
Nihat Özkaya • Margareta Nordin
David Goldsheyder • Dawn Leger

Fondamenti di biomeccanica

Equilibrio, movimento e deformazione

Edizione italiana sulla terza in lingua inglese a cura di
Angelo Cappello e Lorenzo Chiari

con la collaborazione di
Luca Cristofolini

Contributo alla traduzione di Paola Tamburini

PICCIN

First published in English under the title
Fundamentals of Biomechanics; Equilibrium, Motion, and Deformation
by Nihat Özkaya, Margareta Nordin, David Goldsheyder and Dawn Leger, edition: 3
Copyright © Springer Science+Business Media, LLC, 2012 *
This edition has been translated and published under licence from
Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature.
Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature takes no responsibility and shall
not be made liable for the accuracy of the translation.

Opera coperta dal diritto d'autore - Tutti i diritti sono riservati
Questo testo contiene materiale, testi ed immagini, coperto da copyright e non può essere copiato,
riprodotto, distribuito, trasferito, noleggiato, licenziato o trasmesso in pubblico, venduto, prestato a
terzi, in tutto o in parte, o utilizzato in alcun altro modo o altrimenti diffuso, se non previa espressa
autorizzazione dell'editore. Qualsiasi distribuzione o fruizione non autorizzata del presente testo,
così come l'alterazione delle informazioni elettroniche, costituisce una violazione dei diritti
dell'editore e dell'autore e sarà sanzionata civilmente e penalmente secondo quanto previsto dalla
L. 633/1941 e ss.mm.

ISBN 978-88-299-3144-6

Stampato in Italia

Copyright © 2021, Piccin Nuova Libreria S.p.A., Padova
www.piccin.it

*Questa terza edizione è dedicata
al Dr. Nihat Özkaya, ai nostri studenti
e a Manya Goldsheyder.*

Presentazione dell'edizione italiana

È indubbio che la storia della biomeccanica abbia un debito significativo con l'Italia. Le intuizioni illuminate e le dimostrazioni sperimentali attribuibili a Leonardo Da Vinci (1452-1519), Galileo Galilei (1564-1642) e Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) hanno rappresentato, infatti, un elemento fondativo di tutta la scienza moderna, ma in particolar modo di quella disciplina che, originandosi dalla meccanica, si è dedicata a descrivere e quindi a comprendere il movimento umano come un fenomeno complesso, rappresentabile con un "linguaggio matematico".

In questo senso può essere letta come recupero di così illustri radici l'impresa nella quale ci siamo cimentati, non senza difficoltà, per assecondare il desiderio dell'Editore Dr. Nicola Piccin di offrire ad una platea più vasta di studenti del Belpaese la terza edizione di *Fondamenti di biomeccanica* di Nihat Özkaya, Margareta Nordin, David Goldsheyder e Dawn Leger, considerato uno dei testi di riferimento a livello internazionale.

Come ricordato nella Presentazione dell'edizione originale, vista la crescente domanda di competenze biomeccaniche in ambiti professionali anche molto diversi tra loro, questo testo potrà costituire un prezioso e completo riferimento per insegnamenti offerti in corsi di laurea e laurea magistrale delle classi di Ingegneria dell'Informazione o Industriale, Ingegneria Biomedica, Scienze delle Attività Motorie e Sportive, Scienze e Tecniche delle Attività Motorie Preventive e Adattate, Scienze e Tecniche dello Sport, Scienze delle Professioni Sanitarie della Riabilitazione e delle Professioni Sanitarie Tecniche, Medicina e Chirurgia.

Le difficoltà nel portare a termine questa impresa, che ci ha visti impegnati per quasi due anni, stanno in gran parte proprio nella scelta del testo di rivolgersi a platee di lettori molto diverse e alla conseguente cifra stilistica deliberatamente inclusiva. Gli Autori hanno perseguito questo obiettivo intercalando il necessario formalismo matematico con ampie sezioni descrittive, cercando di fare avvicinare (talvolta per reiterazione) ciascun lettore, indipendentemente dal suo retroterra culturale, al cuore dei costrutti fondamentali relativi a equilibrio, movimento e deformazione. L'obiettivo può dirsi raggiunto anche grazie ad un corpus ragguardevole di esempi e di esercizi risolti, che saranno, per ogni lettore, un utile strumento di verifica delle conoscenze apprese.

Confidiamo che il nostro lavoro di traduzione e, in alcuni casi, di mediazione culturale abbia conservato, nella versione italiana, lo spirito originale degli Autori.

