

רובוטיקה רפואית

עבודה במסגרת סמינר בוגר

**הפקולטה למדעי הרפואה
האוניברסיטה העברית בירושלים**

אוקטובר 2001

מנחה: פרופ' לאו יוסקוביץ, הפקולטה למדעי המחשב.

מגישה: יפעת שור

רקע

בתחילת שנות התשעים החלו לפתח רובוטים שימשו לעזר בתחום הרפואה ובעיקר בניתוחים. בפיתוח טכנולוגיות ניתוחיות הכוונה היא להקל על העומס העומד בפני המנתח, לצמצם את מספר האנשים בחדר הניתוחים ולהעניק יכולת תפקודית מעבר ליכולתו של המנתח. היכולת המכנית של הרובוט בשילוב עם יכולת האינטגרציה והחשיבה של המנתח יכולות לבצע משימות בצורה יעילה בהרבה.

בחלק מן המקרים השימוש ברובוטים מסייע בהשגת רמות דיוק גבוהות יותר ואף ביצוע תנועות שאינן אפשריות בידי המנתח. למשל היכולת של הרובוט להחזיק ציוד ניתוחי באופן מסוים והגדלת יכולת דיוק וביצוע הפעולות בשטח מוגדר. יתרונות אלו מנוצלים בניתוחי אורתופדיה ונוירו כירורגיה. אספקט אחר שמנוצל במערכות הרובוטיות הוא הפחתת ההתעייפות והפחתת מספר הנוכחים בניתוח. הדיכוטומיה בין שני תחומים אלו אינה אבסולוטית, בחלק מן המקרים תכונות משני המישורים מתמזגות יחדיו. לדוגמא בניתוחי לפרוסקופיה, בנוסף לתפקידו הבסיסי של הרובוט שהוא החזקת המצלמה והכלים המשמשים לניתוח, המערכת הלפרוסקופית יכולה לפעול במגוון פעולות תחת הוראה ישירה של המנתח ולפעול גם באופן אוטונומי יותר תחת פיקוח המנתח להשתלב בפרוצדורות ניתוחיות.

השימוש ברובוטים בניתוחים מקדם את יכולתו של המנתח לבצע מספר פעולות בעת ובעונה אחת:

- א. לשפר ולהרחיב את שיטות הטיפול המסורתיות של האדם המנתח, ולהקטין ככל האפשר את השימוש בניתוחים חודרניים.
- ב. לספק יכולות תפקודיות שאינן למנתח. לדוגמא עבודה עם מערכות תלויות מחשב האחראיות לתכנון האופרטיבי והוצאתם לפועל.

בני אדם ורובוטים הם בעלי תכונות משלימות ומקבילות. באמצעות שילוב בניהם ניתן יהיה לספק טיפול יעיל יותר ומשתלם יותר כלכלית בהשוואה לטיפול שהיינו מקבלים מכל אחד בנפרד.

יתרונות מערכת רובוטית :

- א. יכולת שליטה גבוהה במיקום כלים ניתוחיים והחזרתם למיקום קודם בדיוק גבוה .
- ב. שליטה גבוהה במגוון דרגות כוח המופעלות באופן מדויק, ובהתאם לנדרש .
- ג. הפחתת הרעד האופייני למנתחים.
- ד. הגדלת טווח הכוחות שניתן להפעיל הן כלפי הגבול הגבוה והן כלפי הגבול הנמוך – כוחות שבני אדם אינם מסוגלים להפעיל.
- ה. יכולת לתמוך באופן יציב במערכות ניתוחיות המשמשות לחישה, מצלמות ומכשירים נוספים באופן אלחוטי.
- ו. הורדת עלויות כספיות ע"י הפחתת כוח האדם בחדר הניתוח (לדוגמא - החלפת תפקידים המבוצעים בד"כ ע"י מתמחים כמו החזקת כלי ניתוח)
- ז. שיפור הגישה לחולה
- ח. הפחתת בעיות הנובעות מעיפות או רגישות הצוות לזיהומים.

טבלת השוואה בין המנתח לרובוט

חסרונות	יתרונות	
<ul style="list-style-type: none"> • רעד • התעייפות • הגבלה ביכולת התפקוד והשליטה בידיים מעבר לסקלה האנושית. • מגושם • יכולת שמירה על דיוק גיאומטרי נמוכה. • קושי לשמור על סטריליות. • רגישות לקרינה ולזיהומים. 	<ul style="list-style-type: none"> • יכולת שיפוט טובה • קואורדינציה טובה בין העיניים לידיים • אינטגרציה גבוהה של מידע • יכולת אדפטיבית וגמישות גבוהה • יכולת גבוהה ומאומנת של שליטה בכוח הידיים (במגבלות הסקלה האנושית) • יכולת לבצע אינטגרציה מהירה עם מידע חדש. • מפותח מבחינה אינטלקטואלית. • קל לתת לו הוראות. • יכולת להסביר את מהלך פעולותיו לסובבים. 	אדם מנתח
<ul style="list-style-type: none"> • יכולת שיפוט נמוכה • יקר • הטכנולוגיה עדיין בשלבי פיתוח • קושי להנחות ולתת הוראות. • יכולת מוגבלת בביצוע פעולות מורכבות הכוללות בקרה ותפקידים המערבים פעילות בו זמנית של ידיים ועיניים. 	<ul style="list-style-type: none"> • רמות דיוק גיאומטרי גבוהות • יציבות • אינו מתעייף • ניתן לעיצוב ולבניה בגדלים רבים בהתאם לצורך. • לא רגיש לזיהומים או לקרינה • יכולת לבצע אינטגרציה בין חיישנים רבים ולשלוט בהם (כוח, כימי, אקוסטי...) 	רובוט

עד היום פותחו רובוטים רפואיים לשימוש ניתוחי שמחזיקים ציוד רפואי, מנווטים במהלך הניתוח, אחראים למיקום מדויק של כלי ניתוח, קובעים מסלול רצוי למעבר דרך רקמה ועוד.

רובוטים המחזיקים ציוד רפואי (assistive)

מטרת רובוטים אלו להחליף את הצוות הרפואי המסייע (כגון מתמחים) בחלק מן המשימות, לדוגמה החזקת ציוד רפואי. החלפה זו תפחית את מספר האנשים הסובבים בחדר הניתוח ועיי כך תאפשר חסכון כלכלי, תגביר את הגישה לחולה ותמנע בעיות הנובעות מהתעייפות של הצוות. דוגמאות לפעולות שמערכת זו יכולה לבצע -

א. החזקת מצלמות אנדוסקופיות

ב. מחזיקי וממקמי חלקי גוף

ג. מחזיקי מחטים

המגבלות העיקריות של רובוטים אלה כיום:

א. הענות נמוכה למשתמש (המנתח).

ב. גודל

ג. חוסר בואריביליות תפקודית.

חלק מהמערכות הרובוטיות הבאות לידי שימוש כיום מגבירות את יכולת המנתח לבצע תנועות קטנות, מדויקות ומיומנות יותר גם בחלל צר. מערכות אלו עובדות בשיתוף עם המנתח בחדר הניתוח - העבודה המשותפת תאפשר למנתח לבצע את הניתוח הפתוח המסורתי, תוך שימוש במערכות חישה טרום ותוך ניתוחיות שעשויות לשפר את תוצאות הניתוח.

מערכות לניווט (navigation)

מערכות אלו נמצאות בפיתוח. יתרון המרכזי הוא מתן מיקום מדויק של המכשיר הרפואי ביחס לגוף החולה כפי שמשקף במערכת ההדמיה הרפואית. מערכות אלו לוקחות חלק רב במערכות רובוטיות משוכללות יותר ועוזרות בתפקודן. בעתיד יש כוונה לשלב מערכות אלו עם שאר הציוד הניתוחי ועם התכנון הטרם ניתוחי.

