

EIN NEUARTIGES MESSSYSTEM ZUR EXAKTEN UND EFFIZIENTEN ERMITTLUNG DES EXTREMITÄTENVOLUMENS

Elbischger P¹, Jerolitsch-Binder J¹, Prasser M¹, Menard C¹

Kurzfassung

In der Arbeit wird ein neuartiges, bildbasiertes Messsystem zur raschen, berührungslosen und akkuraten Bestimmung des Extremitätenvolumens im Kontext lymphologisch relevanter Untersuchungen bzw. zur Therapieverlaufskontrolle vorgestellt.

Abstract

The work presents a novel image-based measuring system for the rapid, contactless and accurate measurement of the volume of extremities in the context of lymphological relevant examinations and for monitoring the therapy progress.

Keywords – Lymphologie, Messsystem, 3D Rekonstruktion, Volumsmessung, Diagnosestellung

1. Einführung

Computer- und Magnetresonanztomographie, Röntgen, Ultraschall oder Elektroenzephalographie sind prominente Vertreter medizinischer Messverfahren, die bereits seit Jahrzehnten mit großem Erfolg zur Diagnosestellung in den unterschiedlichsten Bereichen der Medizin eingesetzt werden. Vor diesem Hintergrund scheint es sonderbar, dass es im Bereich der Lymphologie aktuell keine geeigneten technischen Messverfahren gibt, die eine auf quantitativen Informationen basierende Diagnosestellung und Therapieverlaufskontrolle erlauben. In dieser Arbeit stellen wir ein von unserer Gruppe entwickeltes neuartiges Messsystem für den Einsatz im Bereich der Lymphologie vor, welches die effiziente und exakte Ermittlung relevanter quantitativer Informationen im klinischen Alltag ermöglicht.

Der medizinische Projektpartner ist das Zentrum für Lymphologie des LKH Wolfsberg (Primar Walter Döller), in welchem pro Monat etwa 80 bis 100 Patienten und Patientinnen in regelmäßigen Abständen einer volumetrischen Messung mittels Kuhnke-Methode [2] unterzogen werden – Tendenz stark steigend. Der industrielle Projektpartner ist die Medizintechnik Firma Sonotechnik, die den Vertrieb des Geräts übernehmen wird.

¹ Medizinische Informationstechnik, FH Kärnten, Klagenfurt, Österreich

1. 1. Lymphherkrankungen

Bei jedem Pulsschlag verlassen Eiweißstoffe über kleine Poren das Blutgefäßsystem, um das umliegende Gewebe zu ernähren. Im Gewebe bilden diese Eiweiße gemeinsam mit zahlreichen, in Wasser gelösten, Stoffwechselprodukten und zellulären Elementen, die Lymphe. Bei gesunden Menschen werden die Lymphe durch das Lymphgefäßsystem in Richtung Lymphknoten wieder aus dem Gewebe abtransportiert. Dort wird diese Lymphe mechanisch und immunologisch gereinigt und über Lymphsammelrohre und Lymphstämme wieder dem Blutkreislauf zugeführt. Bei einer Dysfunktion des Lymphsystems staut sich Eiweiß im Gewebe – es entsteht das Lymphödem. Diese Störung kann angeboren (primäre Lymphödeme) oder erworben (sekundäres Lymphödem) durch Verletzungen, Operationen (vor allem im Rahmen von Krebserkrankungen), Bestrahlung oder Infektionen ausgelöst werden. Lymphödeme können in allen Körperregionen auftreten, am häufigsten sind sie an Armen und Beinen zu beobachten. Das Krankheitsstadium von Lymphherkrankungen ist in vier Gruppen, von ödemlos bis hin zu extremen Ödemausdehnungen (Elephantiasis), unterteilt. [1]

1. 2. Diagnose- und therapierelevante Größen

Für die Diagnostik und Therapie von Lymphödemem an Extremitäten spielt neben der Anamnese, der Palpation und der Bestimmung diverser Laborwerte vor allem das Extremitätenvolumen eine entscheidende Rolle. Dabei sind die folgenden Aspekte von zentraler Bedeutung:

- Zur Therapieverlaufskontrolle ist eine regelmäßige Erfassung des *Extremitätengesamt-volumens* notwendig.
- Um kritische Bereiche der Extremitäten zu identifizieren und diese einer gezielten Behandlung zu unterziehen, wird darüber hinaus der *Querschnittsverlauf* bzw. der Volumsverlauf über die gesamte Länge der Extremität in den Kontrolluntersuchungen verglichen.
- Im Rahmen der Therapie und der nachfolgenden Rehabilitationsphase muss der Patienten einen individuell an die Extremität angepassten Kompressionsstrumpf tragen. Zur Herstellung der Kompressionsstrümpfe wird die exakte *geometrische Information der Extremität* benötigt.