Ringraziamo il collega Luca Cristofolini che ha significativamente migliorato la qualità della sezione dedicata alla meccanica dei corpi deformabili. Ringraziamo anche i nostri giovani collaboratori Serena Moscato, Pierpaolo Palumbo ed Elena Borelli che, per approssimazioni successive, hanno contribuito ad affinare la traduzione iniziale predisposta con competenza da Paola Tamburini.

Angelo Cappello

Lorenzo Chiari

*Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione
"Guglielmo Marconi", Alma Mater Studiorum – Università di Bologna*

Presentazione dell'edizione originale

La biomeccanica è una disciplina utilizzata da diversi gruppi di professionisti. Conoscere la biomeccanica è fondamentale per i chirurghi ortopedici, gli osteopati, i fisiatristi, i reumatologi, i fisioterapisti, i terapisti occupazionali, i chiropratici e i preparatori atletici. Questi professionisti del settore medico-sanitario di solito non hanno un solido background di matematica e fisica. È quindi essenziale, per favorire l'apprendimento, che la biomeccanica sia presentata in modo non troppo "matematico" affinché possano acquisire i concetti della meccanica senza un approccio matematico totalmente rigoroso.

È pur vero, d'altra parte, che ci sono anche molti ingegneri che lavorano in settori nei quali la biomeccanica svolge un ruolo importante. L'ergonomia, l'ingegneria dei fattori umani, la ricerca biomeccanica e la ricerca e sperimentazione nel campo della protesica sono tutti settori nei quali gli ingegneri devono conoscere molto bene la biomeccanica. Gli ingegneri hanno naturalmente un background che consente loro di apprendere la biomeccanica attraverso un approccio matematico rigoroso, ma i testi classici dei settori ingegneristici non trattano in genere l'aspetto biologico della biomeccanica.

La terza edizione di *Fondamenti di Biomeccanica* cerca di conciliare queste problematiche, affrontando la biomeccanica da un punto di vista matematicamente rigoroso, ma enfatizzandone allo stesso tempo l'aspetto biologico. Il libro sarà molto utile agli ingegneri che studiano la biomeccanica e ai professionisti del settore medico-sanitario che desiderano, nell'ambito dei loro studi, conoscere meglio la biomeccanica e che, grazie alle loro nozioni matematiche precedenti, sono in grado di comprendere meglio l'ingegneria applicata al corpo umano.

Nel corso degli ultimi decenni sono stati fatti progressi importanti nel campo della biomeccanica. Conoscere e comprendere bene i concetti, principi, metodi di valutazione e strumenti della biomeccanica è indispensabile per lo studio dell'ergonomia e per consentire agli specialisti del settore di ridurre il rischio e prevenire i problemi muscoloscheletrici sui luoghi di lavoro.

Quest'opera è il frutto della collaborazione tra il *NYU Hospital for Joint Diseases Orthopedic Institute* (Istituto Ortopedico dell'Ospedale Universitario di New York) e il *Program of Ergonomics and Biomechanics at New York University* (Corso di Ergonomia e Biomeccanica dell'Università di New York). Gli Autori del volume hanno potuto sfruttare la loro esperienza specifica quali docenti di biomeccanica che insegnano in un contesto clinico a professionisti provenienti da background diversi. Quest'opera è il compendio dei loro numerosi anni di insegnamento dei trattamenti riabilitativi, uniti ad una grande esperienza pratica frutto dei tanti anni di ricerca e sperimentazione.

New York, NY, USA

Victor Frankel, MD, PhD, KNO

Prefazione

Tutti i testi accademici, anche quelli che espongono i “fondamenti” teorici, devono essere rivisti e aggiornati, di quando in quando, anche se ci sono state poche nuove scoperte nel settore. Aver usato il libro per molti anni per insegnare agli studenti può essere fonte di illuminanti suggerimenti per capire quali punti possano essere spiegati meglio e quali vadano ampliati. Grazie ai preziosi consigli di David Goldsheyder, ingegnere, ergonomo e istruttore da vari anni al Corso di Specializzazione in Ergonomia e Biomeccanica dell’Università di New York, abbiamo prodotto questa nuova edizione, che contiene anche i commenti e suggerimenti forniti dagli studenti e specializzandi.

