

Unterschiedliche Spezialisierung der Mistkäferextremitäten zum Laufen

Nienke N. Bijma¹, Poramate Manoonpong², Stanislav N. Gorb¹

¹ Funktionelle Morphologie und Biomechanik, Zoologisches Institut,
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

² Embodied AI and Neurorobotics Lab, Centre for BioRobotics, The Mærsk Mc-Kinney
Møller Institute, University of Southern Denmark; Bio-inspired Robotics and Neural
Engineering Lab, School of Information Science & Technology, Vidyasirimedhi
Institute of Science & Technology

Summary

During the last decades, the interest in the development of bio-inspired robots has increased. However, many of those robots differ in their leg design and leg trajectories from their biological prototypes. While most hexapod robots exhibit identical leg design, the leg pairs of insects differ from each other. In order to perform complex behavior, labour division between the legs is needed. To understand which structural features allow dung beetles to exhibit complex behavioral repertoire, we investigate the leg kinematics of the dung beetle *Geotrupes stercorarius* and discuss the correlation between their structural features and kinematic performance. In this study, we show that already simple tasks such as walking along flat surfaces require labour division between the legs. With an increased complexity of tasks, such as burrowing and dung transportation, the labour division between the legs will presumably get even more pronounced.

Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten ist das Interesse an biologisch inspirierten Robotern stetig gewachsen und die Entwicklung von immer mehr Biorobotern wurde stark vorangetrieben. Dennoch unterscheiden sich viele dieser Roboter durch sehr starke Abstraktion von ihren biologischen Vorbildern. Während die meisten Hexapod-Roboter identische Gliedmaßen besitzen, begünstigt gerade die unterschiedliche Adaption der einzelnen Beinpaare bei Insekten ihre Vielseitigkeit. Um zu entschlüsseln, welche morphologischen Anpassungen es den Mistkäfern ermöglichen, solch ein komplexes Verhaltensrepertoire aufzuweisen, untersuchen wir die kinematischen Eigenschaften des Bewegungsapparates des gemeinen

Mistkäfers *Geotrupes stercorarius* und diskutieren den Zusammenhang zwischen den strukturellen und den mechanischen Eigenschaften. Wir konnten zeigen, dass bereits bei einfacher Fortbewegung auf einer ebenen Oberfläche klare Unterschiede bezüglich des Bewegungsablaufes zwischen den Beinpaaren zu erkennen sind. Diese Arbeitsteilung zwischen den Gliedmaßen wird jedoch mit steigender Komplexität der Aufgabe immer ausgeprägter.

Einleitung

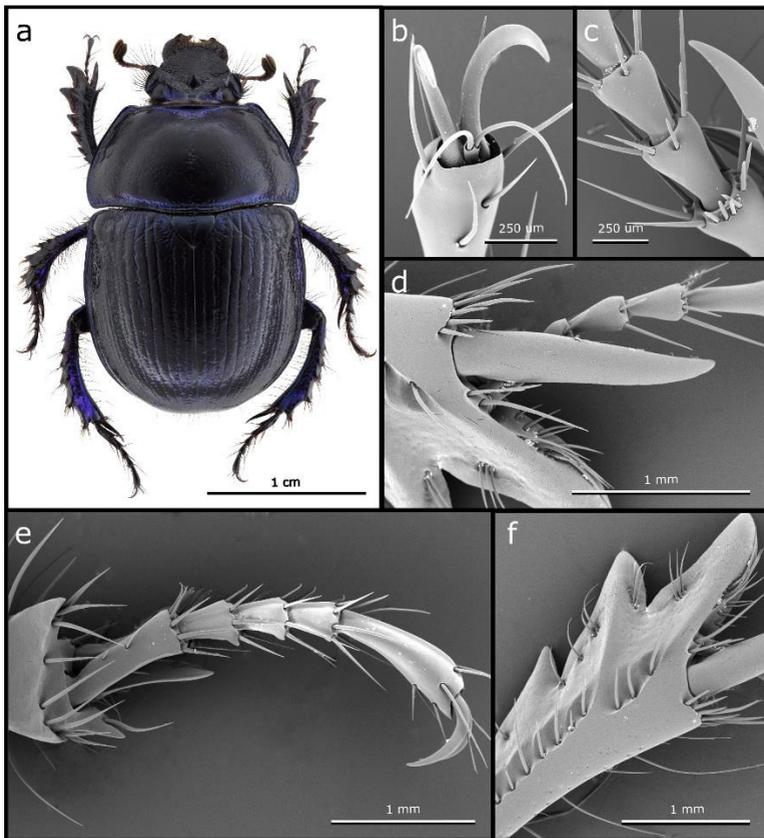


Abb. 1: Übersichtsbild (a) und rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (b-f) der Tibia und des Tarsus von *Geotrupes stercorarius*. Fordere Extremität mit Sägezahn artigen Strukturen (b-d, f), mittlere Extremität (e).

