

L. Vogt, W. Banzer

Instrumentelle Ganganalyse

Abt. Sportmedizin,
Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt/M.

Einleitung

Die Ganganalyse gilt als ein gut entwickelter Gegenstandsbereich mit eigenen Fachgesellschaften (GCMAS = Gait and Clinical Movement Association, ISPGR = International Society for Posture and Gait Research). Die heute angewandten Ganganalyseverfahren gehen im wesentlichen auf Arbeiten von Winter (7), Perry (4) und Whittle (6) zurück. Mit dem Ziel einer vollständigeren Beschreibung des Gangmusters integrieren komplexe Analysen eine Vielzahl biomechanischer Messmethoden.

Diagnostische Bewegungsinspektion

Die Bewegungsinspektion konzentriert sich u.a. auf subjektive Beurteilung der Stabilität, Gleichgewichtsfähigkeit und Symmetrie von Bewegungen. Systematische Beobachtungen erfolgen anhand von Rating-Skalen. Schwierigkeiten ergeben sich aufgrund der subjektiven Beurteilung und der häufig mangelnden Übereinstimmung der Urteiler. Synchron Videoaufzeichnungen gestatten eine verlangsamte und wiederholte Betrachtung einzelner Bewegungsdetails ohne Ermüdungs- oder Schmerzprovokation.

Weg-Zeit-Messung

Zur Erhebung von Schrittlänge, -breite, Kadenz, Zyklusdauer und Gehgeschwindigkeit dient bereits die Zeitnahme bei der Durchschreitung definierter Distanzen oder die Vermessung von Fußabdruckmustern. Videoaufzeichnungen von Streckendurchquerungen aus der Seitansicht gestatten eine Bestimmung der Ganggeschwindigkeit, indem Zeitinformationen aus der gewählten Bildfrequenz der Kamera berechnet werden. Neben Bodenkontaktgebern existieren automatische Gehstreckenmesssysteme die sich, zusätzlich zur Ableitung von Start/Stopp-Impulsen, zur Messung von Schritt- und Gangzykluslängen eignen.

Die Messung dieser ganganalytischen Basisgrößen bietet in Kombination mit Videoaufzeichnungen preiswerte und zuverlässige Möglichkeiten zur Verifizierung und Dokumentation blickdiagnostischer Befunde.

Elektromyographie (EMG)

Neben der Bestimmung der Aktivitätshöhe dient die EMG in der klinischen Ganganalyse in erster Linie der Identifikation von Zeiten myoelektrischer Aktivität. Verwendung finden sowohl Oberflächen- als auch Nadel- bzw. Drahtelektroden. Zur Analyse des Aktivitätsverlaufs im Gangzyklus kommt insbesondere die Hüllkurvenbildung (Tiefpass-Filterung) mit Glättung und Zeitnormierung der Signale zur Anwendung. Im Rahmen der Ganganalyse gelten die gleichen methodischen und experimentellen Voraussetzungen, die für die Anwendung des kinesiologischen EMG zutreffen (5). Anwendung findet insbesondere die Untersuchung des synergistischen Aktivierungsverhaltens.

Kinematik

Die Kinematik beschreibt Bewegungsmerkmale wie Gelenkwinkel, Winkelgeschwindigkeiten oder Beschleunigungen von Körpersegmenten.

Bei rechnergestützten Bewegungsanalysesystemen werden die Positionen und Bewegungen interessierender Körperpunkte oder Marker in Bezug zu einem Koordinaten- bzw. Referenzsystem analysiert. Unterschiede werden zwischen passiven, aus reflektierenden Materialien hergestellten Markerelementen, die nicht über Kabel mit dem Probanden verbunden sind, und aktiven Markern, gekennzeichnet durch Verbindungskabel zur Systemeinheit. Die Vergleichbarkeit von Ergebnissen unterschiedlicher Ganglabors wird durch mögliche Markeranordnungen (Helen-Hayes vs. Cleveland Clinic Foundation) und Konventionen (Euler/Kardanwinkel, Helikale Achsen) zur Positions- und Lagebestimmung von Körpersegmenten erschwert (3). Gelenkwinkel werden im zwei- oder dreidimensionalen Raum bestimmt. Ergebnisse zweidimensionaler Betrachtungen werden in Abhängigkeit von Ausweich- und Kompensationsbewegungen in anderen Raumebenen unterschiedlich stark von Projektions- und Abbildungsfehlern beeinflusst. Die Validität externer Kinematikanalysen ist abhängig vom Ausmaß der Hautverschiebung und -dehnung, der Stärke des Unterhautfettgewebes und dem Bewegungsumfang. Beschreibungen von Umfang, Verlauf und Bewegungsvariabilität stehen im Anwendungsmittelpunkt.