רובוטים למיקום (positioning)

מערכות אלו משמשות בניתוחים הדורשים מיקום מדויק של כלי ניתוחי יחסית לאנטומית החולה תוך שמירה על בטחונו. דוגמאות לפרוצדורת אלו:

- הכנסת מחט לתוך calyx של הכליה.
- ביופסיות מוח וחזה.
- מערכות הנחיה להחלפת ברך.
- הנחיית אתר קידוח

האזור המיועד נקבע ע"י מערכות הדמיה תלת ממדיות טרום ניתוחיות (MRI,CT) או ע"י מערכות הדמיה דו ממדיות במהלך הניתוח (ultrasound).
מערכות אלו לוקות במספר חסרונות :
א. חוסר רגישות לרקמות רכות.
ב. חוסר יכולת לשנות את התגובה בהתאם לאופי או תנועת הרקמה.
ג. יכולת מוגבלת לספק מידע תוך ניתוחי בזמן אמת לצוות המנתח.

מערכות רובוטיות לקביעת מסלול דרך רקמה (path)

מערכות אלו מסייעות בקביעת מסלול מסוים דרך רקמה תוך צמצום הפגיעה באזורים לא רצויים. השימוש ברובוטים מאפשר השגת דיוק רב בקביעת מסלול זה. דוגמאות לטיפולים הנערכים בסיוע רובוטים אלו:

- החלפת עצם הירך
- הורדת גידולים במוח בעזרת לייזר

המגבלות העיקריות של קבוצה זו :

- עלות
- גודל
- יכולת אינטגרציה טרום ניתוחית ותוך ניתוחית נמוכה.
- מגוון פעולות מצומצם

רובוטים באורטופדיה

ענף האורטופדיה מתאים לשימוש ברובוטים ומחשבים. פרוצדורות אורטופדיות רבות כוללות עבודה על העצם שהינה רקמה קשה שקל לראותה באמצעי הדמיה כגון MRI, CT. המידע המתקבל מומר למערכות מופעלות מחשב בדיוק רב. הואיל והעצמות קשיחות הן שומרות על מיקומן והאחרון משתקף במודלים הממוחשבים. בניגוד לרקמות רכות (רוב רקמות הגוף), העצם היא רקמה קשיחה העמידה בפני הפעלת כוח חיצוני ולכן לא חל שינוי רב בצורתה או מיקומה. תכונה זו מאפשרת לבנות באמצעות מחשב דגם שיחקה את תנועתן הטבעית של העצמות וייצפה את השינויים שיתרחשו בהם בעקבות פרוצדורות ניתוחיות שונות.

השימוש ברובוטים בתחום האורטופדיה נועד לסייע למנתח לבצע פעולות מסובכות או בעלות סיכוי גבוה יחסית לאי דיוק. על מנת להגשים מטרה זו, העצמות (המטופלות) עוברות הדמיה ממוחשבת ומועברות למודל תלת ממדי במחשב. המודל מאפשר למנתח לראות שטח נרחב יותר מהאזור המיועד לטיפול בהשוואה לאזור שביכולתו לראות בזמן הניתוח, מסייע בהשגת תכנון ביצועי מדויק יותר וכן בוחן אלטרנטיבות ע"מ להגיע לתוכנית הניתוח שתתן את התוצאה האופטימלית. ניתן להרחיב את השימוש ולתת לרובוט לבצע את מה שהתקבל בעזרת ההדמיה. הרובוט מאפשר הגעה לביצועים מדויקים יותר של התוכנית בהשוואה לתוצאות שהמנתח היה משיג בעצמו. יש לדאוג כי הטעות הממוצעת האפשרית תהיה קטנה. הואיל וגודל מרבית העצמות בד"כ גדול יותר מהטעות הממוצעת שיכולה להיגרם ע"י המערכות הממוחשבות, רמת הדיוק מספיקה למרבית הפרוצדורות האורטופדיות (למרות שבתחומים אחרים יש לדאוג כי הטעות הממוצעת האפשרית תהיה קטנה בהרבה).

למרות היתרונות הרבים, השימוש ברובוטים בחדר הניתוחים עדיין בגדר טכנולוגיה מתפתחת ויש לשאוף למצב שבו היתרונות יעלו על החסרונות בטרם הרובוט יוכנס לשימוש יום יומי בחדרי הניתוחים.

הדרישות מרובוט לניתוחים אורטופדיים (ובכלל)

- א. ע"מ שרובוט יהפוך להיות חלק בלתי נפרד מחדר הניתוח הוא צריך לעמוד במספר דרישות:
 - א. המערכת צריכה להיות בטוחה הן עבור החולה והן עבור המשתמש. מאחר וקיים מגע קרוב בין המטפל, המטופל והרובוט בזמן הניתוח יש צורך לפתח מערכת הגנה שתגביל את תנועתיות הרובוט רק לתנועות המאושרות ע"י המנתח.
 - ב. הרובוט והמערכת המבצעת הדמיה חייבים להיות בעלי רמת דיוק המתאימה לתפקידם. המערכות המבצעות הדמיה צריכות להיות באותו קנה מידה כך שהערכים אליהן הן מכוונות יהיו זהים לערכים בהם הרובוט מבצע את פעולתו.
 - ג. המערכת חייבת להיות מסוגלת לעבור סטרליזציה. כל חלק מהמערכת שעובר את "השדה הסטרילי" צריך להיות מושמד או לעבור סטרליזציה ע"י אוטוקלאב.
 - ד. המערכת צריכה להיות בעלת עיצוב מתאים לחדר הניתוחים כך שתהפך להיות כלי קל לשימוש למנתח ולא מעמסה.
 - ה. המערכת אמורה לעזור למנתח לבצע את פעולותיו באופן מהיר יותר וברמת דיוק גבוהה יותר.

הדרישות הייחודיות לרובוטים האורטופדיים:

- א. העצמות המטופלות צריכות להיות בעלות סימנים שיאפשרו זיהוי מקומם ע"י מערכות ההדמיה. הסמנים יכולים להיות אמיתיים או מלאכותיים כמו מסמרים שימוקמו לפני הניתוח על גבי העצם.
- ב. העצם צריכה לשמור על מיקומה ההתחלתי - מתחילת סימונה ועד סיום הפרוצדורות.
- ג. מאחר והעצם היא רקמה קשה יש לצפות כי תפעיל כוח מנוגד לפעולות שונות כמו קדיחה. צפי של ההתנגדות ימנע אי דיוקים כתוצאה מתנועה של העצם ביחס למקדחה. מניעת אי הדיוק תתאפשר ע"י מכשור שיפחית את הכוח המתנגד (לדוגמה ע"י מקדחה שתעבוד במהירות חיתוך גבוהה מאוד) או רובוט שיהיה בעל כוח מספיק על מנת להחזיק את העצם במקומה.

הרובוטים המשמשים באורטופדיה נחלקים לשני סוגים:

- א. מערכות שנמצאות באינטראקציה עם המנתח ועם המטופל.
 - ב. מערכות שמיועדות לבצע פעולה מסוימת.
- המערכות שאמורות לקשר בין המנתח, המטופל והרובוט מערבות מערכות אקטיביות ופסיביות. מערכות אקטיביות הן אלו שהרובוט עצמו מבצע את הפעולה - לדוגמה הכנת העצם ע"מ לקבל שתל ועוד. מערכות פסיביות הן מערכות המנצלות את הרובוט ככלי מדידה או ככלי להכוונה (navigation) מדויקת של המנתח, אבל בכל אותו הזמן המנתח הוא האחראי על הניתוח. המגע הקיים בין הרובוט למטופל במערכות האקטיביות הוא גדול בהרבה מהמערכות הפסיביות ועל כן רמת הבטיחות צריכה להיות גבוהה בהרבה. מערכות פסיביות דורשות מהמנתח להשלים את הפרוצדורות הניתוחיות.

