



دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد
گرایش: بیومکانیک

طراحی ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی

اساتید راهنما:
دکتر فرزاد فرهمند
دکتر علی مقداری

نگارش:
علیرضا میرباقری

اردیبهشت ۱۳۸۵

تقدیم به پیشگاه مقدس حضرت ولی عصر

عجل الله تعالی فرجه الشریف

و

تقدیم به پدر، مادر، خواهران و همسر

فداکار و عزیزتر از جانم

تقدیر و تشکر

حمد و سپاس ایزد منان را که توفیقی عطا کرد تا در تابش پرتوهای حیات بخش اسلام از مواهب این دین پربرکت و مشوق به علم استفاده نماییم و امیدواریم خداوند باب‌های علم و حکمت را هرچه فزون‌تر بر روی بندگان مسلمان خویش باز کرده و روزی مسلمانان طلایه داران علم در جهان بشریت باشند.

در اینجا بعد از حمد و سپاس فراوان از پروردگار متعال به خاطر توفیق در انجام این پروژه لازم می‌دانم از همه کسانی که مرا در انجام این پروژه یاری رساندند به ویژه آقای دکتر فرزام فرهنگد و آقای دکتر علی مقداری، اساتید راهنمای پروژه که با درایت و نگاهی به آینده پروژه را رهبری کرده و به نتیجه رساندند و آقای دکتر علی امیرفضلی و آقای دکتر جاهد، اساتید ممتحن پروژه و کلیه اساتید و مسئولین محترم دانشگاه صنعتی شریف، تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از آقای دکتر سرکار، رئیس مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی که در تاسیس آزمایشگاه جراحی رباتیک و انجام این پروژه در مرکز یاد شده، ما را یاری رساندند و آقایان دکتر طولابی، دکتر کریمیان و دکتر کشوری، جراحان متخصص لاپاروسکوپی در بیمارستان امام خمینی که با راهنمایی‌های ارزنده‌ی خود و فراهم آوردن امکان ورود اینجانب به اطاق عمل به این پروژه شکل واقعی‌تری بخشیدند، کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورم. در نهایت از پدر و مادر گرامی و همسر عزیزتر از جانم که با فداکاری‌ها و مساعدت‌های خود مرا در انجام این پروژه یاری رساندند، تشکر و قدردانی می‌نمایم و به خاطر همه چیز تا ابد از این بزرگواران سپاس گزارم.

علیرضا میرباقری

اردیبهشت ۸۵

چکیده:

جراحی لاپاروسکوپی یکی از مصادیق جراحی با حداقل آسیب (Minimally Invasive Surgery-MIS) می‌باشد که در حفره‌ی شکمی انجام می‌شود. در این روش از دو یا سه شکاف کوچک ابزارهای میله‌ای شکل جراحی و از شکاف دیگر دوربین یا لاپاروسکوپ وارد شکم شده و از طریق تصویر ایجاد شده در صفحه‌ی نمایشگر، عمل جراحی انجام می‌شود. در این نوع عمل علاوه بر جراح اصلی حضور یک فرد کمک جراح به منظور نگهداری و هدایت لاپاروسکوپ طبق فرمان جراح ضروری است. با توجه به مشکلات گزارش شده از قبیل عدم هماهنگی فرد کمک جراح با جراح اصلی و خستگی زود هنگام وی و در نتیجه لرزش دست و افزایش امکان اشتباه، سعی شده است این فرد با یک بازوی رباتیکی مناسب جایگزین شود.

طی این پروژه به منظور شناسایی حرکات مورد نیاز و نیازهای کاربری، ضمن استفاده از منابع موجود، از حضور مستقیم در اتاق عمل طی بیش از بیست عمل جراحی لاپاروسکوپی و مشاوره با جراحان متخصص لاپاروسکوپی در چندین کنگره‌ی لاپاروسکوپی نیز استفاده شده است. سپس بعد از شناسایی مکانیزم‌های موجود و بررسی دقیق مزایا و معایب هر یک، چند مکانیزم مختلف به منظور نگهداری و حرکت لاپاروسکوپ در جراحی لاپاروسکوپی طراحی و در نرم‌افزار vNASTRAN شبیه سازی حرکتی شده و مورد بررسی کیفی قرار گرفته‌اند. در نهایت از بین مکانیزم‌های طراحی شده و با توجه به شرایط عینی اتاق عمل و با در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی چون دقت، عدم تداخل فضایی با سایر ابزارها و دست جراح، عدم اعمال نیروهای بزرگ به بدن بیمار، ملاحظات ارگونومیک، برنامه ریزی و کنترل ساده، سادگی مکانیزم، سهولت استفاده و به ویژه هزینه‌ی ساخت پایین، مناسب‌ترین مکانیزم انتخاب شده است.

یک نتیجه‌ی قابل توجه از شناسایی دقیق نیازهای کاربری که منجر به ویژگی اصلی مکانیزم نهایی طراحی شده در این پروژه نسبت به سایر مکانیزم‌های موجود شده است عبارت است از استفاده از حداقل تعداد درجات آزادی فعال ممکن (فقط سه عملگر) به منظور برطرف ساختن کلیه‌ی نیازهای حرکتی (فقط سه حرکت مستقل) در عمل لاپاروسکوپی. علاوه بر این در این مکانیزم بسیاری از مشکلات مکانیزم‌های قبلی برطرف شده است.

