

Bei Messaufbauten präzise mit sechs Freiheitsgraden positionieren

Hexapoden helfen, Belastungen am Modell zu messen



Ohne computergestützte Simulationsverfahren wären heute viele Neu- und Weiterentwicklungen nicht denkbar. So wurde die Finite-Elemente-Methode zum Standardwerkzeug der Festkörpersimulation. Mit ihrer Hilfe können Problemstellungen aus verschiedenen physikalischen Disziplinen berechnet werden. Von den Möglichkeiten profitieren z. B. Automobil-, Werkzeug- und Maschinenbau ebenso wie die Medizintechnik oder die Hersteller von Musikinstrumenten.

Trotz aller Realitätsnähe liefern die Simulationen aber immer nur berechnete und damit fiktive Werte. Vor allem biomechanische und biomedizinische Fragestellungen werden deshalb gerne auch mit Hardware-Modellen simuliert. Hexapoden, die hochpräzise mit sechs Freiheitsgraden positionieren, liefern interessante Möglichkeiten für Messaufbauten, mit deren Hilfe sich die Realitätsnähe der Modelle testen lässt.

Hexapoden sind parallelkinematisch aufgebaut, d. h. ihre sechs Antriebe wirken gemeinsam auf eine einzige bewegte Plattform (Abb. 1).

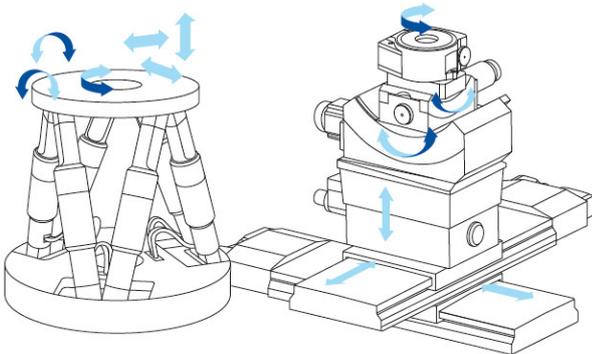


Abb. 1 Hexapoden sind parallelkinematische Systeme (links). Sie erreichen einen deutlich kompakteren Aufbau als seriell gestapelte Mehrachsensysteme (rechts) und die bewegte Masse (Bild: PI)

Je nach Ausführung können sie Lasten von einigen Kilogramm bis zu mehreren Tonnen in beliebiger Raumorientierung mit hoher Präzision in drei linearen und drei rotatorischen Achsen positionieren. Die bekannteste Anwendung von sechsachsigen parallelkinematischen Systemen sind wahrscheinlich Flugsimulatoren.

Hexapoden, die sich für Anwendungen in Messtechnik, Industrie oder Forschung eignen, sind allerdings wesentlich genauer. Statt von Hydraulikantrieben werden sie je nach Anwendungsanforderungen von hochpräzisen Antriebsspindeln und exakt ansteuerbaren DC-Motoren oder direkt von Linearmotoren, z. B. auf Basis von piezokeramischen Aktoren, angetrieben.

Die Vorteile gegenüber seriellen, also gestapelten Systemen, sind in jedem Fall deutlich bessere Bahntreue, Wiederholgenauigkeit und Ablaufebenheit, geringere bewegte Masse und damit eine höhere und für alle Bewegungsachsen gleiche Dynamik, kein Kabelmanagement, da die Kabel nicht bewegt werden, und ein deutlich kompakterer Aufbau. Die Vorzüge machen sich heute die unterschiedlichsten Anwendungen zunutze. Die Palette reicht von Messtechnik und Maschinenbau bis hin zu Medizintechnik und Forschung. Für Letztere liefert die Zahnmedizin ein aktuelles Beispiel:

Anpassung von kieferorthopädischen Apparaturen

In der Kieferorthopädie muss, z. B. für Korrekturmaßnahmen, das Verhalten des elastisch in den Knochen eingebetteten Zahnes untersucht werden. Realistische Zahnbewegungen mit einem experimentellen Aufbau direkt am Menschen zu simulieren ist allerdings kaum machbar. Ein solches „in vivo“ Experiment wäre für den Patienten oder Probanden höchst unangenehm. Außerdem sind die anatomischen Gegebenheiten im Mundraum für Untersuchungen und Tests, die nachweisbare Aussagen über das wirkende Kraftsystem bei Zahnbewegungen zulassen, eher ungeeignet.

Trotzdem muss immer wieder die Frage geklärt werden, wo welche und wie große Kräfte und Momente auftreten. Simulationen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode können hier weiterhelfen. Sie haben sich in der Praxis aber immer nur bedingt bewährt, weil trotz aufwendiger Generierung entsprechender FE-Modelle die per Computer errechneten Werte leider immer nur fiktiv sind.