המערכות שמיועדות לבצע פעילות מסוימת כוללות בתוכם הן מערכות האחראיות למיקום והן מערכות מבצעות:

מערכות האחראיות למיקום משמשות בפרוצדורות בהן יש חשיבות גבוהה למצוא מיקום מסוים ולשמור על מיקום זה לצורך פעולות נוספות - לדוגמה קבלת שתל. במערכות אלו הרובוט יכול להיות זה שמזהה את המיקום הדרוש או להעיד על מיקום של שתל בחור המיועד לו.

מערכות מבצעות (machining) משמשות כאשר יש צורך בפעולות גיאומטריות או בשרטוט גבולות מדויק באיבר המיועד לניתוח. לדוגמה הרובוט יכול לעצב חור או לבצע חתכים מרובים באזור מסוים ע"מ לעצב תבנית נדרשת. מערכות מסוג זה דורשות יכולת דיוק גבוהה מאוד (במיקום ספציפי) ואילו מערכות ממקמות דורשות דיוק אבסולוטי על גבי שטח עבודה נרחב. דוגמה למערכת פסיבית האחראית למיקום היא המערכת שמסיעת בנייתוחים להחלפת הברך (TRK).

פרוצדורות הדורשות מיקום מדויק של מסמרים או קדיחת חורים או הכנת משטח מסוים של העצם הן פרוצדורות המועמדות לשימוש ברובוטים וסיוע ממוחשב

מודל כללי ל רובוט המסייע במערכת ניתוחית צריך לכלול מספר רכיבים :

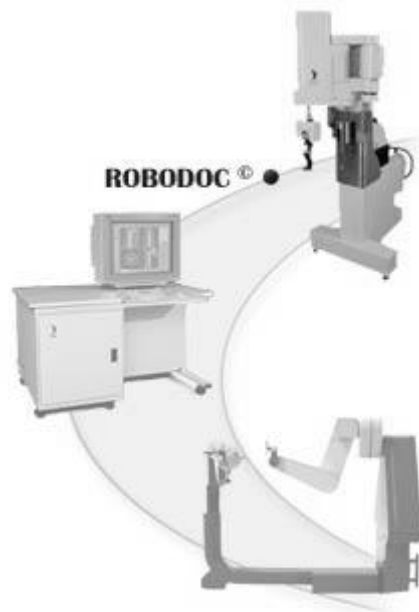
- מערכת הדמיה (CT,MRI,X-ray) על מנת לספק מידע על כל חולה. המידע מההדמיה מועבר ומעובד ע"י המחשב לצורה דו או תלת ממדית ע"מ לספק מידע שיסייע למנתח לבצע סימולציות ניתוחיות בכל עת שיחפוץ.
- המחשב יאפשר למנתח לבצע סימולציה של החתך או הקדיחה בעצמות החולה. באופן דומה גם החיבורים ומיקום הרכיבים המושתלים יוכלו להראות בסימולציה. כל התהליך שברצון המנתח לבצע יומחש באמצעות המחשב וניתן יהיה לצפות בהשפעה של הפרוצדורות על העצמות, המפרקים והתנועות.
- ההדמיה הניתוחית יכולה לחזור פעמים אין ספור עד לקבלת התוצאה האופטימלית הרצויה.
- התכנון והסימולציה יכולים להתרחש גם במהלך הניתוח עצמו.
- כאשר הרובוט מהווה חלק מן המערכת, הפתרונות שיגיעו אליהם ניתנים ליישום ע"י הרובוט מיידית ובדיוק רב.

יתרונות השימוש ברובוטים באורטופדיה :

- א. יכולת צפייה טובה יותר של המנתח באיבר המטופל שאינה מתאפשרת ע"י ניתוח רגיל (דרך החתך). באמצעות מערכת זו תושג רמת דיוק גבוהה יותר. לדוגמא בניתוח החלפת ירך, המערכת הממוחשבת מאפשרת לצפות בתעלה שנקדחת בעצם הפמורלית.
- ב. גמישות רבה בסימולציות פרוצדורות ניתוחיות עד להשגה תוצאה אופטימלית. המחשב מאפשר למנתח לבצע פרוצדורות שונות שאינן אפשריות לביצוע בחדר הניתוחים ללא הדמיה ותכנון מוקדם.
- ג. מערכות ההדמיה יכולות לצפות את התגובה של האיבר לפעולה מסוימת. לדוגמא תנועת שרירים וגידים בעקבות שינוי מנח של עצם .
- ד. יכולת גבוהה לבצע מחקר. יכולתו של המחשב לדעת את מיקומו המדויק של השתל מאפשרת לעקוב על הקורלציה בין היכולת התפקודית של החולה (לאחר החלמתו) לבין מיקום השתל המדויק ולשיפור פרוצדורות ניתוחיות בהתאם.
- ה. מיקום מדויק של השתל מתאפשר ע"י סמנים שנמצאים על גבי העצם עצמה. הסמנים מורדים כאשר העצם מוכנת לניתוח. המחשב יכול לשחזר את המקום הקודם של סמנים אלו ובהתאם לכך לכוון למיקום הרצוי והמדויק של השתל.
- ו. העבודה עם מערכות מופעלות רובוטית וממוחשבות מאפשרת נגישות גבוהה יותר לתוצאות שיתקבלו מהמחקר (סעיף ד) והפצת המידע לקהל רב יותר של מנתחים (בעלי מערכות מופעלות רובוטית).
- ז. קיצור משך השהייה של החולה בחדר ניתוחים (תוצאה עתידנית): הפחתת עלויות + הפחתת משך חשיפה לזיהומים ושימוש בתכנון טרום ניתוחי (באמצעות מערכות ממוחשבות) המצמצם את גודל החתך.

הרובוט מהווה כלי עזר גם בניתוחי שתל החוזרים על עצמם. כאשר מעוניינים לבצע ניתוח חוזר, יש צורך להוריד את שאריות הדבק מהשתל הקודם. שאריות אלו מזוהות בעזרת CT והרובוט מסתייע במנועים המאופיינים במהירות סיבוב גבוהה ומוריד בוהירות ומהירות את השאריות שונתרו.

השימוש ברובוטים בתחום האורתופדיה יעיל להחלפות פרקים, הכנה לניתוחים שונים כמו ניתוח בו אמורים להחדיר בורג ופלטת מתכת נוספת לחוט השדרה. בניתוח מסוג זה הבורג צריך להיכנס לתוך קוטר צר לאורך עמוד השדרה - הרובוט יכול לתכנן את הפרוצדורה הניתוחית ולהבטיח כי לא יפגע שום עצב בדרך וכי תהיה שמירה על המסלול המתוכנן ועוד.



ROBODOC

זאת היא מערכת רובוטית אקטיבית ומבצעת. מערכת זו מוגדרת כ Integrated Surgical

Systems(ISS). רובוט זה פותח ע"מ לבצע החלפה של עצם הירך (Total hip = THR replacement). המערכת מורכבת מרכיב שאחראי לתכנון הטרנס ניתוחי ורכיב האחראי לפעולות המבוצעות בזמן הניתוח.

