

1 Einleitung

1.1 Überblick

In der heutigen chirurgischen Praxis werden immer häufiger bildbasierte, rechnergestützte Navigationssysteme zur Unterstützung der Orientierung und zur Instrumentenführung eingesetzt. Aufbauend auf den Fortschritten in der medizinischen digitalen Bildgebung und Bildverarbeitung, in der Rechnertechnologie und auf dem Gebiet der dreidimensionalen Positionsensorik wurden neben einer Vielzahl von experimentellen Forschungssystemen eine Reihe von kommerziellen Systemen für verschiedene Anwendungsbereiche entwickelt und auf den Markt gebracht. Obwohl die ersten Entwicklungen in der modernen intraoperativen Navigation aus dem Bereich der HNO-Chirurgie kamen, wurden die meisten Komplettlösungen für einen Einsatz in der Neurochirurgie konzipiert. Für die kieferchirurgische Behandlung von Dysgnathien stehen bisher nur wenige speziell ausgerichtete Navigationssysteme zur Verfügung. Die Besonderheiten der Kieferchirurgie erfordern eine Genauigkeit im Bereich von 0,5 mm - 1 mm, die Möglichkeit der Kontrolle verdeckter Strukturen in kleinem Operationsfeld und die freie Beweglichkeit des Patientenkopfes, die eine Fixierung nicht erlaubt. Diese Besonderheiten stellen hohe Anforderungen an die verwendete dreidimensionale (3-D-) Sensorik, die in den Navigationssystemen zur Bestimmung der räumlichen Orientierung und Position von Instrumenten und Gewebesegmenten eingesetzt wird. Jedes Sensorsystem muß daher vor dem Einsatz in einem Navigationssystem hinsichtlich Genauigkeit und praktischen Eigenschaften untersucht werden. Insbesondere ist das Verhalten des Sensorsystems unter den komplizierten Bedingungen im Operationssaal, die erheblich von den Laborbedingungen abweichen, zu betrachten. Für viele Anwendungen in der Kieferchirurgie, insbesondere für Dysgnathieoperationen, genügt es, die Navigation auf starres Knochengewebe zu beschränken. Dadurch kann eine Verminderung der Genauigkeit durch die Bewegung des flexiblen Weichgewebes wie beim sogenannten „Brain Shift“ - der Verschiebung des Hirngewebes beim Öffnen der Schädelkalotte für neurochirurgische Eingriffe - vermieden werden. Die für die Korrelation der Bilddaten mit den Patientendaten verwendeten Registrierungsalgorithmen können unter der Randbedingung, auf starre Objekte beschränkt zu sein, entsprechend einfach gestaltet werden.

Navigationssysteme werden unter anderem dazu eingesetzt, intraoperativ Strukturen zu lokalisieren, die präoperativ im Bildmaterial identifiziert wurden. Eine weitere Anwendung liegt in der Führung von Instrumenten und in der Positionierung von osteotomierten Knochensegmenten. Diese Möglichkeiten bieten einen Einsatz von Navigationssystemen in der Kieferchirurgie zur Unterstützung von Dysgnathieoperationen an. Für die konventionelle Planung der operativen Korrektur skelettaler Diskrepanzen im Kieferbereich wird standardmäßig eine Modelloperation an den Gipsabdrücken des Patientengebisses vorgenommen. Aus der Modelloperation ergeben sich für die diversen Kiefersegmente Verschiebungs- und Rotationswerte in alle Raumrichtungen. Die Übertragung der Planungsergebnisse in den

Operationssitus erfolgt mit Hilfe sogenannter Aufbißsplints, die an den Gipsabdrücken abgenommen und in verschiedenen Phasen der Operation dem Patienten eingesetzt werden. Die Einstellung der Kiefersegmente orientiert sich an den im Splint kodierten Verschiebungswerten und an der optischen Kontrolle durch den Chirurgen. Innerhalb dieser Prozedur kann an verschiedenen Punkten Rechnertechnik zur Unterstützung herangezogen werden. So kann die Operationsplanung am Gipsmodell durch eine dreidimensionale Visualisierungs- und Planungssoftware am Rechner begleitet werden. Diese rechnergestützte Planung erfordert allerdings zusätzlich eine computertomografische (CT-) Aufnahme vom Patienten als Datenbasis. Dies ist jedoch bei Dysgnathiepatienten normalerweise nicht der Fall. Die Ermittlung der Verschiebungswerte an den Gipsmodellen im Anschluß an die konventionell durchgeführte Modelloperation ist eine weitere rechnertechnisch durchführbare Aufgabe. Zu diesem Zweck ist eine geeignete Sensorik notwendig. Die rechnertechnisch erfaßten Daten können dann direkt, also ohne Kodierung in einem Splint, in die Operation übertragen werden. Die Ergänzung der konventionell durch die Splint-Methode erzielten intraoperativen Kontrolle der Verlagerungen ist eine ideale Aufgabe für ein Navigationssystem.