Während Insekten sich mühelos durch unterschiedliches Terrains bewegen, stellt eben diese Aufgabe Roboter immer noch vor eine große Herausforderung. Denn auch heutzutage agieren die meisten Roboter in einer sehr definierten Umgebung und die reale Welt mit ihrer Unberechenbarkeit stellt immer noch eine große Herausforderung dar [1]. Daher bieten Insekten, die sich exzellent an die verschiedensten Habitate angepasst haben, eine interessante Inspirationsquelle für Laufroboter. In den letzten Jahrzehnten ist das Interesse an biologisch inspirierten Robotern stetig gewachsen und immer mehr Bioroboter wurden entwickelt. Dennoch unterscheidet sich die Vielzahl dieser Bioroboter in Bezug auf die Morphologie der Extremitäten immer noch sehr stark von ihren biologischen Vorbildern. Doch gerade die Konstruktion der Extremitäten bestimmt die Interaktion, die das Tier mit seiner Umgebung eingehen kann. Während die meisten Hexapod-Roboter identische Gliedmaßen besitzen, sind gerade die feinen morphologischen Anpassungen der einzelnen Beinpaare der Insekten der Schlüssel zur Lösung unterschiedlichster Herausforderungen (Abb. 1a). Durch Arbeitsteilung zwischen den Beinpaaren sind Insekten in der Lage sich auf verschiedensten Substraten fortzubewegen und sogar Hindernisse zu überwinden, die ein Vielfaches ihrer Körpergröße überschreiten.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Kinematik der Beinbewegung des gemeinen Mistkäfers *Geotrupes stercorarius* (Linnaeus, 1758) (Abb. 1a) beim Laufen auf flachen und strukturierten Oberflächen mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsanalysen zu analysieren. Zusätzlich werden die zur Fortbewegung essentiellen Strukturen mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskopie charakterisiert.

Material und Methoden

Zur Charakterisierung der äußeren Morphologie der Mistkäferextremitäten wurde ein Hitachi TM 3000 Rasterelektronenmikroskop (Hitachi High-Tech. Corp., Tokyo, Japan) mit einer Beschleunigungsspannung von 15kV verwendet. Dazu wurden die luftgetrockneten Proben in einem ersten Schritt durch ein Sputter-Beschichtungsverfahren (Leica SCD 500, Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Germany) mit einer 10nm Gold/Paladiumschicht überzogen.

Um den Bewegungsablauf der unterschiedlichen Gliedmaßen während des Laufens und Kletterns über Hindernisse zu analysieren, wurden die Vorgänge mit zwei orthogonal zueinander ausgerichteten Hochgeschwindigkeitskameras (Photron Fastcam 1024 PCI, Photron Europe Ltd., West

Wycombe, Bucks, UK and Olympus i-Speed 3, Olympus Europe, Rochford, Essex, UK) mit einer Bildrate von jeweils 500 Bps aufgenommen. Dies ermöglicht eine 3D-Analyse des Bewegungsablaufes. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Bewegung wurden die Gelenke zwischen der Tibia und dem Tarsus mit Hilfe von Acrylfarbe markiert. Die Auswertung der Videosequenzen erfolgte mit der Software Image J 1.48 und dem plug-in MtrackJ [2].

Ergebnisse und Diskussion

Um Haftung auf verschiedenen Substraten zu generieren, nutzt *G. stercorarius* seine Krallen und Sporen (Abb. 1). Der Radius der Spitze der Krallen beträgt $4.9 \pm 1.3 \mu\text{m}$ und der Radius der Sporen $26.0 \pm 3.2 \mu\text{m}$. Die Messung der Radien der sechs Extremitäten ergab keinen signifikanten Unterschied zueinander. Mit diesen spezialisierten Strukturen an seinen Extremitäten ist der Mistkäfer vermutlich in der Lage (ähnlich wie andere Käferarten ohne Haftorgane), sich in den feinen Rauheiten des natürlichen Substrates des Waldes mechanisch zu verklammern [3,4].

Somit ermöglichen diese Strukturen den Mistkäfer nicht nur dazu sich auf flachen Oberflächen fortzubewegen, sondern auch über Hindernisse hinweg zu klettern und sich somit frei in unwegsamem Gelände zu bewegen. *Geotrupes stercorarius* gehört zu den sogenannten Tunneler Mistkäferarten. Statt Mistkugeln zu formen und diese weg zu rollen, graben sie Tunnel direkt unterhalb des Misthaufens [5]. Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, sind die vorderen Extremitäten verstärkt und besitzen gezahnte Strukturen an ihren Tibia (Abb. 1f). Diese werden verwendet um Sand zu lösen und bei Seite zu schaufeln. Zudem sind die vorderen Extremitäten im Vergleich zu den anderen leicht verkürzt. Um einen Roboter zu entwickeln, der zusätzlich zur reinen Lokomotion noch Tunnel graben kann, muss die Morphologie der Vorderextremitäten demnach angepasst werden.