Kinetik

Kinetik beschreibt die auf ein Gelenk oder Körperteil wirkenden Kräfte, die zur Entstehung oder Kontrolle von Bewegungen beitragen, z.B. Gelenkkräfte und Momente. Zur Berechnung existieren methodisch unterschiedliche Wege. Die etablierteste Methode nutzt die inverse Dynamik auf der Grundlage von Körpersegmentmodellberechnungen (1). Sie basiert auf der Messung von Bodenreaktionskräften mit Mehrkomponentenkraftmessplatten. Plattformgröße und/oder variierende Schrittlängen können ein Treffen der Messplattformen erschweren. Zusätzlich benötigt die Berechnung der Gelenkmomente bewegungsanalytisch ermittelte Angaben über Position und Winkelbeschleunigung des Körpermassenschwerpunktes oder auf anthropometrischen Erhebungen basierende Schätzwerte der Trägheitscharakteristika. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse unterliegt Einflüssen durch Kapsel-Bandapparat, Gelenkgeometrie oder Kontrakturen. Für Zwischenpersonenvergleiche kommen individualspezifische Normierungen an Körpergewicht und/oder Körpergröße zur Anwendung. Berechnungen der Netto-Gelenkmomente geben Auskunft über die Dominanz von Flexoren- oder Extensorenmomenten, ohne auf die Beteiligung einzelner Muskelgruppen hinzuweisen. Die Resultate dienen u.a. der Anpassung von Prothesen und Hilfsmitteln sowie der Funktionsbewertung von Gelenkimplantaten. Gemeinsam mit EMG-Ableitungen finden die Ergebnisse Eingang in die Operationsplanung bei Sehnentransfers.

Druckverteilung

Aus der Erfassung von Kräften, die auf eine umschriebene Oberfläche wirken leitet sich die Messung von Druck und Druckverteilung ab. Neben im Schuh platzierter Fußdruckmesssystemen existieren Messplatten mit einer Vielzahl integrierter Kraftaufnehmer, die beim Gehen zu betreten sind. Im Vergleich zu Bodenreaktionsmessungen mit Kraftmessplattformen zeigen Druckverteilungsmessungen unter dem Fuß eine relativ hohe intraindividuelle Variabilität. Messergebnisse werden als farbige Netzgrafik dargestellt. Unterschiedliche Farbtöne verkörpern bestimmte Abstufungen der Druckwerte. Zur quantitativen Analyse werden in anatomisch definierten Arealen Spitzendruckwerte, Druckanstiegsraten, lokale Impulse und relative Lastverteilungen berechnet. Relative Lastanalysen versuchen Einflüsse des Körpergewichts und der Fußflächengröße bei Zwischenpersonenvergleichen zu kompensieren. Anwendungsschwerpunkte bilden die orthopädie-technische Schuhzurichtung und Einlagenversorgung.

Energieumsatzmessung

Die indirekte Kalorimetrie, ein in der Sportmedizin bewährtes Verfahren, dient zur Bestimmung des vom Organismus zur Strukturhaltung und für Funktionsleistungen benötigten Energiebetrages. Sie schließt durch mathematische Berechnungen u.a. des sog. respiratorischen Quotienten (Kohlendioxidabgabe vs. Sauerstoffaufnahme) mit konsekutiver Ableitung des kalorischen Äquivalentes (Energiebetrag aus der Umsetzung eines Nährstoffsubstrates mit 1 Liter Sauerstoff) auf die Wärmeabgabe und damit den Energieumsatz (2). Ergebnisse werden u.a. durch Tragen der Atemgasmaske, Temperaturveränderungen, aktuelles Ernährungsverhalten oder Tagesschwankungen im Sauerstoffverbrauch beeinflusst. Ein anderes Verfahren zur Bestimmung des Energiebedarfes ist dessen Berechnung aus kinetischen Daten (1). Genutzt werden Messungen von Bodenreaktionskräften und Veränderungen des Körpermasseschwerpunktes, um die bei der Fortbewegung verrichtete mechanische Arbeit zu ermitteln. Auf dieser Grundlage lässt sich ebenfalls der Energiebedarf einzelner Gelenke bilanzieren. Energieumsatzberechnungen dienen u.a. der Optimierung von Bewegungsabläufen prothetisch Versorgter.

Auswertung und Einflussfaktoren

Für valide Interpretationen werden bei Ganganalysen Ergebnisse aus einer Vielzahl von Schrittzyklen betrachtet. Hinsichtlich der Anzahl von Zyklen für eine Mittelwertbildung findet man in der Literatur unterschiedliche Angaben (3-20 Zyklen). Aufgrund der variierenden Zyklusdauer beim Gehen erfolgt die Mittelung meist im Anschluss an eine Zeitnormierung der Einzelzyklen, d.h. nach Umwandlung der absoluten Bewegungszeit in relative Zeiteinheiten (0-100 % Gangzyklus). Unter Laborbedingungen ist mit Abweichungen vom alltagstypischen Fortbewegungsmuster zu rechnen. Ursachen liegen u.a. in physischen (Geräte, Kabel etc.) und psychophysischen („Untersuchungs-, Testsituation“) Störeinflüssen. Körperhöhe und Beinlänge sind weitere beeinflussende Faktoren. Eine Vielzahl von Gangparametern steht in linearem Zusammenhang zur Fortbewegungsgeschwindigkeit. Speziell bei Gruppen- oder Prä-Post-Vergleichen ist die Berücksichtigung ungleicher Gehgeschwindigkeiten entscheidend. Weiterhin beeinflusst in Abhängigkeit der Zielparame- ter die Wahl von freier Gehstrecke oder motorisiertem Laufbandergometer Aussagekraft und Vergleichbarkeit von Resultaten.