Zur Erfassung des Extremitätenvolumens sind derzeit drei unterschiedliche Verfahren im Einsatz. Das genaueste dieser Verfahren ist die *Wasserverdrängung*, die allerdings auf die Erfassung des Gesamtvolumens von Armen beschränkt ist. Dieses Verfahren ist naturgemäß problematisch hinsichtlich der Hygieneanforderungen in Krankenhäusern und entsprechend zeitintensiv.

Das *Perometer*TM ist ein opto-mechanisches System, welches prinzipiell die Erfassung des Extremitätenvolumens über die Länge der Extremität erlaubt. Dabei wird die zu vermessende Extremität innerhalb eines in einer Führung verschiebbaren Metallrahmens positioniert und der Rahmen entlang der Extremität verschoben. Der mechanische Aufbau des PerometersTM verhindert in vielen Fällen die Vermessung der zumeist krankheitsbedingt, bewegungseingeschränkten Personen, da die Positionierung der Extremität im Gerät nicht möglich ist. Zur Vermessung von Extremitäten mit sehr stark ausgeprägtem Krankheitsbild ist diese Methode völlig ungeeignet. Das Gerät ist auch sehr fehleranfällig und wird daher kaum eingesetzt.

Die am weitesten verbreitete Methode ist die Vermessung nach *Kuhnke* [2]. Dabei wird der Extremitätenumfang in äquidistanten Abständen von etwa 4cm manuell von zwei Personen mittels Maßband erfasst. Eine variable Zugkraft am Maßband führt dabei zu einer lokalen Verformung des wei-

chen Gewebes und in weiterer Folge zu unkontrollierbaren Ungenauigkeiten in der Bestimmung des Umfangs. Der gesamte Erfassungsprozess geschieht manuell über mehrere Stufen (Papier → Excel-File → Report) und ist daher äußerst fehleranfällig. Darüber hinaus beträgt die durchschnittliche Untersuchungszeit etwa 30 Minuten, was aus Kostengründen die Anzahl der Verlaufskontrollen, in denen das Extremitätenvolumen quantitativ erfasst werden kann, stark limitiert.

2. Konzept und Aufbau des Messsystems

Das Ziel war die Entwicklung eines kostengünstigen und möglichst platzsparenden Messsystems zur raschen, berührungslosen und akkuraten Bestimmung des Extremitätenvolumens.

Zur 3D Volumsrekonstruktion wurde ein bildbasierter Ansatz gewählt. Zur Bilderfassung wurden Webcams mit einer ausreichenden Auflösung und guter Bildqualität verwendet, sodass das System auch gleichzeitig zur Fotodokumentation verwendet werden kann.

Die Applikationssoftware wurde in C# entwickelt. Sie ist auf die Bedürfnisse der Anwender im Krankenhaus abgestimmt und benutzerfreundlich ausgeführt. Patienten- und Untersuchungsdaten (Vitalparameter, Digitalbilder, Volumenverläufe, etc.) werden in einer zentralen Datenbank verwaltet, auf welche innerhalb des Netzwerks mittels der Applikationssoftware zugegriffen werden kann. Zudem ist es möglich, aus dem System umfassende Reports in pdf-Form zu generieren.

2.1. Volumenbestimmung

Um ein möglichst robustes und damit praxistaugliches Verfahren zur 3D Rekonstruktion zu erhalten, wurde ein einfacher, modellbasierter Shape-from-Silhouette-Ansatz verwendet [3]. Das 3D Rekonstruktionsproblem reduziert sich damit primär auf die robuste Segmentierung der zu vermessenden Extremität, die grundsätzlich eine hohe Variabilität in Form, Farbe und Textur aufweisen kann. Überdies hinaus wird mit dem vorgeschlagenen Ansatz das fehleranfällige Lösen von Korrespondenzproblemen, wie sie zum Beispiel bei der Stereorekonstruktion [4] notwendig sind, vermieden. Aus Vorstudien unserer Gruppe war bereits bekannt, dass Extremitätenquerschnitte gut durch Ellipsenmodelle angenähert werden können. Der modellbasierte Ansatz erlaubt auch eine Approximation der Extremität in den von Kameras nicht erfassten Bereichen der Extremität und reduziert so die Hardwarekomplexität des Messsystems.

Das Segmentierungsproblem konnte durch die Kombination einer adaptiven Hintergrundsubtraktionsmethode mit einer Farbraumklassifikation zur Schätzung des aktuellen Hintergrunds und einem anschließenden Region-Growing-Verfahren für die zuverlässige Segmentierung der vorderseitigen Extremität gelöst werden.