Betrachtet man die Bewegungsmuster der drei Beinpaare des Mistkäfers (Abb. 2) wird deutlich, dass bereits beim Laufen auf ebenen Oberflächen klare Arbeitsteilung zwischen den Beinen betrieben wird. Während die vorderen Extremitäten deutlich höhere Schritte machen, um eventuell auftretende Hindernisse zu entdecken, untersuchen und überwinden zu können, werden die hinteren Extremitäten deutlich länger horizontal entlang des Boden bewegt, bevor sie angehoben werden. Diese Phase des verlängerten Kontakts mit dem Substrat kann für zusätzliche Stabilität sorgen.

Wird *G. stercorarius* mit Hindernissen einer Höhe von 0.5 cm Höhe konfrontiert, so werden die unterschiedlichen Bewegungsmuster der Beinpaare sogar noch deutlicher. Diese unterschiedlichen Bewegungsmuster ermöglichen es *G. stercorarius* somit, flexibel auf Hindernisse zu reagieren.

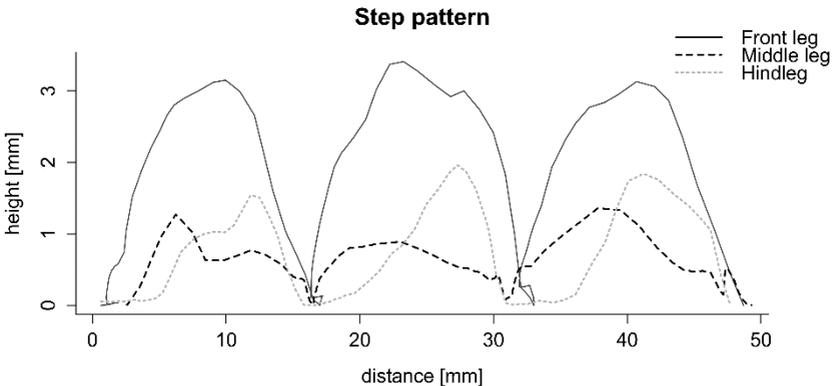


Abb. 2: Darstellung der Bewegungsbahnen der drei Beinpaare von *G. stercorarius* in lateraler Ansicht auf flachem Substrat.

Fazit

Um einen biologisch inspirierten Roboter zu bauen, ist es wichtig Abwägungen zu treffen, in wie weit die beobachteten Merkmale des Vorbildes abstrahiert werden dürfen ohne das dabei wichtige Schlüsselfunktionen verloren gehen. Für einen Mistkäfer wie *G. stercorarius*, der in Wäldern beheimatet ist [5], ist es somit essentiell, sich sicher über unwegsames Gelände zu bewegen und Tunnel graben zu können, in denen er seine Nahrung vor Austrocknung und Konkurrenz schützt.

Die Extremitäten des Mistkäfers *G. stercorarius* haben sich somit sowohl bezüglich ihrer Morphologie als auch in Bezug auf ihre Mechanik an die jeweiligen Anforderungen angepasst. Identische Extremitäten würden demnach, bei einem vom Mistkäfer inspirierten Roboter, die Flexibilität und Vielseitigkeit des Roboters verringern und Aufgaben wie das Graben von Tunneln deutlich erschweren.

Quellen

- [1] Ijspeert A J. (2014) Biorobotics: Using robots to emulate and investigate agile locomotion *Science* 346:196-203. (doi: 10.1126/science.1254486)
- [2] Meijering E, Dzyubachyk O, Smal I. (2012) Methods for cell and particle tracking. In: Conn PM, editor. *Imaging and spectroscopic analysis of living cells—optical and spectroscopic techniques*. Amsterdam: Elsevier
- [3] Dai Z, Gorb S N, Schwarz U. (2002) Roughness-dependent friction force of the tarsal claw system in the beetle *Pachnoda marginata* (Coleoptera, Scarabaeidae) *J Exp Biol* 205:2479-2488.
- [4] Bushard P, Kunze D, Gorb S N (2014) Interlocking-based attachment during locomotion in the beetle *Pachnodamarginata* (Coleoptera, Scarabaeidae) *Sci Rep* 4:6998. (doi: 10.1038/srep06998)
- [5] Hanski I, Cambefort Y (1991) *Dung beetle ecology*. Princeton University Press