در نهایت بهترین طرح مورد تحلیل سینماتیکی - دینامیکی و ارزیابی کمی قرار گرفته و پارامترهای شاخص طولی سازه‌ی و معیار مهارت ربات و فضای کاری آن نتایج مطلوبی حاصل کرده‌اند. به علاوه فرایند تولید مسیر در این ربات مورد بررسی قرار گرفته و توانایی مکانیزم در انجام حرکات شعاعی - کروی دقیق که نیاز اصلی در این کاربرد می‌باشد، به اثبات رسیده است.

کلمات کلیدی: جراحی لاپاروسکوپی، جراحی رباتیک، ربات دستیار، طراحی، شبیه سازی

Key Words: Laparoscopic Surgery, Robotic Surgery, Assistant Robot, Design, Simulation

فهرست مطالب و ضمائ

فصل اول: مقدمه.....	۲
۱-۱. جراحی با حداقل آسیب و جراحی لاپاروسکوپی.....	۲
۲-۱. جایگاه و اهمیت پروژه.....	۵
۳-۱. اهداف پروژه.....	۷
۴-۱. مروری بر فصل های پایان نامه.....	۸
فصل دوم: جراحی رباتیک.....	۱۱
۱-۲. مقدمه.....	۱۱
۲-۲. چرا جراحی رباتیک؟.....	۱۱
۳-۲. اصول طراحی ربات های جراح.....	۱۲
۴-۲. واسطه های مابین جراح و ربات.....	۱۴
۵-۲. مروری بر سیستم های جراحی رباتیک.....	۱۵
۱-۵-۲. سیستم های رباتیکی به منظور افزایش قابلیت های جراح.....	۱۵
سیستم جراحی داوینچی.....	۱۶
سیستم جراحی زئوس.....	۲۰
۲-۵-۲. سیستم های رباتیکی دستیار جراح.....	۲۱
ربات ایساپ.....	۲۱
ربات مسیریاب.....	۲۳
ربات نورومیت.....	۲۴
فصل سوم: مروری بر مکانیزم های موجود.....	۲۶
۱-۳. مقدمه.....	۲۶
۲-۳. روش شناسایی و بررسی مکانیزم های ویژه ی نگهداری لاپاروسکوپ.....	۲۶
۳-۳. نتایج: انواع مکانیزم های ویژه ی نگهداری لاپاروسکوپ و مزایا و معایب هر یک.....	۲۷
۱-۳-۳. مکانیزم های غیر فعال.....	۲۸
مکانیزم سری با مفاصل قفل شونده.....	۲۸
مکانیزم سری با مفاصل اصطکاکی.....	۳۰
مچ با مفصل گوی و کاسه ای.....	۳۱
مکانیزم های کروی.....	۳۲
۲-۳-۳. مکانیزم های فعال.....	۳۵

۳۶	 مکانیزم کروی کشویی
۳۷	 بازوی نگهدارنده‌ی اندوسکوپ ربات داوینچی
۴۰	 ربات ایساپ
۴۵	 مکانیزم پوشیدنی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ
۴۶	 استفاده از ربات‌های صنعتی
۴۷	۴-۳. نتیجه گیری: جایگاه کار حاضر نسبت به کارهای قبلی
۴۸	 فصل چهارم: طراحی مکانیزم ربات
۴۸	۱-۴. تعریف مساله‌ی طراحی و نیازهای کاربری
۴۸	۱-۱-۴. مقدمه
۴۸	۲-۱-۴. روش شناسایی نیازهای کاربری و مشخصات فنی مورد نیاز
۴۹	۱- گردآوری اطلاعات از منابع علمی
۵۳	۲- بازدید از جراحی‌های لاپاروسکوپی مختلف در اطاق عمل
۵۶	۳- مشاوره با جراحان متخصص لاپاروسکوپی
۵۶	۳-۱-۴. نتیجه: نیازهای کاربری و ملاحظات و مشخصات فنی مورد نیاز
۶۲	۲-۴. ارزیابی مکانیزم‌های موجود
۶۷	۳-۴. طراحی مکانیزم
۶۷	۱-۳-۴. مقدمه
۶۸	۲-۳-۴. روش طراحی مکانیزم
۶۸	 مکانیزم سری با محورهای متقاطع در مرکز حرکت
۷۰	 مکانیزم دو متوازی الاضلاعی دارای مرکز حرکت ثابت
۷۴	 مکانیزم کروی- استوانه‌ای ایستاده (مکانیزم نهایی)
۷۹	۳-۳-۴. بحث و نتیجه گیری برای انتخاب بهترین طرح
۸۱	۴-۴. طراحی ابعاد مکانیزم
۸۳	 فصل پنجم: تحلیل سینماتیکی- دینامیکی و معیارهای کمی فضای کاری
۸۳	۱-۵. مقدمه
۸۳	۲-۵. سینماتیک مستقیم
۸۶	۳-۵. سینماتیک وارون
۸۷	۴-۵. فضای کاری
۸۸	۱-۴-۵. معیارهای کمی مشخصات فضای کاری
۸۹	• نقاط تکیه
۸۹	• شاخص طولی سازه‌ای