La terza edizione del libro è stata preparata con un notevole apporto da parte degli studenti e contiene quindi molti più esempi e domande pratiche che hanno lo scopo di approfondire la comprensione dei concetti trattati. Inoltre, l’ordine dei capitoli è stato cambiato per riflettere di più il programma dell’insegnamento. La prima parte del libro (Capitoli da 1 a 5 e Appendici A e B) introduce i concetti fondamentali della meccanica e fornisce gli strumenti matematici necessari a spiegare questi concetti, delinea le procedure per analizzare i sistemi in “equilibrio” e applica questa procedura a sistemi meccanici relativamente semplici e all’apparato locomotore dell’uomo. La seconda parte (Capitoli 6-11 e Appendice C) è dedicata all’analisi dei sistemi “in movimento” e l’ultima parte (Capitoli 12-15) fornisce le tecniche per analizzare le caratteristiche di “deformazione” dei materiali con applicazione alla biomeccanica ortopedica.

Il focus del libro è l’applicazione di concetti ingegneristici presentati però con degli esempi, nel modo più semplice e chiaro possibile, dato che ci rendiamo conto che il libro sarà usato da persone che appartengono ad un’ampia gamma di discipline e hanno una preparazione diversa alle spalle. La relazione dei concetti ingegneristici con la fisiologia umana è il fondamento della biomeccanica e abbiamo cercato di spiegare questa relazione con esempi e illustrazioni. Crediamo che la conoscenza degli aspetti biomeccanici e del comportamento strutturale del sistema muscoloscheletrico umano sia un prerequisito essenziale per qualsiasi approccio sperimentale, teorico o analitico, per esaminare la sua funzione fisiologica nel corpo.

Preparando questo testo e aggiornando la spiegazione dei concetti, speriamo di aver contribuito a migliorare il dialogo tra i professionisti che sono soprattutto interessati agli aspetti biologici e fisiologici e quelli che sono interessati al comportamento strutturale del corpo umano attraverso un approccio ingegneristico.

New York, NY, USA

Dawn Leger
Margareta Nordin
David Goldsheyder

Ringraziamenti

Un ringraziamento particolare va agli studenti passati e presenti del Corso di Specializzazione in Ergonomia e Biomeccanica dell'Università di New York, che hanno fornito spunti utili alla precedente edizione del testo e hanno messo in luce il bisogno di ulteriori argomenti, domande pratiche o problemi esemplificativi. Dato che la maggior parte degli studenti del corso proviene da discipline non ingegneristiche, con vari livelli di preparazione e talvolta con interruzioni relativamente lunghe nel percorso di studio, essi hanno spesso difficoltà a capire e assimilare appieno i concetti fondamentali e i principi della materia. Di conseguenza, lo scopo principale del nostro lavoro è pensare agli studenti, al loro rendimento accademico, alla loro capacità di applicare i principi della meccanica al corpo umano. Siamo grati a tutti coloro che hanno contribuito in vario modo a questa edizione e ci hanno aiutato a portare a termine quest'opera che amiamo.

Un grazie particolare a Angela Maria Lis, PT, Ph.D. che ha fornito una revisione completa dell'anatomia funzionale delle principali articolazioni del sistema muscoloscheletrico e a Jangwhon Yoon, PT, Ph.D. per il suo aiuto sulla parte di dinamica del libro. Ringraziamo anche il Dr. Victor H. Frankel per il suo costante incoraggiamento e aiuto e tutto lo staff dell'Occupational and Industrial Orthopaedic Center dell'Hospital for Joint Diseases Orthopaedic Institute, NYU Langone Medical Center e New York University.

Siamo grati anche al Dr. Nihat Özkaya (deceduto nel 1998). La sua devozione verso il suo lavoro non aveva eguali e la sua speranza era che tutti gli studenti e lettori interessati potessero beneficiare di quanto aveva scritto e che il materiale fosse tenuto aggiornato. È grazie alla popolarità della prima edizione che questo libro è stato tradotto in greco e in giapponese e speriamo che altre traduzioni seguiranno in futuro.