Nienke N. Bijma

*Funktionelle Morphologie und Biomechanik,
Zoologisches Institut,
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel*

nbijma@zoologie.uni-kiel.de

2014

B. Sc. Biologie, Christian-Albrechts-Universität Kiel

2017

M. Sc. Biologie, Christian-Albrechts-Universität
zu Kiel

Aktuell

Promotion: Functional morphology and
biomechanics of the locomotory apparatus in
dung beetles

Umschlaggestaltung: B-I-C Hochschule Bremen

Titelfotos:

B-I-C; studentische Projektarbeiten - Studiengang Bionik; Käfer - Fauna Germanica (1908), E. Reitter; pixelio.de: Regentropfen, Rainer Sturm und Ratte, Isabella Müller.

"Bionik: Patente aus der Natur"

9. Bremer Bionik Kongress 2018 – Tagungsbeiträge

Hrsg.: Antonia B. Kesel, Doris Zehren

Zu beziehen über:

Bionik-Innovations-Centrum (B-I-C)

Hochschule Bremen

Neustadtswall 30

D - 28199 Bremen

Tel: +49-(0)421-5905-2525, Fax: +49-(0)421-5905-2537

E-Mail: info@gtbb.net, <http://www.gtbb.net>

Der Kongress (26.10 - 27.10.2018) war eine Gemeinschaftsveranstaltung der Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik GTBB e.V., des Bionik-Innovations-Centrums B-I-C der Hochschule Bremen sowie des Bionik-Kompetenz-Netztes BIOKON e.V..

ISBN 978-3-00-061443-9

Bionik-Innovations-Centrum B-I-C – Bremen 2018.

Druck: Meiners-Druck Bremen.

1. Auflage 2019

Bionik: Patente aus der Natur

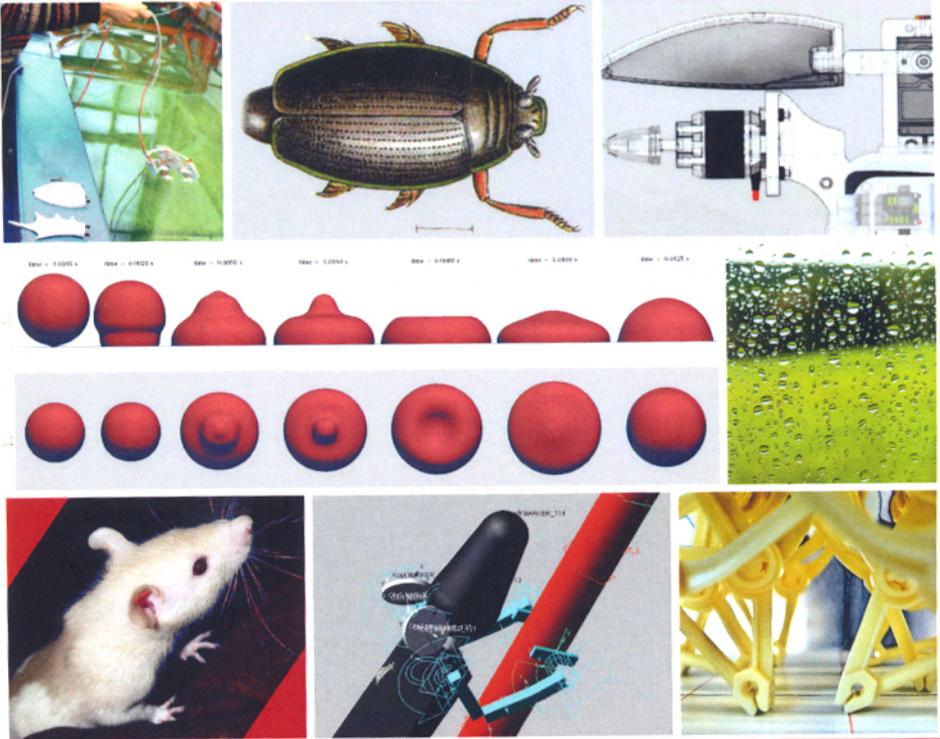
Tagungsbeiträge

9. Bionik-Kongress

Innovations- und Nachhaltigkeitspotenziale für Technologieanwendungen

Hochschule Bremen
26. – 27. Oktober 2018

Hrsg.: Antonia B. Kesel, Doris Zehren
Bionik-Innovations-Centrum Bremen



inkl. CD



GTBB
Gesellschaft für
Technische Biologie
und Bionik e.V.



B-I-C
Hochschule Bremen
Bionik-Innovations-Centrum

BIKON
BIONIK KOMPETENZ NETZ