۹۰	• معیار مهارت
۹۱	۵-۵. ژاکوبی، سرعت‌ها و نیروهای استاتیکی
۹۵	۶-۵. محاسبه‌ی گشتاورها و نیروهای مفصلی در حالت دینامیکی
۹۵	۵-۶-۱. مقدمه
۹۵	۵-۶-۲. روش: الگوریتم دینامیکی تکراری نیوتن-اوایلر
۹۷	۵-۶-۳. نتیجه: نیروها و گشتاورهای مفصلی در حالت دینامیکی
۱۰۳	فصل ششم: تولید مسیر و شبیه‌سازی حرکتی
۱۰۳	۶-۱. مقدمه
۱۰۳	۶-۲. روش تولید مسیر کروی
۱۰۴	۶-۲-۱. حرکت شعاعی بزرگنمایی مثبت/ منفی
۱۰۶	۶-۲-۲. حرکت چرخشی سر لاپاروسکوپ به بالا/ پایین
۱۰۹	۶-۲-۳. حرکت چرخشی سر لاپاروسکوپ به چپ/ راست
۱۱۱	۶-۳. نتایج شبیه‌سازی
۱۱۱	۶-۳-۱. شبیه‌سازی حرکت شعاعی بزرگنمایی مثبت/ منفی
۱۱۷	۶-۳-۲. شبیه‌سازی حرکت چرخشی سر لاپاروسکوپ به بالا/ پایین
۱۲۴	۶-۳-۳. شبیه‌سازی حرکت چرخشی سر لاپاروسکوپ به چپ/ راست
۱۲۸	۶-۴. بحث و نتیجه‌گیری
۱۲۹	فصل هفتم: انتخاب اجزاء و طراحی تفصیلی
۱۲۹	۷-۱. مقدمه
۱۲۹	۷-۲. روش ساخت
۱۲۹	۷-۳. نتیجه
۱۳۰	۷-۳-۱. عملگر خطی
۱۳۰	۷-۳-۲. عملگر دورانی دو درجه آزادی
۱۳۱	۷-۴. طراحی تفصیلی
۱۳۲	فصل هشتم: نتایج، نوآوری‌ها و برنامه‌های آتی
۱۳۲	۸-۱. نتایج
۱۳۲	۸-۲. نوآوری‌ها
۱۳۴	۸-۳. برنامه‌های آتی
۱۳۵	منابع

۱۳۹	ضمائم
۱۳۹	نظرسنجی و ارزیابی نیاز جامعه‌ی جراحی به ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی:
۱۴۱	برنامه مربوط به حل سینماتیک مستقیم در نرم افزار MATLAB:
۱۴۲	برنامه مربوط به حل مساله سینماتیک وارون در نرم افزار MATLAB:
۱۴۳	فرایند بررسی صحت حل مسائل سینماتیک مستقیم و وارون در نرم افزار MATLAB:
۱۴۴	شبیه سازی حرکت بزرگنمایی مثبت/ منفی در نرم افزار MATLAB:
۱۴۸	شبیه سازی حرکت چرخشی بالا/ پایین در نرم افزار MATLAB:
۱۵۱	شبیه سازی حرکت چرخشی چپ/ راست در نرم افزار MATLAB:
۱۵۴	مشخصات فنی مدول های مورد استفاده و نقشه های اجزاء ربات
۱۸۰	مقالات مستخرج از پایان نامه

فصل اول.....	۲
شکل ۱-۱. مقایسه نحوه‌ی عمل و اثر باقیمانده در عمل کیسه‌ی صفرا به دو روش جراحی باز (شکل بالا) و جراحی با حداقل آسیب (شکل پایین) [4].....	۳
شکل ۲-۱. لنز لاپاروسکوپ همراه با CCD و کابل نور سرد متصل به آن.....	۴
شکل ۳-۱. عمل آپاندیسیت به روش لاپاروسکوپی (اطاق عمل بیمارستان امام خمینی).....	۵
فصل دوم.....	۱۱
شکل ۱-۲. ربات RCM دارای مجری نهایی نامرئی در امواج تصویربرداری حین عمل جراحی استخراج سنگ کلیه [9].....	۱۴
شکل ۲-۲. سایت سیستم جراحی داوینچی [26].....	۱۷
شکل ۳-۲. بازوهای رباتیکی سیستم جراحی داوینچی [26].....	۱۷
شکل ۴-۲. ابزار انتهای مچی در سیستم جراحی رباتیک داوینچی [26].....	۱۸
شکل ۵-۲. اندوسکوپ به کار رفته در سیستم داوینچی [26].....	۱۸
شکل ۶-۲. ابزار انتهای مچی با فرمان گیری از مسترهای در دست جراح حرکات جراح را کپی می‌کنند [26]..	۱۹
شکل ۷-۲. سایت جراحی رباتیک زئوس [27].....	۲۰
شکل ۸-۲. ایساپ ۳۰۰۰ [27].....	۲۲
شکل ۹-۲. ربات ایساپ به عنوان نگهدارنده لاپاروسکوپ در جراحی MIS [27].....	۲۲
شکل ۱۰-۲. ربات Path finder برای استفاده در جراحی های مغز و اعصاب [28].....	۲۳
شکل ۱۱-۲. ربات مسیریاب در حین مسیره‌ی برای نفوذ به داخل جمجمه از مسیر مشخص شده‌ی قبلی و انجام عمل جراحی [28].....	۲۴
شکل ۱۲-۲. ربات Neuromate برای استفاده در عمل جراحی مغز و اعصاب [29].....	۲۵
فصل سوم.....	۲۶
شکل ۱-۳. بازوی سری با مفاصل قفل شونده ساخت شرکت Richard Wolf (نمایشگاه اولین کنگره انجمن اندوورولوژی و یورولاپاروسکوپی ایران در تاریخ ۲۲-۲۴ مهرماه ۱۳۸۳).....	۲۹
شکل ۲-۳. مکانیزم سری با مفاصل اصطکاکی [33].....	۳۱
شکل ۳-۳. مچ با مفصل گوی و کاسه‌ای [35].....	۳۲
شکل ۴-۳. مکانیزم کروی با پنج رابط کمائی [35].....	۳۳