Anwendung in der Sportmedizin

In der sportmedizinischen Anwendung der Ganganalyse werden die Basistechniken der systematischen visuellen Beobachtung und der Weg-Zeit-Messung indikationsspezifisch durch unterschiedliche instrumentelle Untersuchungen und die Messung definierter Zielgrößen ergänzt.

Die Tabelle zeigt Anwendungsbereiche, bei denen Ganganalysen sportmedizinische Untersuchungsergebnisse verlässlich und sinnvoll ergänzen.

Fazit

In Verbindung mit objektiven wie subjektiven Angaben anderer Disziplinen liefern Ganganalysen Entscheidungshilfen für Beginn, Fortsetzung, Änderung oder Beendigung präventiver oder rehabilitativer Maßnahmen. Parallel profitiert die Entwicklung neuer Prothesen und Hilfs-

Tabelle: Ausgewählte Anwendungsfelder und Parameter ganganalytischer Messungen in der Sportmedizin

Indikationsgebiete	Ziele	Ganganalyseverfahren	Hauptzielparameter
Fußdeformitäten	Orthopädische Schuhzurichtung	Pedographische Druckverteilung	Spitzendruckwerte, relative Lastverteilung
Risikoscreening, Verletzungsprophylaxe	Fehlbelastungs-, Tauglichkeits-, Technikanalyse	Kinematik, Kinetik/ Bodenreaktionskraft	Bewegungsausmaße, Seitendivergenzen, Asymmetrien
Orthetische Hilfsmittelversorgung	Überlastungs-, Rezidivprophylaxe	Kinematik, Kinetik/ Bodenreaktionskraft	Winkelbeschleunigung, Kraftangriffsverlauf
Bein-/Endoprothetik	Bewegungs- und Versorgungsoptimierung	Energieumsatzmessung	VO ₂ -Verbrauch, resp. Quotient
	Defizitanalyse, Therapieplanung, Verlaufskontrolle	Kinematik, Kinetik/ inverse Dynamik, EMG	Kraftanstiegsraten, Gelenkmomente, Rekrutierungsfolgen
Muskelkraft- und Erregungsdefizite, Paresen	Befundkontrolle, dynam. Muskelfunktionsdiagnostik	Kinesiologische EMG	Synergistische Aktivierungsfolge, An/Aus, Amplitude
Gang- und Balanceunsicherheit	Sturzprophylaxe	Weg-Zeit-Messung	Schrittlänge, Kadenz, Spurbreite
Neurologische Erkrankungen (z.B. M. Parkinson)	Interventionsassessment, Outcome-Messung	Kinematik	Bewegungsumfang, -variabilität

mittel von ganganalytischen Forschungsergebnissen. In Kombinationen mit computergestützten Animationen eröffnen sich weitere Anwendungsfelder z.B. in Form von bewegungsanalytisch begleitetem Rückmeldungstraining. Die Entwicklung neuer Messapparaturen wird die Datenerhebung in realen Alltagssituationen verbessern. Durch Einsatz der Satellitennavigation sind weitere Impulse für die Feldforschung prognostizierbar.

Literatur

1. Chambers H, Sutherland D: A practical guide to gait analysis. J Am Acad Orthop Surg 10 (2002) 222-231.
2. Meyer T: Der Respiratorische Quotient (RQ). Dtsch Z Sportmed 54 (2003) 29-30.
3. Nigg B, Herzog W: Biomechanics of the musculo-skeletal system. Wiley & Sons, New York, 1999.
4. Perry J: Gait analysis - normal and pathological function. McGraw-Hill, New York, 1992.
5. Pfeifer K, Vogt L, Banzer W: Kinesiologische Elektromyographie (EMG). Dtsch Z Sportmed 54 (2003) 331-332.
6. Whittle MW: Gait Analysis - an Introduction. 3. Auflage, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002.
7. Winter D: Biomechanics and motor control of human movement. 2. Auflage, Wiley-Interscience, New York, 1990.

Korrespondenzadresse:

Dr. Lutz Vogt
Abteilung Sportmedizin
Johann Wolfgang Goethe-Universität
Ginnheimer Landstr. 39
60487 Frankfurt/Main
E-mail: L.Vogt@sport.uni-frankfurt.de