So ist beispielsweise die rechnerische Darstellung des biomechanischen Verhaltens des Bindegewebes des Zahnhalteapparats (PDL; Periodontales Ligament) noch nicht eindeutig gelöst.

Realistische Simulationen mit Hilfe eines Modells

Wissenschaftler der Universität Ulm sind deshalb einen anderen Weg gegangen und haben eine neue Lösung entwickelt, um die Frage zu beantworten, wie sich der elastisch in den Kieferknochen eingebettete Zahn unter Belastung verhält. Das Resultat ist eine numerisch gesteuerte Versuchsanordnung, die es erlaubt, die klinisch relevanten Kräfte zu messen, die während der kieferorthopädischen Zahnbewegung auf den Zahn wirken. FE-Modelle lassen sich so anhand realer Messungen überprüfen und modifizieren.



Abb. 2 Der biomechanische Aufbau des Simulationssystems basiert auf einem parallelkinematischen Hexapoden Serie H-850 (Bild: PI)

Der biomechanische Aufbau des Simulationssystems basiert auf einem parallelkinematischen Hexapoden (Abb. 2) aus dem umfangreichen Programm der Physik Instrumente (PI).

Der Hexapod baut mit 348 mm Durchmesser und 328 mm Höhe sehr kompakt. Mit einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}$ (Z-Achse), bzw. $\pm 2 \mu\text{m}$ (X- und Y-Achse) und dank der hohen Steifigkeit des Gesamtsystems erwies er sich als ideale Lösung, um die kleinen Bewegungen eines Zahnes im Kieferknochen zu simulieren. Hinzu kommt die für die biomechanische Simulation notwendige freie Definition des Drehpunkts innerhalb oder außerhalb der Zahnwurzel (Pivot-Punkt).

Die Verfahrswege des Hexapoden betragen in den vertikalen Richtungen $\pm 25 \text{ mm}$ und $\pm 50 \text{ mm}$ in den horizontalen; bei Dreh- bzw. Kippwinkeln von $\pm 30 \text{ Grad}$ (vertikal) und $\pm 15 \text{ Grad}$ (horizontal). Für die Simulation wurde der Hexapod mit einem auf einem starren Drehtisch montierten Kraftsensor kombiniert.

Der Phantomzahn (Abb. 3) im Wesentlichen ein kieferorthopädisches Bracket wie bei einem menschlichen Zahn, wird direkt an den Sensor montiert.

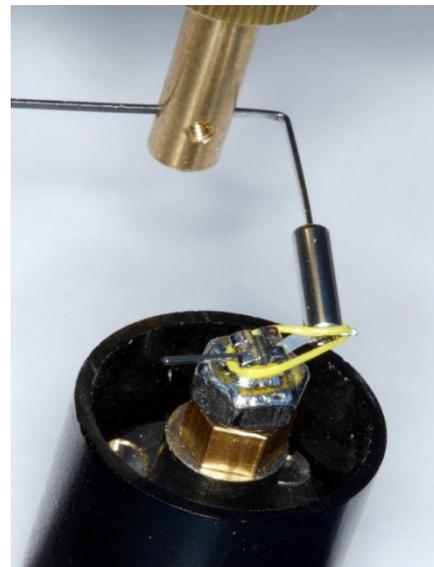


Abb. 3 Der Kraftsensor ist auf der oberen Plattform des Hexapoden montiert. Er steht hier anstelle des realen Zahnes und registriert die dort wirkenden Kräfte und Momente (Bild: Universität Ulm)

Das standardisierte elastische Verhalten des Zahnhalteapparats wird durch ein eigens hierfür entwickeltes Programm simuliert. Die Kräfte und Momente, welche die zu studierende kieferorthopädische Apparatur erzeugt, wirken über das kieferorthopädische Bracket auf den Phantomzahn.

Der Hexapod bewegt nun den Prüfling in kleinen Schritten, um die je nach Zahnstellung unterschiedlichen Belastungen zu messen. Die dazu notwendige Kommandierung des Hexapodsystems ist einfach. Der digitale Hexapodcontroller ermöglicht per Softwarebefehl die Festlegung eines beliebigen Punktes im Raum als Rotationszentrum. Dieser frei definierbare Drehpunkt bleibt unabhängig von der Bewegung erhalten. Der Benutzer kommandiert die Bewegung der Hexapodplattform in kartesischen Koordinaten; alle Transformationen auf die Einzelantriebe übernimmt der Controller. Durch die hohe Positioniergenauigkeit ist es möglich, die Krafteinwirkung am Prüfling exakt einer Position zuzuordnen; die Belastungspunkte am Zahn lassen sich so präzise ermitteln (Abb. 4).