- شکل ۳-۵. مکانیزم کروی با دو رابط کمانی [36] ۳۴
- شکل ۳-۶. مکانیزم کروی با یک رابط کمانی [37] ۳۵
- شکل ۳-۷. مکانیزم کروی کشویی [38] ۳۷
- شکل ۳-۸. بازوی نگهدارنده لاپاروسکوپ در سیستم جراحی داوینچی [26] ۳۷
- شکل ۳-۹. مکانیزم ربات داوینچی نصب شده بر روی پایه‌ی عمودی کنار تخت بیمار [39] ۳۸
- شکل ۳-۱۰. نصب بازوی نگهدارنده‌ی اندوسکوپ ربات داوینچی بر روی ارابه‌ی چرخ دار [40] ۳۹
- شکل ۳-۱۱. نصب بازوی نگهدارنده‌ی اندوسکوپ ربات داوینچی بر روی یک پایه‌ی چهار درجه آزادی نصب شده زیر تخت بیمار [41] ۴۰
- شکل ۳-۱۲. مکانیزم اولیه‌ی ربات ایساپ [42] ۴۱
- شکل ۳-۱۳. مکانیزم مچ ربات ایساپ در اولین طرح [42] ۴۳
- شکل ۳-۱۴. نمودار شماتیک مکانیزم ربات ایساپ در سال ۱۹۹۹ [45] ۴۳
- شکل ۳-۱۵. بازوی ربات ایساپ شامل مفصل JS2a در سال ۲۰۰۰ [46] ۴۴
- شکل ۳-۱۶. طرح شماتیک بازوی ایساپ شامل مفصل JS2a [47] ۴۴
- شکل ۳-۱۷. استفاده از آخرین مدل ربات ایساپ در عمل لاپاروسکوپی [48] ۴۵
- شکل ۳-۱۸. مکانیزم پوشیدنی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ [49] ۴۶
- شکل ۳-۱۹. استفاده از ربات صنعتی Stäubli RX60 در جراحی لاپاروسکوپی [50] ۴۷
- فصل چهارم ۴۸
- شکل ۴-۱. موقعیت افراد و ابزارها در نمونه‌ای از یک عمل لاپاروسکوپی بر روی غده پانکراس: S: جراح، A: کمک جراح، AE: تجهیزات بیهوشی، M: مانیتور، CO: نگهدارنده‌ی دوربین [4] ۵۰
- شکل ۴-۲. موقعیت افراد و ابزارها در نمونه‌ای از یک عمل لاپاروسکوپی بر روی معده: S: جراح، AS: کمک جراح، AE: متخصص بیهوشی، M: مانیتور، CO: نگهدارنده‌ی دوربین [4] ۵۱
- شکل ۴-۳. موقعیت ابزارها در نمونه‌ای از یک عمل لاپاروسکوپی بر روی روده‌ی بزرگ [4] ۵۱
- شکل ۴-۴. موقعیت افراد و ابزارها در نمونه‌ای از یک عمل لاپاروسکوپی بر روی رحم [4] ۵۲
- شکل ۴-۵. درجات آزادی لاپاروسکوپ بعد از ورود به شکم ۵۳
- شکل ۴-۶. موقعیت افراد و ابزارها در عمل استخراج کیسه‌ی صفرا به روش لاپاروسکوپی (اطاق عمل بیمارستان امام خمینی) ۵۴
- شکل ۴-۷. موقعیت افراد و ابزارها در عمل آپاندیسیت به روش لاپاروسکوپی (اطاق عمل بیمارستان امام خمینی) ۵۵
- شکل ۴-۸. موقعیت افراد و ابزارها در عمل استخراج غده‌ای از داخل قفسه‌ی سینه به روش لاپاروسکوپی (اطاق عمل بیمارستان امام خمینی) ۵۵
- شکل ۴-۹. نوعی تروکار استفاده شونده در عمل لاپاروسکوپی ۵۹

- شکل ۴-۱۰. لاپاروسکوپ (لنز) ۱۰ میلیمتری ۶۰
- شکل ۴-۱۱. لاپاروسکوپ به همراه تروکار، دوربین و فیبر نور سرد متصل به آن ۶۰
- شکل ۴-۱۲. مکانیزم سری با محورهای متقاطع در مرکز حرکت (نقطه‌ی ورود به شکم)، شامل سه محور دورانی دو به دو عمود بر هم و یک محور خطی در امتداد لاپاروسکوپ ۷۰
- شکل ۴-۱۳. نمای پایه‌ی سه درجه آزادی و میج چهار درجه آزادی ربات نگهدارنده لاپاروسکوپ ۷۰
- شکل ۴-۱۴. مکانیزم دو متوازی الاضلاعی دارای مرکز حرکت ثابت ۷۲
- شکل ۴-۱۵. چگونگی انجام حرکت حول محور ۱ از نمای روبرو و ۷۲
- شکل ۴-۱۶. چگونگی انجام حرکت حول محور ۲ از نمای جانبی ۷۳
- شکل ۴-۱۷. چگونگی انجام حرکت حول محور ۲ از نمای ایزومتریک ۷۳
- شکل ۴-۱۸. مکانیزم کروی- استوانه‌ای ایستاده به عنوان مناسب‌ترین مکانیزم طراحی شده برای ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی (شکل به وضوح توانایی مکانیزم در حرکت لاپاروسکوپ بین سایر ابزارهای جراحی را نشان می‌دهد) ۷۶
- شکل ۴-۱۹. ابعاد کلی مکانیزم ۸۲