Indice generale

1	Introduzione	1
1.1	La meccanica	1
1.2	La biomeccanica	2
1.3	Concetti di base	2
1.4	Leggi di Newton	2
1.5	Analisi dimensionale	3
1.6	Sistemi di unità di misura	3
1.7	Conversione di unità di misura	4
1.8	Matematica	4
1.9	Scalari e vettori	5
1.10	Modellazione e approssimazione	5
1.11	Procedura generalizzata	5
1.12	Obiettivo del testo	6
1.13	Notazione	6
	Letture consigliate	6
2	Vettore forza	9
2.1	Definizione di forza	9
2.2	Proprietà della forza come grandezza vettoriale	9
2.3	Dimensione e unità di misura della forza	9
2.4	Sistemi di forze	10
2.5	Forze esterne e interne	10
2.6	Forze normali e tangenziali	10
2.7	Forze di trazione e compressione	10
2.8	Forze complanari	10
2.9	Forze collineari	10
2.10	Forze concorrenti	11
2.11	Forze parallele	11
2.12	Forza gravitazionale o forza peso	11
2.13	Sistemi di forze distribuite e pressione	11
2.14	Forze d'attrito	12
2.15	Esercizi	14
3	Vettori momento e coppia di forze	17
3.1	Definizione di momento e coppia di forze	17
3.2	Modulo del momento	17
3.3	Direzione del momento	17
3.4	Dimensione e unità di misura del momento	18
3.5	Alcune proprietà del vettore momento	18
3.6	Momento netto o risultante	19
3.7	La coppia e il momento di una coppia	23
3.8	Traslazione di forze	23
3.9	Momento come prodotto vettoriale	23
3.10	Esercizi	26

4	Statica: sistemi in equilibrio	31
4.1	Panoramica	31
4.2	Leggi della meccanica di Newton	31
4.3	Condizioni d'equilibrio	32
4.4	Diagramma del corpo libero	33
4.5	Procedura per l'analisi dei sistemi in equilibrio	34
4.6	Equazioni di equilibrio: precisazioni	34
4.7	Vincoli e reazioni vincolari	35
4.8	Strutture semplicemente vincolate	35
4.9	Sistemi cavo-puleggia e dispositivi di trazione	40
4.10	Strutture vincolate	41
4.11	Sistemi con attrito	45
4.12	Determinazione del centro di gravità	46
4.13	Esercizi	49
5	Applicazioni della statica alla biomeccanica	53
5.1	Le articolazioni	53
5.2	Muscoli scheletrici	53
5.3	Considerazioni di base	54
5.4	Principali ipotesi e limitazioni	54
5.5	Meccanica del gomito	55
5.6	Meccanica della spalla	58
5.7	Meccanica della colonna vertebrale	60
5.8	Meccanica dell'anca	64
5.9	Meccanica del ginocchio	69
5.10	Meccanica della caviglia	73
6	Introduzione alla dinamica	75
6.1	Dinamica	75
6.2	Cinematica e cinetica	75
6.3	Moti lineari, angolari e vari	75
6.4	Distanza e spostamento	76
6.5	Velocità scalare e velocità vettoriale	76
6.6	Accelerazione	76
6.7	Inerzia e quantità di moto	76
6.8	Gradi di libertà	77
6.9	Concetto di punto materiale	77
6.10	Sistemi di riferimento e sistemi di coordinate	77
6.11	Prerequisiti per l'analisi dinamica	77
6.12	Argomenti da trattare	77
7	Cinematica lineare	79
7.1	Moto rettilineo	79
7.2	Posizione, spostamento, velocità e accelerazione	79
7.3	Dimensioni e unità di misura	80
7.4	Grandezze misurate e grandezze derivate	80
7.5	Moto rettilineo con accelerazione costante	81
7.6	Esempi di moto rettilineo	82
7.7	Moto piano	86
7.8	Vettori posizione, velocità e accelerazione	86
7.9	Moto piano con accelerazione costante	87
7.10	Moto parabolico o dei proiettili	88
7.11	Applicazioni al gesto sportivo	90
7.12	Esercizi	92
8	Cinetica lineare	95
8.1	Panoramica	95
8.2	Equazioni del moto	95
8.3	Casi speciali di moto traslatorio	96
	8.3.1 La forza è costante	96