Abb. 4 Der aus radiologischen Daten rekonstruierte Zahn ist in dem rot gefärbten Parodontalligament eingebettet (ohne Knochen). Die Lasten werden auf den im mittleren Bereich der Zahnkrone auf den als gelbe Kugeln dargestellten Punkten eingeleitet (Bild: Universität Ulm)

Die hohe Steifigkeit des Hexapoden sorgt dabei für eine reale Simulation der Zahnbewegung. Die mit dem Simulationsmodell erzielbaren Ergebnisse tragen so dazu bei, kieferorthopädisch relevante Prozesse im Mundraum besser bewerten zu können und Korrekturmaßnahmen effektiver zu gestalten.

Ähnliche Resultate sind mit Hilfe entsprechender Prüfaufbauten auch in anderen Bereichen erzielbar, beispielsweise bei Zahn- und Hüftimplantaten oder Ähnlichem und natürlich sind dank der Vielseitigkeit und Variantenvielfalt der parallelkinematischen Hexapoden auch industrielle Anwendungen realisierbar.

Ultrapräzises Messsystem für optische Oberflächen

Extreme Anforderungen an die Genauigkeit der Prüfverfahren stellen Formeinsätze, die zur Fertigung optischer Linsen verwendet werden.

Mit interferometrischen Messeinrichtungen lässt sich diese Aufgabenstellung jetzt automatisieren und direkt in die Fertigung integrieren. Auch hier haben die hochpräzisen Hexapoden einen typischen Einsatzbereich gefunden: Um sowohl plane als auch sphärische und asphärische Prüflinge optimal erfassen zu können, sind bei der Positionierung des Interferometers fünf Freiheitsgrade erforderlich: Das Interferometer muss sich in Richtung der x-, y- und z-Achse bewegen lassen. Für die Orientierung senkrecht zur Prüfachse sind zusätzlich Drehungen um die x- und y-Achse und bei Zylinderlinsen auch um die z-Achse notwendig.

Der Hexapod, der die Positionieraufgaben übernimmt, ist auf einer 20 mm dicken Aluminiumplatte befestigt. Das Interferometer im Innern des Hexapoden beeinträchtigt seine Bewegungsmöglichkeiten nicht. Die CCD-Kamera nimmt das Bild auf. Es wird digitalisiert, im Rechner gespeichert und ausgewertet. Ein in MatLab geschriebenes Steuerungsprogramm sendet entsprechende Steuerbefehle an den Hexapoden.

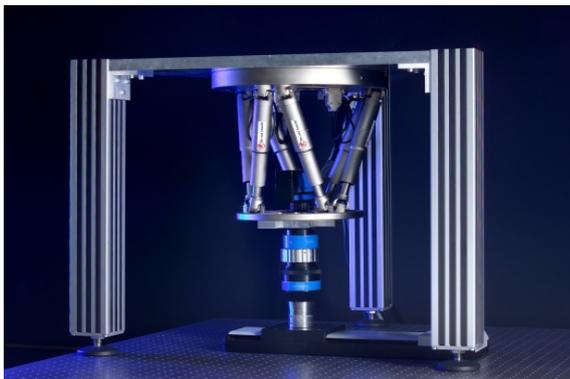


Abb. 5 Ultrapräzises Messsystem für optische Oberflächen. Auch in dieser Anwendung sind Hexapoden das Mittel der Wahl (Bild: PI / Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT)

Autoren

Birgit Bauer, Business Development Manager Health Care bei Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG

Martin Geiger, Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Universitätsklinikum Ulm, Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie

Ellen-Christine Reiff, M.A., Redaktionsbüro Stutensee

Über Physik Instrumente (PI)

In den letzten vier Jahrzehnten hat sich Physik Instrumente (PI) mit Stammsitz in Karlsruhe zum führenden Hersteller von Positioniersystemen mit Genauigkeiten im Bereich einzelner Nanometer entwickelt. Das privat geführte Unternehmen ist mit vier Sitzen in Deutschland und zehn ausländischen Vertriebs- und Serviceneiederlassungen international vertreten.

Über 700 hochqualifizierte Mitarbeiter rund um die Welt versetzen die PI Gruppe in die Lage, fast jede Anforderung aus dem Bereich innovativer Präzisions-Positioniertechnik zu erfüllen. Alle Schlüsseltechnologien werden im eigenen Haus entwickelt. Dadurch kann jede Phase vom Design bis hin zur Auslieferung kontrolliert werden: die Präzisionsmechanik und Elektronik ebenso wie die Positionssensoren.

Die dafür benötigten piezokeramischen Elemente werden bei der Tochterfirma PI Ceramic in Lederhose gefertigt, einem der weltweit führenden Unternehmen auf dem Gebiet aktorischer und sensorischer Piezoprodukte.

Die PI miCos GmbH in Eschbach bei Freiburg ist spezialisiert auf flexible Positioniersysteme für Ultrahochvakuum-Anwendungen sowie parallelkinematische Positioniersysteme mit sechs Freiheitsgraden und Sonderanfertigungen.