فصل پنجم ۸۳

- شکل ۵-۱. چهارچوب‌های متصل به رابطها ۸۴
- شکل ۵-۲. فضای کاری برش خورده‌ی مکانیزم کروی- استوانه‌ای در نظر گرفته شده برای ربات ۸۸
- شکل ۵-۳. مقادیر معیار مهارت در فضای کاری مکانیزم چهارم ۹۱
- شکل ۵-۴. مکان مرکز جرم رابطها ۹۸

فصل ششم ۱۰۳

- شکل ۶-۱. تغییرات رابطها و متغیرهای مفصلی در هنگام بزرگنمایی مثبت ۱۰۴
- شکل ۶-۲. تغییرات رابطها و متغیرهای مفصلی در هنگام حرکت سر لاپاروسکوپ به پایین ۱۰۷
- شکل ۶-۳. شبیه سازی نفوذ لاپاروسکوپ به داخل شکم در نرم افزار MATLAB (+): محل ورود به شکم، (o) پایین: مجری نهایی (محل گیره‌ی لاپاروسکوپ)، (o) بالا: مبدا دستگاه مختصات سه، خطوط واصل: روند حرکت میله‌ی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ (رابط سه) ۱۱۱
- شکل ۶-۴. طول لاپاروسکوپ وارد شده به شکم همراه با سرعت و شتاب خطی ورود، بر حسب زمان ۱۱۲
- شکل ۶-۵. موقعیت محورهای ۱، ۳ و ۴ بر حسب زمان در طول یک حرکت شعاعی به طول 200 mm ۱۱۳
- شکل ۶-۶. زاویه‌ی لاپاروسکوپ با افق در هنگام حرکت بزرگنمایی مثبت ثابت مانده است ۱۱۴
- شکل ۶-۷. شبیه سازی نفوذ لاپاروسکوپ از سمت چپ و پایین به بدن بیمار در نرم افزار MATLAB (+): محل ورود به شکم، (o) پایین: مجری نهایی (محل گیره‌ی لاپاروسکوپ)، (o) بالا: مبدا دستگاه مختصات سه، خطوط واصل: روند حرکت میله‌ی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ (رابط سه) ۱۱۵

شکل ۶-۸. شبیه سازی حرکت بزرگنمایی مثبت / منفی در محیط vNASTRAN..... ۱۱۶

شکل ۶-۹. طول لاپاروسکوپ خارج از شکم با گذشت زمان، حین حرکت بزرگنمایی..... ۱۱۶

شکل ۶-۱۰. موقعیت محور خطی شماره‌ی یک با گذشت زمان، حین حرکت بزرگنمایی در نزدیکی سطح بدن..... ۱۱۷

شکل ۶-۱۱. موقعیت دومین محور دورانی (محور سه) با گذشت زمان، حین حرکت بزرگنمایی در نزدیکی سطح بدن..... ۱۱۷

شکل ۶-۱۲. شبیه سازی چرخش لاپاروسکوپ هنگام ورود از سمت چپ و بالا به بدن بیمار در نرم افزار MATLAB (+): محل ورود به شکم، (0) پایین: مجری نهایی (محل گیره‌ی لاپاروسکوپ)، (0) بالا: مبدا دستگاه مختصات سه، خطوط واصل: روند حرکت میله‌ی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ (رابط سه)..... ۱۱۹

شکل ۶-۱۳. زاویه، سرعت و شتاب زاویه‌ای لاپاروسکوپ نسبت به صفحه‌ی افقی برحسب زمان در حرکت چرخشی لاپاروسکوپ به بالا..... ۱۲۰

شکل ۶-۱۴. موقعیت محورهای ۱، ۳ و ۴ برحسب زمان در هنگام یک حرکت چرخشی بالا/ پایین لاپاروسکوپ به اندازه 200 deg..... ۱۲۱

شکل ۶-۱۵. طول لاپاروسکوپ خارج مانده از شکم در حین حرکت چرخشی بالا/ پایین بر حسب زمان..... ۱۲۱

شکل ۶-۱۶. شبیه سازی حرکت چرخشی بالا/ پایین در محیط vNASTRAN..... ۱۲۲

شکل ۶-۱۷. زاویه‌ی لاپاروسکوپ خارج از شکم نسبت به افق با گذشت زمان، حین حرکت چرخشی پایین..... ۱۲۳

شکل ۶-۱۸. موقعیت محور خطی شماره‌ی یک با گذشت زمان، حین حرکت چرخشی سر لاپاروسکوپ به پایین..... ۱۲۳

شکل ۶-۱۹. موقعیت دومین محور دورانی (محور سه) با گذشت زمان، حین حرکت چرخشی سر لاپاروسکوپ به پایین..... ۱۲۳