בניתוח זה ראש הפמור (עצם הירך) מוחלף בשתל העשוי מכדור מתכת וגבעול. הגבעול מתאים לתעלה הנמצאת בקצה העליון של הפמור. בד"כ על מנת לעצב את התעלה משתמשים ב broach וחופרים תעלה באופן ידני (המנתח): השתל מוחזק בתעלה בעזרת דבק מיוחד. לעומת זאת באמצעות השימוש ברובוט ניתן לעצב את התעלה אליה אמור להיכנס השתל באופן המתאים בצורה האופטימלית לשתל, לצמצם את החלל בין העצם לשתל ולהגדיל את שטח המגע בין השתל לעצם. שטח המגע הגדול מעודד צמיחה עצמית של העצם על גבי המעטפת החיצונית של השתל באופן שלא יהיה צורך בדבק ע"מ לחזק את השתל. הצמיחה על גבי השתל מעניקה קשר חזק יותר, יציבות גבוהה יותר לשתל, החזרת היכולות הביומכניות לחולה, נוחות רבה יותר למטופל

ומשך חיים רב יותר לשתל. כאשר הניתוח מבוצע ע"י אדם רק כ 20% מן השתלים למעשה נוגעים בעצם עצמה, הרווח הממוצע הנותר בעקבות ניתוח שבוצע ע"י אדם הוא כ 4 מ"מ ואילו גודל החלל גדול ב 36% מהשתל. כמעט כמחצית מתוך 300000 ניתוחים להחלפת פרק הירך מבוצעים באמצעות שתלים חסרי דבק ע"י ה robodoc .

ל robodoc יש גם יתרון במיקום השתל לאחר יצירת החלל. מיקום השתל תלוי ביכולתו של המנתח להחדיר את השתל למרחק הנכון בפמור. החדרה עמוקה מידי עלולה לגרום לפיצולה של עצם הפמור, ואילו הרובוט בעל נתונים המאפשרים לו הכוונה נכונה של השתל למקומו.

נכון להיום (ספטמבר 2001), קיימים בגרמניה ואוסטריה 17 רובוטים, בעזרתם בוצעו יותר מ 6000 פרוצדורות ניתוחיות להחלפת עצם הירך.

ניתוחים להחלפת עצם הירך המבוצעים ע"י ה robodoc כוללים מספר שלבים:

- א. טרם הניתוח, שלושה מסמרי טיטניום מושתלים דרך חתכים קלים בעור לתוך אתרי עיגון שרירים שנמצאים על גבי הפמור (Trochanter, Condyles)
- ב. CT מבוצע לרגל
- ג. המערכת הטרומ ניתוחית מאתרת את המסמרים באופן יחסי לקורדינאטות המיוצגות ע"י מערכות ההדמיה .
- ד. המנתח בוחר את מודל השתל הרצוי וקובע את מיקומו בהתאם לקורדינאטות מערכת ההדמיה. המידע נשמר.
- ה. בתחילת הניתוח הרובוט מובא לחדר הניתוח כאשר כלי סטרילי מונח בידו מתחת לחיישן הרגיש להפעלת כוח. כל הרובוט עטוף בכיסוי סטרילי. בשלב זה מוזן המידע הטרומ ניתוחי לרובוט והוא מוכן לפעולה.
- ו. כל מהלך הניתוח ממשיך בדרך המסורתית עד שפרק הפמור מוסר.
- ז. הפמור מחובר בחוזקה לאתר עיגון בבסיס הרובוט. 3 המסמרים שהוכנסו קודם לכן נחשפים באופן ידני, מרכזו כל מסמר מזוהה ע"י הרובוט.
- ח. הרובוט משתמש במיקום המסמרים ע"מ לחשב העברה נכונה בין קורדינאטות ה CT לקורדינאטות הרובוט שנקבעו ע"י המסמרים.
- ט. לרובוט מותקן מכשיר קידוח והוא מתחיל לעצב את החלל הרצוי בפמור לפי המיקום הרצוי בהתאם למסמרים.
- י. המנתח עוקב אחר המתרחש ע"י צפייה הן בחולה, הן ברובוט והן באמצעות תצוגה גרפית המציגה את החתכים המבוצעים.
- יא. לאחר שהחיתוך הסתיים העיגון בין הפמור לרובוט מנותק והרובוט מורחק מהחולה. המסמרים מוסרים.
- יב. שאר הניתוח מבוצע בדרך המסורתית ע"י המנתח.

האינטראקציה בין הרובוט לאדם בזמן הניתוח

מטרת השימוש ברובוט היא לא להחליף את המנתח אלא לסייע לו בפעולות שונות כאשר כל הפעולה מבוצעת בפיקוח ישיר של המנתח. למרות שיכולת הדיוק הגאומטרית של הרובוט גבוהה בהרבה מיכולת המנתח, יכולת ההבנה והאינטגרציה של המנתח את מכלול הדברים גבוהה בהרבה. על מנת לאפשר אינטראקציה נכונה בין המנתח לרובוט יש צורך במערכת שתאפשר למנתח לצפות בפעולות הרובוט, תאפשר לו לעצור באמצע כל פעולה, לאתחל פעולת תיקון ולאפשר לרובוט הדרכה על מיקום. יש צורך בממשקי תקשורת שיעבירו לרובוט את רצון המנתח על צורת השתל ומיקומו. המערכת שונתנת אינדיקציה למנתח בזמן הניתוח על המתרחש צריכה להיות כמה שיותר דומה למערכת הטרנס ניתוחית שאפשרה את תכנון הפרוצדורות. אף המערכת הרובוטית צריכה לוודא כי הוראות המנתח אינן חורגות מן המקובל. התכנון הניתוחי מבוסס על מידע ממערכות ההדמיה שנלקחו טרם הניתוח. יש צורך במידע מהימן ומדויק שיאפשר את זיהוי המקום האנטומי הדומה למערכת ההדמיה ע"מ שהתכנון הטרנס ניתוחי יצא לפועל כרצוי.

ענחות וסטרייליות של חדר הניתוחים

יש צורך לשלב את הרובוט בשגרה היום יומית של חדר הניתוחים ולהקפיד על סטרייליות. הרובוט צריך להיות בנוי כך שלא יתפוס חלק רב מחדר הניתוחים ובעת ובעונה אחת לאפשר הורדה קלה של המכשור הרפואי על מנת לאפשר סטריליזציה.

ביטחון גיבוי ויכולת תיקון טעויות

שמירה על הביטחון מהווה מרכיב חשוב ביותר בשימוש ברובוטים. השמירה חשובה הן על החולה והן על המנתח. על מנת להבטיח מערכת רובוטית בטוחה היא צריכה לקיים מספר תנאים:

- כפתורים שיאפשרו ניתוק ידני של המערכת בכל זמן רצוי.
- צפי של טעויות פוטנציאליות ובדיקתן .
- אפשרות לפעולות תיקון שיהיו נגישות למנתח.
- לאחר שהתבצעה טעות, הרובוט מפסיק את פעולתו ויכול להמשיכה כעבור זמן קצר. עם זאת יש צורך במנגנון שיאפשר הפסקת פעולתו, הרחקתו מן החולה וסיום הניתוח ע"י צוות המנתחים.
- קיימת תלות גבוהה מאוד בין הדיוק של הרובוט לפעולות המנתח, על כן יש למנוע כל טעות שלא תאפשר דווח על חוסר דיוק שהתבצע ע"י הרובוט.
- המערכת צריכה לבקר את הרובוט ולבדוק כל העת האם הפעולות שמבצע הם במסגרת התכנית. כל סטייה מן התוכנית המקורית תגרום להפסקת פעולתו .
- יש לבדוק היטב כי לא חלו כל תזוזות של האיבר המטופל שיביאו לסטייה וחוסר דיוק בנייתוח.