Es wurden mehrere 3D Rekonstruktionsalgorithmen entwickelt, die anhand der segmentierten Silhouette die bestmöglichen Ellipsenparameter schätzen. Die unterschiedlichen Schätzverfahren reichen methodisch von der einfachen Annahme einer hauptachsenparallelen Sicht auf die Ellipse bis zu komplizierten, optimiererbasierten Methoden, welche direkt mit den in die Beobachtungsrichtungen projizierten Ellipsenausdehnungen rechnen. Mittels Simulationen wurden die verschiedenen Verfahren einer umfassenden Genauigkeits- und Robustheitsanalyse unterzogen. Aus diesen Analysen konnten die optimale Anzahl der notwendigen Kameras und deren Anordnung sowie die maximalen zu erwartenden Rekonstruktionsfehler abgeleitet werden.



Abbildung 1: (a) Modellaufbau des Messsystems, (b) Verschiedene Tonmodelle von Extremitäten unterschiedlicher Morphologie

Die Rekonstruktionsgenauigkeit des finalen Setups wurde mittels eines maßstabgetreu verkleinerten Modellaufbaus mit realitätsnahen Tonmodellen getestet, die unterschiedlich stark ausgeprägten Krankheitsbildern entsprechen, siehe *Abbildung 1*. Die Extremitätenmodelle wurden mittels Wasserdrängungsmethode präzise vermessen und die Volumenverläufe als Referenzdaten zur Evaluierung des Messsystems herangezogen.

2. 2. Hardware-Setup

Das entwickelte Messsystem besteht aus drei, paarweise stereo-kalibrierten RGB-Webcams Logitech HD Pro C910, mit welchen die zu vermessende Extremität von drei unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen wird. Die Blickwinkeländerung zwischen zwei benachbarten Kameras beträgt 60° . Die Kameras sind in einer Höhe von 50cm montiert und zeigen mit einem Öffnungswinkel von 61° in Richtung der Bildsensorhöhe und 45° in Richtung der Bildsensorbreite eine gute Weitwinkelcharakteristik, was eine kompakte Bauweise ermöglicht. Die Kameras sind mit der längeren Bildsensorseite parallel zur Längsachse der Extremitäten ausgerichtet und bilden bei dem gewählten Objektstand von 1,1m eine Objekthöhe von etwa 1,3m ab. In der höchsten Kameraauflösung von 1920×1080 px ergibt sich somit eine Ortsauflösung von 0,67 mm/px.

2. 3. Softwareapplikation

Abbildung 2 zeigt die grafische Benutzeroberfläche der entwickelten Softwareapplikation. Hier sind die wichtigsten von der Software unterstützten Funktionalitäten sichtbar: (i) Patientenverwaltung, (ii) Messdatenverwaltung, (iii) Grafische Darstellung der Messdaten, (iv) Messdatenaufnahme, (v) 3D Rekonstruktion, (vi) Reportgenerierung. Um Fehlbedienungen des Messsystems vorzubeugen sind Funktionalitäten zur Kalibrierung und Konfiguration des Systems nur für Benutzer mit entsprechenden Berechtigungen zugänglich.

Ein typischer Messablauf besteht aus den folgenden Schritten: Zunächst werden die Patientendaten aufgerufen, die zu vermessende Extremität ausgewählt und untersuchungsrelevante Daten wie etwa das aktuelle Körpergewicht erfasst. Danach wird der Messvorgang eingeleitet, der mit der Positionierung der Extremität, an einer am Boden markierten Stelle, beginnt. Um das korrekte Einrichten zu erleichtern werden Livebilder von allen drei Kameras mit gekennzeichnete Mittellinie dargestellt. Ist der Patient eingerichtet, kann die eigentliche Vermessung gestartet werden. Der zu vermessende Höhenbereich wird in der ersten Referenzmessung manuell festgelegt und in den Nachfolgemessungen übernommen. Zur raschen Plausibilitätsprüfung wird das Segmentierungsergebnis als rote Objektgrenze in die Originalbilder eingezeichnet. Nach wenigen Sekunden steht das Messergebnis als 3D Schichtmodell zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung.

Als Ergebnis der Vermessung und zur Beurteilung des Therapieverlaufes dienen Grafiken, die unter anderem den Segmentradius, das Segmentvolumen in beliebigen Segmenthöhen, das absolute und das relative Segmentvolumen bezogen auf die Referenzmessung sowie das gesamte Extremitätenvolumen über die Zeit darstellen, siehe Abbildung (unten). Zeitreihen der Volumenverläufe können zur Therapieverlaufskontrolle beliebig miteinander verglichen werden.