شکل ۶-۲۰. شبیه سازی چرخش لاپاروسکوپ به سمت چپ هنگام ورود از روی سطح شکم بیمار در نرم افزار MATLAB (+): محل ورود به شکم، (0) پایین: مجری نهایی (محل گیره‌ی لاپاروسکوپ)، (0) بالا: مبدا دستگاه مختصات سه، خطوط واصل: روند حرکت میله‌ی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ (رابط سه)..... ۱۲۵

شکل ۶-۲۱. زاویه، سرعت و شتاب زاویه‌ای محور دو و لاپاروسکوپ حول محور قائم برحسب زمان در حرکت چرخشی لاپاروسکوپ به چپ..... ۱۲۶

شکل ۶-۲۲. موقعیت محورهای ۱، ۳ و ۴ برحسب زمان در هنگام یک حرکت چرخشی چپ/ راست..... ۱۲۶

لاپاروسکوپ تغییر نمی‌کند..... ۱۲۷

شکل ۶-۲۳. طول لاپاروسکوپ خارج مانده از شکم در حین حرکت چرخشی چپ/ راست بر حسب زمان..... ۱۲۷

فصل هفتم..... ۱۲۹

شکل ۷-۱. مدول خطی انتخاب شده از محصولات شرکت امتک مجهز به سروو موتور و بال اسکرو..... ۱۳۰

شکل ۷-۲. مدول دورانی دو درجه آزادی انتخاب شده از محصولات شرکت امتک مجهز به دو سروو موتور و

انکودر جداگانه..... ۱۳۰

شکل ۷-۳. ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی ۱۳۱

فصل هشتم ۱۳۲

فصل اول.....	۲
فصل دوم.....	۱۱
جدول ۱-۲. مقایسه‌ی توانایی‌ها و محدودیت‌های انسان و ربات در کاربردهای جراحی.....	۱۲
فصل سوم.....	۲۶
فصل چهارم.....	۴۸
جدول ۱-۴. مشخصات فنی مورد نیاز برای مکانیزم ربات.....	۶۱
جدول ۲-۴. معیارهای ارزیابی و امتیازات اختصاص داده شده به مکانیزم‌های موجود.....	۶۵
جدول ۳-۴. ترکیبات مختلف مکانیزم‌های سه درجه آزادی شامل محورهای کشویی و دورانی [35].....	۷۵
جدول ۴-۴. معیارهای ارزیابی و امتیازات اختصاص داده شده به هر مکانیزم.....	۸۱
فصل پنجم.....	۸۳
جدول ۱-۵. پارامترهای دناویت- هارتنبرگ برای مکانیزم کروی- استوانه‌ای ایستاده.....	۸۴
فصل ششم.....	۱۰۳
فصل هفتم.....	۱۲۹
فصل هشتم.....	۱۳۲