תכנון טרום ניתוחי

- התכנון הטרם ניתוחי מאפשר למנתח לבחור את המודל וגודל השתל הרצוי ולבדוק את התאמתו לעצם הפמור של המטופל. המערכת כוללת בתוכה דגמים שונים של שתלים ומקבלת מידע ממערכות ההדמיה עבור כל חולה וחולה. המערכת קובעת את קורדינאטות ה CT בהתאם למסמרים שהונחו טרום הניתוח.
- הפלט של המערכת מורכב:
1. פרטים מזהים של החולה
 2. מיקום המסמרים ביחס לקורדינאטות ה CT
 3. הספיסיפיקציות של השתל
 4. המיקום הרצוי של השתל בהתאם לקורדינאטות ה CT
 5. מידע מעובד ומידע על המודל הנבחר שימשם למהלך הניתוח עצמו.

עיצוב הרובוט

במהלך הניתוח כל אזורי הרובוט למעט כלי הניתוח, מכוסים במעטפת סטרילית. כלי הניתוח עוברים סטריליזציה בדרכים אחרות. לבסיס הרובוט מחובר מנגנון המקבע את העצם המיועדת להשתלה. מערכת הבקרה של הרובוט מספקת מידע באמצעות מערכות חיישן שונות: חיישן הרגיש לעוצמת הפעלת הכוח מבצע בדיקות חוזרות ונשנות ע"מ להבטיח כי עוצמת הכוח המופעלת היא נכונה, חיישן האחראי למציאת מיקום המסמרים, חיישן האחראי להיענות לתנועה המכוונת ע"י המנתח ועוד. מערכות הבקרה העצמיות של הרובוט אחראיות על שמירה על המיקום והתנועה הרצויה של הרובוט ובדיקה האם פעולת הקידוח אינה חורגת מגבולות החלל המתוכנן. מערכת זו בודקת כי לא חלו תנועות יחסית למערכת המקבעת שנמצאת בבסיס הרובוט. אם אכן אחת מתנועות אלו מתבצעת נשלח סיגנל לרובוט שמקפיא את פעולתו. הטעות מעובדת, הרובוט מתחיל לתכנן פעולת תיקון והאחרונה מבוקרת ומאושרת ע"י המנתח.

בזמן הניתוח, על כל חתך שמבוצע ע"י הרובוט נשלח סיגנל למערכת ההדמיה והאחרונה משנה את צבע המקום בו התבצע החתך. כאשר שכבה שלמה מוסרת כל האזור משנה צבעו. באמצעות מערכת הדמיה זו למנתח מגיע מידע עדכני לגבי הפעולות המתבצעות.

המערכת כוללת הן מידע טרום ניתוחי והן מידע המעדכן על הפעולות המתרחשות במהלך הניתוח. מערכת ההדמיה המספקת מידע זה זהה בשני המקרים.

שרוול סטרילי מאפשר למנתח לבוא במגע עם הרובוט במהלך הניתוח ולספק לו אפשרות להכוונה ידנית במהלך הפעולות הניתוחיות, שינוי מנח הרובוט ושליטה במתג חירום להפסקת פעילותו. שרוול זה יכול גם לשמש על מנת להעביר מפעולה אחת לשניה או ע"מ לבחור תוכנית התאוששות בעקבות טעות שבוצעה. במידה והתרחשה טעות כלשהי והרובוט הקפיא את תנועותיו, חידוש פעולתו יבוצע ידנית ע"י המנתח באמצעות שרוול זה.

בדור החדש יותר של הרובוט המותאם לניתוחי בני אדם בוצעה חלוקה בין המנגנון הטרומ ניתוחי שמסייע בתכנון הטרומ ניתוחי לבין המנגנון הביצועי שפועל במהלך הניתוח. המנגנון הטרומ ניתוחי נקרא ORTHODOC ואילו המנגנון המסייע בביצוע התהליך עצמו נקרא ROBODOC. המערך המתכנן מקבל מידע ממערכות ההדמיה (CT) ובונה מודל תלת ממדי של העצם, המנתח בוחר את השתל הרצוי לו מתוך מאגר והמידע הנ"ל מועבר למערכת המבצעת – ROBODOC. מערכת ההדמיה משתמשת בשלושה צבעים ע"מ להעביר את המידע: סקלה אפורה – מציגה את צפיפויות ה CT השונות, סקלה צבעונית – מראה את רמות הרקמות השונות, סימן תוחם על פני המסך המראה את הגבולות בין סוגי רקמות שונות. האבחנה בין 3 הצבעים הללו מועילה להבנה המהירה והברורה של המנתח את המתרחש. במהלך השימוש המנתח בוחר באמצעות העכבר גבול מסוים בו אמור להתבצע החתך (בהתאם למידע שמוצג ע"י ה CT), השתל הרצוי, ולאחר מכן מתאים את מיקום ואוריינטציה השתל יחסית למערכת הקורדינאטות המוצגת ב CT. בעתיד הכוונה כי הרובוט עצמו יציע למנתח את האופציה הטובה ביותר למיקום השתל.



מנגוני בטיחות

- אחד העקרונות החשובים ביותר בשימוש במערכת רובוטית היא שמירה על הביטחון:
- א. לא יכולה להיות טעות כלשהי שתגרום לרובוט לאיבוד שליטה בתנועותיו. התוכנה שעמה עובד הרובוט אמורה לכלול אופציה רק לתנועות מסוימות המותאמות לצורכי הניתוח.
 - ב. הרובוט לעולם לא יפעיל כוח עודף על החולה. אם הכוח עובר את הגבולות המתוכננים מעל לתחום מסוים הרובוט מפסיק תנועותיו מיידית.
 - ג. כלי החיתוך של הרובוט אמור להיות בתחום מסוים בסמיכות לאזור הנחתך. עבור ניתוח להחלפת ירך, מנגון זה אמור למנוע הסטת החיתוך מהמקום המתבקש, או מעיוות צורת החלל שאמור להיווצר.
 - ד. הגוף האחראי בכל עת הוא המנתח. המנתח צריך לבטוח במערכת עד גבול מסוים, והמערכת אמורה לספק מידע תדיר על פעולותיה. המנתח יכול להפסיק את פעולת הרובוט בכל עת שיחפוץ. כל המשך לאחר הפסקת פעילות הרובוט מבוצע ע"י המנתח – בחירה האם לנתק לחלוטין מהמערכת, שינוי תוכנית או בחירת תוכנית מתקנת וכדומה. בדור החדש של רובוטים אלו הושם דגם על הגברת הבטיחות על מנת להקטין במידת האפשר את הסיכוי לפציעה בקרב צוות חדר הניתוחים והמטופל ולאפשר פעילות נרחבת יותר של הרובוט תוך צמצום ההשגחה. לשם כך פותחו מערכות בטחון שיבטיחו כי לא תתרחש תנועה של העצם במהלך ההדמיה באמצעות ה CT על מנת שלא תיווצר שגיאה בקורדינאטות הדרושות לשם הניתוח. במקביל פותחה מערכת שתיידע במקרה שאכן התרחשה תזוזה. על מנת להגביר את הביטחון פותח רכיב שיבצע אינטגרציה בין כל מערכות הבקרה, הללו היו קודם לכן עצמאיות. רכיב זה כולל בתוכו תגובה אפשרית במקרה שמתרחשת תקלה. סוג התגובה תלוי בחומרת התקלה. בדיקות הבטיחות המבוצעות ע"י הרובוט כוללות הן בדיקות של מהימנות המידע המתקבל, בדיקה האם יש הגיון במידע המתקבל ובדיקה האם מתרחשות טעויות במהלך הניתוח.

