation bereitzustellen. Durch die Kombination dieser beiden Elemente wird der autonome Einsatz von Strukturen und der autonome Antrieb von Robotern demonstriert. In diesen Werken werden die Funktionalitäten mechanischer Komponenten wie Aktuatoren, Stromquellen und Steuerungen in den konstituierenden Materialien

codiert. Das Timing und die Reihenfolge der Transformationen werden durch Materialzusammensetzung und Abmessungen gesteuert.

Abgesehen von Proof-of-Concept-Demonstrationen werden Skalierbarkeit und Modularität als notwendiger Schritt zur Bewältigung komplexer Engineering-Probleme untersucht. Für das inverse Problem des Entwurfs einer flachen modularen Oberfläche, die sich entfaltet, um vorgegebene Zielformen anzunehmen, wird eine rechnerische Lösung vorgeschlagen. Zur Demonstration werden zwei doppelt gekrümmte Zielflächen aus einem einzigen flachen, 3D-gedruckten, multistabilen Bogen erzielt. Als glaubwürdige Lösung für eine bestehende technische Herausforderung wird ein selbstaufstellendes Solarpanel demonstriert. Das Solarpanel, das vollständig mit einem 3D-Drucker hergestellt wurde, kann in zehn Sekunden ein Flächenausdehnungsverhältnis von zehn Mal erreichen.

Die aufgezeigten Prinzipien sind nicht auf Durchschnapp-Bistabilität oder Formgedächtnispolymere beschränkt. Mit den Fortschritten in der Materialwissenschaft und den Fertigungstechnologien wird erwartet, dass Funktionsmaterialien effizienter werden und die Druckauflösung und -geschwindigkeit zunehmen. In ähnlicher Weise ermöglichen fortschrittliche Computer-Tools und ein tieferes Verständnis der Mechanik neue Arten der funktionalen Transformation. Vielmehr ist dies die erste Arbeit an einem materialbasierten Designansatz für die nächste Generation mechanischer Systeme.