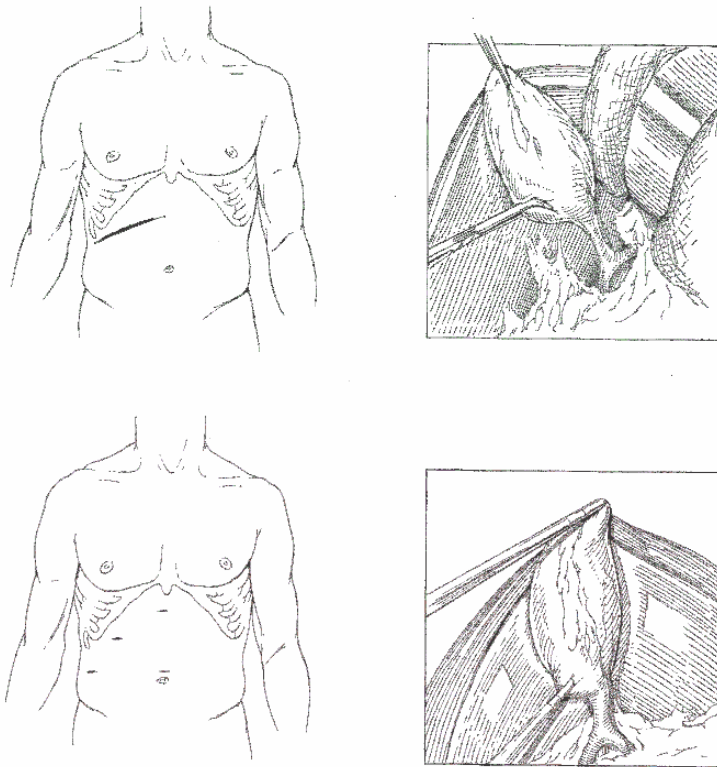
مقدمه

۱-۱. جراحی با حداقل آسیب^۱ و جراحی لاپاروسکوپی^۲

در سال های اخیر روش جراحی با حداقل آسیب یکی از جذاب ترین مباحث مورد علاقه جراحان و محققان در کل دنیا بوده و روز به روز در حال توسعه و پیشرفت است. در این روش جراحی به منظور دسترسی به ناحیه مورد نظر برای عمل جراحی در داخل بدن ، فقط از دو یا سه شکاف کوچک در ناحیه ی سطحی بدن استفاده می شود. از یک یا دو شکاف ایجاد شده در روی پوست ابزارهای جراحی و از شکاف دیگر دوربین یا اندوسکوپ وارد بدن شده و در ناحیه ی مورد نظر به هم می رسند. این امر به جراح اجازه می دهد که از طریق تصویر ایجاد شده از ناحیه ی عمل در صفحه ی نمایشگر روبروی خود و با استفاده از ابزارهای خاص، عمل جراحی را انجام دهد [1]. این روش در مقایسه با روش جراحی باز که جراح را مجبور به ایجاد شکاف های بزرگ در نواحی سطحی بدن می کند دارای مزایایی از قبیل کاهش آسیب به بافت های مجاور و جراحات وارده به بیمار، کاهش خون ریزی، کاهش درد بعد از عمل، کاهش داروهای مسکن مصرفی توسط بیمار، کاهش دوره ی نقاهت و هزینه های نگهداری بیمار در بیمارستان و مزایایی از این قبیل است. در شکل (۱-۱) به منظور مقایسه اثر باقیمانده از عمل جراحی کیسه ی صفرا به دو روش جراحی باز و جراحی با حداقل آسیب نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود در روش جراحی با حداقل آسیب جراحات وارده به بیمار بسیار کمتر است. اما در مقابل این روش مشکلاتی از قبیل طولانی شدن زمان عمل (به دلیل ورود ابزار از یک راهگاه با فقط چهاردرجه آزادی) و عدم وجود حس هندسی و لمسی از محیط جراحی را به همراه دارد [2, 3] که با مهارت و تجربه ی جراح قابل بر طرف شدن است.

¹ Minimally Invasive Surgery-MIS

² Laparoscopic Surgery



شکل ۱-۱. مقایسه نحوه‌ی عمل و اثر باقیمانده در عمل کیسه‌ی صفرا به دو روش جراحی باز (شکل بالا) و جراحی با حداقل آسیب (شکل پایین) [4]

روش جراحی لاپاروسکوپی، یکی از مصادیق روش جراحی با حداقل آسیب است که به جراحی‌های انجام شده در حفره‌ی شکمی اطلاق می‌شود. دوربین استفاده شده در این نوع جراحی که لاپاروسکوپ نام دارد در واقع از یک لوله‌ی صلب به قطر ۵ تا ۱۰ میلیمتر و طول حدود 30 cm شامل تعداد زیادی لنزهای میانی تشکیل شده که در بخش بالایی آن (خارج از بدن بیمار) به منظور ضبط تصاویر، بخش کوچکی از دوربین‌های تصویربرداری موسوم به سی سی دی^۱ قرار می‌گیرد و تصویر را به صورت اطلاعات دیجیتال به کامپیوتر منتقل می‌سازد (شکل ۱-۲).

¹ Charge Coupled Device - CCD



شکل ۱-۲. لنز لاپاروسکوپ همراه با CCD و کابل نور سرد متصل به آن

در این نوع جراحی معمولاً از دو شکاف سطحی برای ورود ابزار جراحی و از شکاف سوم به منظور ورود لاپاروسکوپ و رسیدن به ناحیه‌ی مورد نظر استفاده می‌شود. در شروع عمل ابتدا با ایجاد شکاف کوچکی که معمولاً در نواحی اطراف ناف بیمار ایجاد می‌شود لاپاروسکوپ توسط جراح وارد شکم شده و سپس از طریق همان شکاف و راهگاه جایگذاری شده در آن گاز CO_2 با فشاری معادل ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر جیوه وارد محفظه‌ی شکم می‌گردد. از آنجا که احشای داخلی شکم به سقف شکم چسبندگی ندارند، بر اثر ورود گاز فضای باز و گنبدی شکلی بین سقف شکم و احشاء داخلی آن برای ورود سایر ابزار جراحی به داخل شکم فراهم می‌شود. بعد از این مرحله لاپاروسکوپ به دست فردی به عنوان کمک جراح داده شده و وی مسئولیت حرکت و نگهداری لاپاروسکوپ را طبق فرمان جراح به عهده می‌گیرد. در ادامه شکاف‌های دیگری برای ورود سایر ابزارهای جراحی نیز ایجاد می‌شود. این ابزارها عمدتاً توسط خود جراح کنترل می‌شوند و معمولاً هر دو دست جراح درگیر با ابزارهای جراحی می‌باشد (شکل ۱-۳). به همین دلیل در این نوع جراحی نیاز به استفاده از یک فرد کمک جراح به منظور هدایت و نگهداری لاپاروسکوپ طبق دستورات جراح است.



شکل ۱-۳. عمل آپاندیسیت به روش لاپاروسکوپی (اطاق عمل بیمارستان امام خمینی)

از آنجا که عمل نگهداری لاپاروسکوپ حرکت‌های محدود و کوچکی را به همراه دارد و در اکثر مواقع در طول عمل بایستی لاپاروسکوپ ثابت و بدون لرزش یا حرکت باشد، این فعالیت یک فعالیت استاتیک محسوب شده و نسبت به فعالیت دینامیک (مثل فعالیت خود جراح) خستگی بیشتری را به همراه دارد (در فعالیت استاتیک خون‌رسانی به عضلات تقریباً یک سوم فعالیت دینامیکی می‌باشد [5])، به این ترتیب کمک جراح خیلی زودتر از جراح خسته شده و این خستگی عواقبی چون لرزش دست و در نتیجه خرابی تصویر، عدم هماهنگی کمک جراح با جراح اصلی و در نتیجه طولانی شدن طول عمل و عواقب بعدی آن را به همراه دارد. علاوه بر این صحبت کردن مداوم جراح با کمک جراح به منظور تصحیح محل قرار گیری و زاویه‌ی درست نمایش تصویر، باعث خستگی روانی جراح شده و ناراحتی‌هایی را برای وی به دنبال دارد.