מערכת הבקרה העצמית של הרובוט

מערכת הבקרה העצמית של הרובוט מבצעת כל העת פעולות שיבטיחו שמירה על בטחון ותפקוד תקין של המערכת. הרובוט מבצע בקרת מיקום, מהירות. התוכנה בעלת יכולת להקפיא את פעילות הרובוט, להמשיך פעולות שהופרעו או הופסקו ולהתחיל תוכניות תיקון. במידה ומערכת הבקרה העצמית אינה פועלת למעלה מ 18 מילישניות הרובוט מכבה את עצמו. במידה ומתרחשת ירידה במתח או בעיה אחרת הפוגעת בתפקוד הרובוט או למטרה אחרת שיש עניין בהפסקת פעולתו, המנתח יכול באמצעות השרוול להחליט על המשך הפעולה האם ברצונו לנתק לחלוטין את הרובוט, לעבור למשך הזמן הנדרש לניהול ידני, לחזור על הפעולה האחרונה או זו שקדמה לה וכו'. באופן דומה קיימת בקרה עצמית באמצעות מערכות החישה של הרובוט – לדוגמה המערכת לחישה כוח. מעל לסף כוח מסוים פעילות המערכת מושטקת. בקרה דומה קיימת במידה ויש איתות כי כלי הניתוח לא פועלים על הרקמה הרצויה.

בנוסף למערכת הבקרה העצמית של הרובוט על מנת להבטיח בטיחות קיימת מערכת בקרה נוספת שהינה עצמאית ונמצאת על מחשב נפרד (ע"מ להבטיח המשך תפקוד במקרה של "נפילת מחשבים"). מערכת זו פועלת במספר מישורים:

א. בודקת כי לא תהיה תזוזה של העצם המקום אליו קובעה.

ב. בודקת כי מהלך הטיפול לא יחרוג מהגבולות שהוגדרו לו.

לסיכום, כ-26 כלבים נותחו באמצעות מערכת זו בשנת 91. במהלך הניסוי כל הפרוצדורות הניתוחיות הוכרו בהצלחה. לא היו הפרעות במהלך הניתוח, לא נגרמו שברים במהלך או לאחר הניתוח, סיבוכים או זיהומים לאחר הניתוח. השתלים הוכנסו בקלות והעניקו יציבות מכנית גבוהה יותר מהמצופה מניתוח דומה שמבוצע ידנית. בניתוחים המסורתיים נצפו יותר מקרים בהם העצם נשברה, השתל לא הוכנס כהלכה וסיבוכים נוספים. בסה"כ הניתוחים של החלפת עצם הירך שבוצעו ע"י הרובוט התגלו כמוצלחים יותר, והמערכת מסוגלת לשפר לאין שעור את תוצאות ניתוחים אלו. בשנת 92 אושר על ידי ה-FDA לנסות את מערכות אלו על בני אדם. הרובוטים עברו מספר מודיפיקציות על מנת להתאים לבני אדם. השינויים העיקריים היו בתחום הבטיחות. פותחו מנגנונים נוספים שמטרתן לצפות את הטעויות האפשריות והתגובות הרצויות בהתאם לחומרת הטעות. בנוסף הושם דגש על שיפור ממשקי של אדם-מכונה, שיפור ביצועי של המערכת, קיצור זמן התגובה. כל הניתוחים שבוצעו על בני אדם עברו בהצלחה ולא נראו זיהומים או שברים בעצם הירך לאחר מכן.

ניתוחי לפרוסקופיה

במהלך השנים האחרונות גברו הניתוחים המבוצעים בעזרת לפרוסקופיה ואנדוסקופיה. המשותף בין שיטות אלו הוא אי יכולתו של המנתח לשלוט בכלים באמצעות ידיו בלבד. הוא חייב לבטוח במכשירים שניתן להכניסם דרך צינורית של אנדוסקופ ולבטוח באסיסטנט שיכוון את המצלמה למקום בו מבוצע הניתוח. השילוב בין מערכות אלו הביא לפיתוחם של רובוטים אנדוסקופים ושיפור מכניזם האנדוסקופיה. הניתוחים הראשונים שבוצעו באמצעות מערכת זו היו בשנת 1993 בניתוחי בקע, הסרת כיס המרה ועוד.

במהלך ניתוח לפרוסקופי מוחדרת מחט לקיר האבדומינלי. לאחר מכן מוחדרת צינורית דרך הקיר האבדומינלי דרכה ניתן להעביר מערכות טלסקופ ומצלמה. צינוריות נוספות מוחדרות דרכן יוכלו להכניס את הכלים הדרושים לשם הניתוח.

ישנן מספר אפשרויות על מנת להחזיק את המערכת הלפרוסקופית:

- א. ע"י חיבור הלפרוסקופ לצד שולחן הניתוחים – הלפרוסקופ יציב אך יש קושי בתנועתיות שלו.
- ב. ע"י אדם המסייע ומחזיק את הלפרוסקופ - התנועתיות במקרה זה גבוהה יותר אך יש להבטיח שיתוף פעולה מקסימלי בין האדם המחזיק לבין המנתח. תפקיד זה מבוצע בד"כ ע"י רופא מתמחה (מחיר כבד לפעולה זו שבמקומה היה ניתן להקדיש את הזמן לפעולות אחרות) כמו כן יש לזכור כי חוסר הענות מדויק למנתח עלול להביא לאי דיוקים וקשיים במהלך הניתוח. (בעקבות מענה לא נכון למנתח או התערבות בשיקולי המנתח)

בעקבות החסרונות שתוארו לעיל, התפתח הרעיון להשתמש במצלמה המונחית ע"י רובוט ונשלטת ע"י המנתח. מנגנון כזה צריך להיות מסוגל להזיז את המצלמה ל 3 צירים בקורולציה לתנועות אפשריות במהלך הניתוח ובתגובה להוראות הניתנות ע"י המנתח. נשקלו מספר דרכים שתאפשרנה תקשורת בין המנתח לרובוט. אחת הדרכים שנלקחו בחשבון היא תקשורת ע"י תוכנה לזיהוי קול שתתקן ברובוט. הבעיה בתוכנה לזיהוי זו היא השימוש הנפוץ במילים המשמשות למתן הוראות במהלך הניתוח עצמו גם בשיחות חולין תוך כדי הניתוח, ותפקוד לקוי בשעת לחץ. בעקבות כך, התקשורת שנבחרה על מנת לאפשר קומוניקציה בין הרובוט למנתח היא תקשורת המונחית תזוזה, כלומר הרובוט יעקוב אחרי תנועות הראש של המנתח. המנתח מזיז באופן אינטואיטיבי את ראשו לכוון אליו הוא מעוניין לראות את הדמות והרובוט מזיז את המערכת בקורולציה לתנועתו. השימוש בשיטה זו פותח חלון לשימוש בעתיד בטכנולוגיה של (virtual reality).



עיצוב הרובוט

דגם האב של רובוטים אלו נקרא *Laparobot*. הוא מורכב מראש הגמיש לשינויים, מערכת שליטה, מערכות חיישן. רובוט זה הוא בעל 3 דרגות חופש העובדות בהתאמה לתנועתיות המצלמה. דרגת חופש רביעית מאפשרת יכולת סיבוב עצמאית לטלסקופ. (תנועת הסיבוב והרוטציה הכרחיים לאנדוסקופים העובדים עם זוויות אופטיות) שלוש צירי התנועה של הרובוט עוברים דרך נקודה אחת אשר נמצאת בקורולציה לנקודת החדירה של המכשיר לעור המנותח. ע"י כך נמנעת קריעה של העור, גם במקרה של כשלון מכני. המערכת מכוסה בשקית על מנת לשמור על סטריליות או שיהיה שימוש בכלים חד פעמיים. המערכת הרובוטית תוכנתה להכיר את התנועות המועדפות על כל מנתח על מנת להבחין בתנועה יוצאת דופן.