Ein kommerzielles Navigationssystem, welches prinzipiell eine genügende Flexibilität und Teile der Funktionalität für eine Anwendung in der Kieferchirurgie bietet, ist das „Virtual Patient System“ der Firma Artma (Wien). Dieses System ist in der Lage, Bilddaten verschiedener Modalitäten zu importieren, mit den geometrischen Verhältnissen der Operationssituation zu korrelieren und mittels graphischer Overlays eine Zielführung der chirurgischen Instrumente oder von Gewebesegmenten zu visualisieren. Das System weist jedoch in mehreren wesentlichen Punkten Einschränkungen auf. So ist die mit dem System gelieferte Sensorik, ein elektromagnetisches Trackingsystem, empfindlich gegenüber Metallobjekten und niederfrequenten elektromagnetischen Störfeldern. Die in der Software des Navigationssystems umgesetzten Registrierungs-, Korrelations- und Visualisierungsalgorithmen sind zudem von begrenzter Genauigkeit. Um die Verwendbarkeit und Einsatzgebiete des Systems zu bestimmen, ist die Entwicklung einer Planungsprozedur und der intraoperativen Umsetzung sowie die Evaluation der erreichbaren Genauigkeit beim Einsatz am Patienten notwendig. Die Ergebnisse einer solchen Untersuchung werden genutzt, um ein neuartiges, speziell für die präoperative Bestimmung und intraoperative Kontrolle der Kieferverlagerung geeignetes Meßsystem zu entwickeln.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit ist zunächst die Evaluation des kommerziellen kieferchirurgisch und zahnmedizinisch einsetzbaren Navigationssystems „Virtual Patient System“ und der zugrundeliegenden Technologie bei der operativen Korrektur von dysgnathen Kieferstellungen. Basierend auf den Ergebnissen dieser Evaluation erfolgt die mathematische Beschreibung eines neuartigen Verfahrens zur Bestimmung der Verschiebungswerte in der Operationsplanung. Ein solches Verfahren dient gleichermaßen der Erfassung der Verschiebungswerte und der intraoperativen Kontrolle und Zielführung anhand der Zielgrößen. Die Übertragung der Planungsdaten kann dadurch standardisiert und objektiviert und somit unabhängig vom bedienenden Personal werden. Das sich daraus ergebende Hauptziel der Arbeit ist die soft-

waretechnische Realisierung des neuen Verfahrens unter Einbeziehung der Untersuchungen des Navigationssystems gewonnenen Ergebnisse. Die Realisierung erfolgt plattformunabhängig und schließt eine schnell, intuitiv und übersichtlich zu bedienende Benutzeroberfläche ein.

Die Evaluation des kommerziellen Artma-Navigationssystems beginnt mit der Untersuchung der Genauigkeit des Trackingsystems, an die sich eine Patientenuntersuchung anschließt. Dabei werden Patienten betrachtet, bei denen eine Oberkieferverlagerung mit oder ohne weitere Segmentierung im Rahmen einer mono- oder bimaxillären Osteotomie vorgenommen wird.

Für das neue Verfahren bietet sich zur Datenerfassung sowohl für die Planung als auch für die intraoperative Kontrolle die Verwendung des elektromagnetischen Trackers an. Die Erfassungsprozedur kann dadurch einfach und schnell durchgeführt werden und ist unabhängig von der Art des gewählten Modells. Als Basis für die gemessenen und errechneten Positions- und Verschiebungswerte ist die zahnmedizinisch definierte Kauebene geeignet, da sie einen standardisierten Vergleich auch über verschiedene Patienten hinweg ermöglicht. Aus den erfaßten Daten können die Kenngrößen abgeleitet werden, wodurch die intraoperative Einstellung der Segment- und Instrumentenposition und die Kontrolle des Operationsergebnisses erleichtert wird. Zur Berechnung der Kenngrößen müssen die zugrundeliegenden vektorgeometrischen Beziehungen analysiert und formuliert werden. Das Verfahren wird durch eine Genauigkeitsuntersuchung und eine Verifikation am Patienten bewertet.

Entsprechend den Fragestellungen gliedert sich die Arbeit wie folgt: Im Abschnitt 2 werden die technischen Grundlagen zur Navigation, Kalibration und die Positionstrackingverfahren dargestellt. Darüber hinaus werden die medizinischen Techniken zur operativen Korrektur von Dysgnathien erläutert, bei denen die Navigation zum Einsatz kommt. Der Abschnitt 3 beinhaltet die Untersuchungen mit dem Artma-Navigationssystem, die Genauigkeitsuntersuchungen des Trackingsystems und die Auswertung der Patientenstudien. Aufbauend auf den Ergebnissen der Navigationsstudien wird in Abschnitt 4 die mathematische Formulierung und die Java-Implementation des neuen Verfahrens zur präoperativen Vermessung von Planungsmodellen und der intraoperativen Kontrolle der Verschiebungswerte am Patienten erläutert. Abschließend wird die Verifikation des Verfahrens in Form von Genauigkeitsstudien im Vergleich zwischen Labor- und Operationsumgebung und im zweiten Schritt beim intraoperativen Einsatz am Patienten beschrieben.