3. Evaluierung des Messsystems

Bereits die Genauigkeitsanalysen mit dem verkleinerten Modellaufbau an den Tonmodellen lieferten vielversprechende Ergebnisse. Das große und endgültige Hardwaresetup, wie es später auch in den Kliniken eingesetzt werden soll, ist erst seit wenigen Tagen fertiggestellt, weshalb noch keine umfassende Genauigkeitsanalyse durchgeführt wurde. Allerdings liegen bereits die Ergebnisse für die Vermessung eines Beines vor, die, wie es aufgrund der unveränderten Methodik zu erwarten war, die Ergebnisse des kleineren Modellaufbaus bestätigen.

Um die Genauigkeit des Messsystems zu evaluieren wurde das rechte Beinvolumen einer Testperson mittels Wasserverdrängungsmethode zu 5442 cm^3 bestimmt und als ground truth verwendet. Um die für die Praxis maßgebliche Wiederholgenauigkeit der Messungen abzuschätzen wurden 30 Wiederholungsmessungen zur Bestimmung des Beinvolumens mit dem Messsystem getätigt, wobei die Versuchsperson das Setup zwischen den einzelnen Messungen verlassen und neu betreten musste. Dabei wurde ein mittleres Volumen von 5323 cm^3 bei einer Standardabweichung von 97 cm^3 ermittelt. Die Abweichung erklärt sich aus den geringfügig unterschiedlichen Positionierungen der Extremität relativ zum Kamerasystem. Das Volumen wurde im Mittel etwa um 2% unterschätzt, wobei die Messungenauigkeit der Wasserverdrängungsmethode für große Objekte noch nicht bekannt ist und daher bis zu einem gewissen Teil zum beobachteten Gesamtfehler beitragen kann. Die Wiederholgenauigkeit wird als das Zweifache der Standardabweichung angegeben und liegt im Bereich von lediglich 3,6%. Im Vergleich zur fehleranfälligen manuellen Messung ist dies ein sehr gutes Ergebnis.

4. Schlussfolgerungen

Die Untersuchung kann mit dem vorgestellten Messsystem von einer einzelnen Person durchgeführt werden und benötigt etwa drei Minuten, was verglichen zu der aktuell notwendigen Untersuchungszeit von 30 Minuten eine signifikante Zeitersparnis darstellt. Dadurch wird das medizinische Personal entlastet und gleichzeitig eine engmaschige Volumenverlaufskontrolle durch zusätzliche Messungen ermöglicht. Die im System erfassten Daten werden in einer Datenbank verwaltet, was die Konsistenz der Daten gewährleistet und Fehler, wie diese bei manuellen Aufzeichnungen und Übertragungen passieren, weitestgehend vermieden. Die Daten können aus dem System in Standardformaten exportiert werden und zum Beispiel Strumpfh Herstellern zur Verfügung gestellt werden. Der modellbasierte Rekonstruktionsansatz macht das System robust gegen vielerlei Störungen und damit im klinischen Betrieb sinnvoll einsetzbar.

Das bildgebende Verfahren besitzt eine deutlich erhöhte Messauflösung, was in wesentlich exakteren Messergebnissen resultiert (kleiner 4% Wiederholgenauigkeit). Zusätzlich wird durch die berührungslose Messmethodik die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse signifikant gesteigert.

Als nächstes soll das Messsystem im Rahmen einer klinischen Studie an einer großen Anzahl von Patienten angewandt werden. Nach positivem Studienabschluss ist vorgesehen das Messsystem kommerziell zu vermarkten.



Abbildung 2: Grafische Benutzeroberfläche für die gesamte Patienten- und Messdatenverwaltung, sowie Aufnahmen der Patienten und dazugehörige Messergebnisse in unterschiedlichsten Darstellungsmöglichkeiten

5. Literatur

- [1] HERPERTZ, U., Ödeme und Lymphdrainage: Diagnose und Therapie von Ödemkrankheiten, 4. Auflage, Schattauer GmbH, 2010.
- [2] KUHNKE, E., Volumenbestimmung entrundeter Extremitäten aus Umfangsmessungen, Lymphologie, 1:35-44, 1978.
- [3] BOTTINO, A., LAURENTINIA, A., Retrieval of Shape from Silhouette, Advances in Imaging and Electron Physics, 139:1-73, Elsevier, 2006.
- [4] HARTLEY, R., ZISSERMAN, A., Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge Univ. Press; 2 ed., 2004.

Corresponding Author

Pierre Elbischger
 Medizinische Informationstechnik, FH Kärnten, Österreich
 Primoschgasse 10, A-9020 Klagenfurt
 Email: p.elbischger@fh-kaernten.at