כפי שהוזכר קודם לכן, המערכות הרובוטיות נחלקות:

- א. מערכות שמהוות כעין יד שלישית ומבצעות פרוצדורות ניתוחיות תחת הפיקוח של המנתח ומטרתן הן ליעל את העבודה, לצמצם מספר הנוכחים בחדר הניתוח ולאפשר פעולות חדשות.
- ב. מערכות שתפקידן מצטמצם לפעולות פשוטות כמו החזקת מצלמה. פעולות אלו אמנם מצמצמות את מס' הנוכחים בחדר הניתוח אך משאירות את מלוא האחריות על המנתח במהלך הניתוח. מערכות אלו מספקות בד"כ ממשקי מידע פשוטים יחסית המסייעים בהכוונת הרובוט למקום בו יש צורך במצלמה. מערכת זו אינה מצריכה שינויים גדולים במערך הכללי של חדר הניתוח והיא פשוטה יחסית ופסיבית.

המערכת שתואר להלן מכילה רובוט הנשלט מרחוק ומבצע פעולות כגון החזקת המצלמה, או מכשור אחר, ממשקי אדם-מכונה רבים ואתר בקרה. אתר הבקרה מאפשר שליטה ברובוט, עיבוד מידע והצגת הפעולות. המערכת מסוגלת להקפיד תמונות המצלמות ולעבדם כך שייצגו מידע גיאומטרי על אנטומית החולה. אמצעי זה יכול מסייע בהכוונת המצלמה או מכשור אחר. המטרה הסופית היא להשיג מגוון פעולות שיבצע הרובוט כמו חזרה על פעולה, שמירה על הומאוסטזיס, פעולת תפירה פשוטה ופעולות חיתוך פשוטות ופעולות נוספות שהמנתח בד"כ נעזר בהן בצוות, שילוב בין המידע המתקבל מן המצלמה לבין מידע המתקבל ממערכות ההדמיה השונות, מיקום מדויק של מכשור המיועד לריפוי ועוד.

במהלך הכנסת המכשור הניתוחי לצינורית שנמצאת בחלל האבדומינלי, המכשירים נותרים עם 4 דרגות חופש (3 צירים ואחת לעומק) המגבילות את חופש התנועה. בעקבות כך התנועות הניתנות לביצוע מאוד מוגבלות. לכן כאשר רובוט מחזיק את המכשור יש להבטיח כי תנועתו תתבצע רק במישורים הללו.

עיצוב

המצלמה יכולה להתנתק בקלות יחסית מהמכשיר המחזיק אותה ע"מ לעבור סטרליזציה. שאר הרובוט מכוסה בכיסוי סטרילי. המנגנון המחזיק את המכשיר עובר סטרליזציה לפני הניתוח. הרובוט בנוי בצורה גמישה המאפשרת לו גישה והסרה מהירה משטח הניתוח וניתן להכניסו בקלות לחדר הניתוחים. הרובוט מעוצב כך שלא יוכל לסגת אחורה מהתנועה (non back drivable)

מבנה הרובוט

הרובוט בעל חיישן בעל 6 יחידות חופש שממוקם מתחת למנגנון המיועד להחזיק את המכשירים (קולר). החיישן מאפשר למערכת הבקרה לחוש בכוח המופעל מבחוץ על המכשיר במהלך הניתוח ובמידה ויופעל כוח עודף, פעילות הרובוט תוקפא. המידע על הכוח המופעל עובר אינטגרציה עם חוקי בקרת התנועה שיאפשרו לרובוט להגיב לכוחות חיצוניים. בעתיד יהיה ניתן להשתמש במנגנון זה ע"מ להבטיח כי לא תהיה פעולה על רקמות לא נכונות (למרות הפחתת רגישות החיישן בעקבות המעבר דרך הצינורית).

בטיחות

הביטחון הוא דבר הכרחי במערכת כנ"ל. ממשקים רבים מתוכננים על מנת לענות על צרכי מערכת זו. מערכת הבקרה מבצעת כל העת בקרה על אספקת החשמל ואינטגרציה בין התנועה המבוצעת לבין התנועה הרצויה ע"מ להבטיח כי לא תהיה תנועה מיותרת שחורגת את התכנון. ברובוטים הנוכחים מערכת זו קיימת בציר ה X ובציר ה Y, בקרות נוספות מבוצעות ע"י רכיבי בקרה ספציפיים הנמצאים בתוך המנגנון השולט.

כאשר מבוצעת כל תנועה חריגה מערכת הבקרה גורמת להקפאת כל פעילות ולהעברת המסר למנתח. הבקרה העצמית על הפעולה מתרחשת כל 5 מילי שניות. במקרה של תקלה מערכת הבקרה מפסיקה מיידית את הפעולה של הרובוט. אם הכל תקין המערכת נותנת אישור להמשיך את פעולתה עד לנקודת הבקרה הבאה. במידה ולא ניתן אישור להמשך הפעולה בנקודת הבקרה (safety timeout) כעבור 10 מילישניות הרובוט מופסק אוטומטית. מטרת מערכת זו מעבר לפתרון בעיות המתפתחות במהלך הניתוח וביצוע התפקידים המוטלים עליה עתידה לפתור בעיות ולהגיע לתוצאה האופטימלית הרצויה.

במקרים מסוימים יש חשיבות להבטיח כי הרובוט יעמוד בגבולות תנועה מסוימים לדוגמא עליו להחזיק את הפרוסקופ כל העת מחוץ לכבד לאורך כל התהליך. יש לדאוג לכך שהגבולות הללו לא יופרו. באופן כללי יש חשיבות לכך שלא תתאפשר תנועה לצדדים של הפרוסקופ. עם זאת במקרים מסוימים קיימת הענות של הגוף עצמו ומתרחשים שינויים שמחייבים תנועה מעטה לכוון הצדדים על מנת לשמור על רמות דיוק גבוהות במהלך הניתוח. כל זאת בתנאי שהאברים הפנימיים אינם נמתחים יתר על המידה והתזוזה לא תשפיע על הדיוק.

יש למנוע כל תנועה בלתי רצויה ע"י כיבוי המערכת. והיה אם מתבצעת פעולה של כיבוי הרובוט בזמן שהוא מחזיק מכשיר שנמצא כבר בתוך המנותח, הרובוט נעשה קשיח והמנתח לא יכול בקלות להרחיקו משולחן הניתוחים ולגרום לו לעזוב את המכשיר. במקום זאת המנתח צריך לשחרר את מאחו הכלי באופן ידני ולאחר מכן הרובוט יורחק. מנגנון זה מאפשר הגנה על המנותח בפני פעולות לא נשלטות של הכלי ע"י הרובוט שיכולות להיגרם בעקבות הכוח האינרצי של הפעולה או בעקבות "ההחלשות" של הרובוט. אם יש צורך במנגנון נוסף (פסיבי) שיענה לפעולות ניתן למקמו בתוך מכשיר האחזיה עצמו או בתוך המכשיר הפרוסקופי עצמו.