8.3.2	La forza è una funzione del tempo	96
8.3.3	La forza è una funzione dello spostamento	97
8.4	Procedura per la risoluzione dei problemi di cinetica	97
8.5	Metodi del lavoro e dell'energia	98
8.6	Lavoro meccanico	98
8.6.1	Lavoro di una forza costante	98
8.6.2	Lavoro di una forza variabile	99
8.6.3	Lavoro come prodotto scalare	99
8.7	Energia meccanica	100
8.7.1	Energia potenziale	100
8.7.2	Energia cinetica	100
8.8	Teorema lavoro-energia	100
8.9	Principio di conservazione dell'energia	100
8.10	Dimensioni e unità di misura del lavoro e dell'energia	100
8.11	Potenza	100
8.12	Applicazioni dei metodi energetici	101
8.13	Esercizi	103
9	Cinematica angolare	105
9.1	Coordinate polari	105
9.2	Posizione e spostamento angolare	105
9.3	Velocità angolare	106
9.4	Accelerazione angolare	106
9.5	Dimensioni e unità di misura	106
9.6	Definizione dei concetti di base	106
9.7	Moto circolare attorno ad un asse fisso	112
9.8	Relazioni tra grandezze lineari ed angolari	113
9.9	Moto circolare uniforme	113
9.10	Moto circolare con accelerazione costante	113
9.11	Moto relativo	113
9.12	Sistemi a più segmenti	115
9.13	Esercizi	118
10	Cinetica angolare	119
10.1	Cinetica dei moti angolari	119
10.2	Momento di una forza e accelerazione angolare	122
10.3	Momento di inerzia	123
10.4	Teorema dell'asse parallelo	123
10.5	Raggio di girazione	124
10.6	Analisi del moto segmentale	124
10.7	Energia cinetica di rotazione	127
10.8	Lavoro e potenza angolare	127
11	Impulso e quantità di moto	129
11.1	Introduzione	129
11.2	Quantità di moto e impulso	129
11.3	Applicazioni del teorema dell'impulso e della quantità di moto	130
11.4	Conservazione della quantità di moto lineare	134
11.5	Urti e collisioni	134
11.6	Urti monodimensionali	134
11.6.1	Urti perfettamente anelastici	135
11.6.2	Urto perfettamente elastico	135
11.6.3	Urto elasto-plastico	136
11.7	Urti bidimensionali	137
11.8	Impulso e quantità di moto angolare	139
11.9	Riepilogo delle equazioni di base	139
11.10	Cinetica dei corpi rigidi in movimento su un piano	139
12	Introduzione alla meccanica dei corpi deformabili	141
12.1	Panoramica	141
12.2	Forze applicate e deformazioni	141

12.3	Forze e momenti interni	141
12.4	Tensione e deformazione	142
12.5	Procedura generale	143
12.6	Matematica coinvolta	143
12.7	Argomenti da trattare	143
	Letture consigliate	144
13	Tensione e deformazione	145
13.1	Configurazioni di carico elementari	145
13.2	Prova di trazione monoassiale	145
13.3	Diagrammi carico-allungamento	146
13.4	Sforzo normale e di taglio	146
13.5	Deformazione normale e tangenziale	148
13.6	Diagrammi tensione-deformazione	149
13.7	Deformazioni elastiche	150
13.8	Legge di Hooke	151
13.9	Deformazioni plastiche	151
13.10	Strizione	151
13.11	Lavoro ed energia di deformazione	152
13.12	Incrudimento	152
13.13	Ciclo di isteresi	153
13.14	Proprietà basate sul diagramma tensione-deformazione	153
13.15	Comportamento dei materiali ideali	153
13.16	Proprietà meccaniche dei materiali	154
13.17	Esercizi risolti	155
13.18	Esercizi	159
14	Analisi delle deformazioni e delle tensioni multiassiali	163
14.1	Coefficiente di Poisson	163
14.2	Tensione biassiale e triassiale	164
14.3	Trasformazione della tensione	167
14.4	Tensioni principali	167
14.5	Cerchio di Mohr	168
14.6	Criteri di cedimento di un materiale	170
14.7	Tensione ammissibile e fattore di sicurezza	171
14.8	Fattori che influenzano la resistenza dei materiali	172
14.9	Affaticamento e resistenza	172
14.10	Tensioni concentrate	173
14.11	Torsione	174
14.12	Flessione e taglio	178
14.13	Carico combinato	185
14.14	Esercizi	186
15	Proprietà meccaniche dei tessuti biologici	189
15.1	Viscoelasticità	189
15.2	Analogie basate su molle e smorzatori	189
15.3	Modelli empirici di viscoelasticità	190
	15.3.1 Modello Kelvin-Voigt	191
	15.3.2 Modello di Maxwell	191
	15.3.3 Modello solido standard	191
15.4	Risposta tempo-dipendente di un materiale	192
15.5	Confronto tra elasticità e viscoelasticità	193
15.6	Caratteristiche comuni dei tessuti biologici	195
15.7	Biomeccanica dell'osso	195
	15.7.1 Composizione dell'osso	195
	15.7.2 Proprietà meccaniche dell'osso	196
	15.7.3 Integrità strutturale dell'osso	197
	15.7.4 Fratture ossee	198
15.8	Tendini e legamenti	198
15.9	Muscoli scheletrici	199
15.10	Cartilagine articolare	200

15.11	Precisazioni	201
15.12	Esercizi	201
Appendice A:	Geometria piana	203
Appendice B:	Algebra vettoriale	207
Appendice C:	Analisi matematica	219
Indice analitico	231