ממשקי מכונה – אדם

במהלך לפרוסקופיה עיני המנתח ממוקדות בטלויזיה המעבירה את המתרחש בתוך גוף החולה בזמן אמת. ממשק זה הוא הממשק העיקרי המאפשר למנתח שליטה בכלים ביחס לאנטומית החולה והוא הבסיס עליו מסתמך בנתנו הוראות פעולה לשאר הצוות. אם המטרה היא כי המערכת תפעל כשם שאדם המסייע בניתוח פועל יש חשיבות לכך שתהיה לה גישה למידע המוקרן בטלויזיה ואמצעי תקשורת בערוץ זה. לשם כך המערכת הרובוטית צריכה להיות מסוגלת להציג מידע בעקבות האינפורמציה שהתקבלה מהתמונה ולהציג אותה על גבי מסך הטלויזיה. לדוגמא ציון סמנים מסוימים, סימון מרחקים, תצוגות גרפיות שונות, מידע כמותי ומידע נוסף שנותן אינדיקציה על המצב. בעתיד יוצג מידע גם על מצבו הפריפרי של החולה הצגת המודלים הטרומ ניתוחיים, הצגת תרשים לצבעים הנראים בוידאו ומשמעותם (color video signals). האמצעי העיקרי העומד בידי המנתח לתת הוראות למערכת הוא ע"י פניה לאברים המוצגים על גבי הטלויזיה. המערכת מסוגלת לאתר סמנים הנמצאים על הכלים הניתוחיים וע"י כך מאפשרים למנתח לפנות לאיבר או לאזור שהוא מעוניין לטפל בו (המערכת תזהה את האיבר

המדובר באמצעות הסמן שנמצא על גבי המכשיר עמו המנתח מצביע). בפועל נמצא כי הרבה יותר קל למנתח להצביע על איבר מסוים באמצעות עכבר או ג'ויסטיק. הקושי בכך הוא שע"מ להשתמש בעכבר יש צורך כי המנתח יעזוב את העמדה בה הוא מחזיק את הלפרוסקופ ויצביע על המקום הרצוי. המערכת הרובוטית יכולה לכלול בתוכה ג'ויסטיק (בעל מעטפת סטרילית) שיוצמד לקצה הלפרוסקופ ויהיה ניתן להפעילו ללא הסרת ידי המנתח מן הלפרוסקופ.

ע"מ ליצור תקשורת מהירה ונוחה עם המנתח, הרובוט משתמש בקול מלאכותי. כדי שקליטת האינפורמציה הקולית מן המנתח תהיה יעילה, מהימנה ומהירה יש צורך להמשיך ולפתח מערכות אלו. תקשורת זו עדיין בעלת מספר חסרונות:

- אין תחליף להצבעה על האזור המדויק בו מדובר.
- המידע המתקבל מן הרובוט ומועבר למנתח חייב להיות ספציפי מאוד, מדויק ומהיר.
- בנוסף למערך שיתן את המידע באמצעות קול סינטטי יש להבטיח כי במקרה ומתרחשת תקלה כל המידע יוצג על גבי המסך.

Direct teleoperation

מנגנון זה מאפשר למנתח לשלוט ברובוט בצורה אינטראקטיבית. הוא נותן לו פקודות לבצע תנועות מסוימות, הצורה הישירה ביותר למתן פקודות הוא ע"י הפעלת כוח חיכוני. המנתח אחז במכשיר הלפרוסקופי ולוחץ עליו. מערך הבקרה של הרובוט מגיב ללחץ המופעל שחש בו באמצעות החישן שנמצא בזרוע הרובוט ומזיז את עצמו לכיוון אליו המנתח מובילו. בעתיד הכוח יופעל על מכשיר ג'ויסטיק ובאמצעות האחרון יכוון את הפעלת הכוח הנדרש. במנגנון הג'ויסטיק קיימים כפתורים הקובעים באיזה צירי תנועה הרובוט יפעל. ישנם שני מודלים המאפשרים שליטה באמצעות הג'ויסטיק:

- *anatomy centered viewpoint* – זהו מנגנון הנשאר ממוקם במרכז שדה הראיה של המצלמה. מנגנון זה מאפשר התקרבות והתרחקות מאזור מסוים בו המנתח רוצה להסתכל.
- *Viewpoint displacement* – מנגנון זה מאפשר להזיז את המצלמה למקומות שונים באנטומית החולה.

Vision guided operation

הדרך הטובה ביותר עבור המנתח להצביע על אזור מסוים הוא באמצעות ג'ויסטיק שישמש כלי למיקום סמן שנמצא על גבי הדמות בטלויזיה. ברגע שהמיקום נבחר מערכת הבקרה יכולה להציג את האזור הנבחר בתצוגה תלת ממדית. אם המכשיר הלפרוסקופי הוא בעל אפשרות לצפייה בציר אחד בלבד, מערך הבקרה מצלם את אזור זה ואח"כ זז לכיוון שני ומצלם את האזור מזווית נוספת, האזור הרצוי עובר עיבוד ומוצג באופן תלת ממדי. אם השימוש הוא במערכת לפרוסקופית העובדת בסטריאו אין צורך להעביר את המצלמה ממקום למקום ע"מ ליצור דמות תלת ממדית. כאשר מקום מסוים על גבי אנטומית החולה נקבע, מערכת השליטה של הרובוט יכולה לכונן בקלות יחסית את המצלמה שנמצאת על גבי המכשיר הלפרוסקופי למקום החדש. אופציה נוספת לשימוש הוא לאתר נקודה מסוימת רצויה אך לשמור את הטיפול בה לשלב מאוחר יותר. הרובוט

ידע לשמור בזיכרון את המיקום המדויק הנ"ל. המערכת מאפשרת בכל עת שנדרש לחזור לנקודה מסוימת שסומנה קודם לכן.

רובוט – כתחליף לאדם המסייע בנייתוח:

סייען טוב במהלך הניתוח הוא אחד שיש לו את היכולות לבצע פעולות פשוטות באופן עצמאי. תחת פיקוח של המנתח. זו המטרה אליה צריך לשאוף הרובוט. המערכת צריכה להיות מסוגלת לבצע את המשימות הפשוטות ללא קבלת הוראות מפורטות מהמנתח. – המצלמה המשמשת בנייתוחי לפרוסקופיה מהווה דוגמא לכך – המנתח למעשה מצביע רק על המקום הרצוי לו ואילו המערכת הרובוטית מבצעת את שאר הפעולות. בתפקיד זה יש אף יתרון של הרובוט על האדם המסייע. הרובוט אינו מתבלבל משינוי קורדינאטות (בניגוד לאדם). כמו כן הרובוט יציב יותר ומדויק יותר בהשוואה לאדם. לדוגמא, במהלך ניתוח בו נפלטה אבן מכיס המרה יש צורך למצוא את מיקום האבן על מנת להוציאה. המנתח בוחר בכפתור שנמצא על גבי הרובוט בפעולה של " go to" הרובוט מודיע כי זו הפעולה שנבחרה ומראה למנתח היכן המיקום החשוד של האבן. הרובוט מודיע למנתח על המיקום, מחכה לאישורו על המיקום ולהוראה שתאפשר לו לזוז לכיוון הרצוי. לאחר קבלת האישור הרובוט זז לכיוון הרצוי כך שצינורית הלפרוסקופ תהיה במקום הנכון ולאחר מכן המנתח לוקח את הכלי המתאים מחדיר אותו דרך הצינורית ושולף את האבן המדוברת החוצה.



סיכום

בעתיד יש כוונה להכניס את השימוש ברובוטים רפואיים על מנת שיבצעו תפקידים פשוטים רבים באופן עצמאי כמו תפירה ביופסיה ועוד. הרובוט ימצא אזור רצוי, יקבל אישור כי זהו האזור המדובר ויבצע את הפעולה. העובדה כי הרובוט בעל יכולת דיוק גבוהה מאוד ויציבות רבה הופכת אותו למועמד לפרוצדורות ניתוחיות שונות במקום או במקביל לאדם. יש להדגיש כי השימוש ברובוטים אינו נועד על מנת להחליף את האדם המנתח אלא על מנת לשפר את היכולת הביצועית ולנצל את היתרונות שלו (כפי שצוינו בהקדמה) על מנת להגיע לתוצאות האופטימליות.

Bibliography:

1. Second International Workshop on *Robotics and Computer Assisted Medical Interventions*. Bristol, England June 23-26, 1996.
2. Engineering in Medicine and Biology, IEEE, vol.14 (3) May/June 1995 (279-288)
3. Stulberg & Kienzle: Computer and Robot-Assisted Orthopaedic surgery (chapter: 27-30)