۱-۲. جایگاه و اهمیت پروژه

کاربرد فناوری‌های پیشرفته، از جمله جراحی رباتیک در زمینه‌های مختلف جراحی و بخصوص جراحی با حداقل تهاجم (MIS) به سرعت رو به گسترش است. یکی از متداولترین این کاربردها، استفاده از ربات کمک جراح به منظور نگهداری و هدایت لاپاروسکوپ در جراحی لاپاروسکوپی است که بر اساس گزارشها، سبب افزایش دقت و سرعت عمل‌های جراحی و کاهش مشکلات ناشی از عدم هماهنگی کمکها با جراح، افزایش تعداد پرسنل اتاق عمل، خستگی

جراح و کمک جراح، لرزش تصویر و ... می گردد.

به منظور ارزیابی ضرورت اجرای این پروژه طی برگزاری اولین کنگره انجمن اندویورولوژی و یورولاپاروسکوپی ایران در تاریخ ۲۲-۲۴ مهرماه ۱۳۸۳ برای مطلع شدن از نظر جراحان لاپاروسکوپی در مورد اجرای این پروژه در طول روزهای برگزاری کنگره پرسشنامه هایی که قبلاً آماده شده بود و توضیح مختصری از اهداف پروژه را ارائه می داد به همراه گزارش علمی در مورد انواع ربات های جراح موجود در اختیار شرکت کنندگان قرار گرفت و از آنها درخواست شد که نظر خود را در مورد موارد ذکر شده در پرسشنامه ابراز دارند (سوالات و جواب های داده شده و اسامی جراحان شرکت کننده در این نظر سنجی در بخش ضmann ارائه شده است).

طی نظرسنجی های کتبی و شفاهی به دست آمده در مدت زمان برگزاری این کنگره و سایر کنگره های لاپاروسکوپی با جراحان صاحب نظر در این زمینه، قریب به اتفاق جراحان به مواردی چون طولانی بودن زمان عمل، خستگی فرد نگهدارنده لاپاروسکوپ، لرزش تصویر، وابستگی عمل به مهارت شخص نگهدارنده در مورد نحوه نمایش اجزای مختلف، تغییر کیفیت عمل ها در صورت عوض شدن شخص نگهدارنده دوربین لاپاروسکوپی و ... تاکید می کردند. طبق نظر این جراحان استفاده از یک ربات به منظور نگهداری لاپاروسکوپ و هدایت آن طبق فرمان خود جراح می تواند بسیار مفید بوده و به کاهش زمان عمل و افزایش کیفیت جراحی کمک کرده و مشکلات ناشی از خستگی جراح و کمک جراح را برطرف کند. طی برگزاری این کنگره بسیاری از جراحان علاقه خود را در مورد همکاری در این زمینه ابراز داشتند و اعلام نمودند که در صورت داشتن قیمت مناسب علاقه مند به خریداری و استفاده از چنین سیستمی می باشند. علاوه بر این شرکت کنندگان علاقه خود در مورد آشنایی با ربات های جراحی و کاربردهای آنها در عمل های خود را اعلام داشتند.

به این ترتیب با توجه به تحقیقات به عمل آمده از طریق مشاوره با جراحان متخصص لاپاروسکوپی در داخل کشور و همچنین با توجه به گزارش اداره کل صنایع غذایی و دارویی ایالات متحده آمریکا^۱ مبنی بر اعلام نیاز جراحان لاپاروسکوپی مبنی بر استفاده از ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی و ابراز رضایت جراحان استفاده کننده از چنین سیستم هایی [6]، اهمیت و ضرورت اجرای چنین پروژه ای مورد توجه قرار گرفت تا با استفاده از یک ربات کمک جراح که بتواند به عنوان دست سوم جراح و طبق دستورات او، وظیفه نگهداری و هدایت لاپاروسکوپ را به عهده

¹ U.S. Food and Drug Administration- (FDA)

بگیرد، بتوان علاوه بر حل مشکلات فوق، باعث افزایش سرعت، دقت و کیفیت عمل لاپاروسکوپی شد. به منظور قابل استفاده بودن ربات در بیمارستان‌های کشور، هزینه‌ی ساخت پایین یکی از پارامترهای اصلی در طراحی ربات در نظر گرفته شده است.

۱-۳. اهداف پروژه

هدف از انجام این پروژه طراحی و ساخت رباتی بوده است که بتواند با حداقل تعداد عملگرهای ممکن (به منظور کاهش هزینه‌ها) عمل هدایت و نگهداری لاپاروسکوپ را بر عهده گرفته و تحت کنترل مستقیم جراح، کلیه‌ی نیازهای وی را برطرف نماید.

به عنوان مثال یک نمونه‌ی تجاری از چنین سیستمی ربات ایساپ ساخت شرکت Computer Motion می‌باشد که از سال ۱۹۹۵ تا سال ۲۰۰۳ تولید می‌شده و در سال ۲۰۰۳ با منحل شدن کمپانی سازنده‌ی آن تولید آن متوقف شده است. با توجه به نیاز شدید جامعه‌ی پزشکی به وجود چنین سیستمی برای نگهداری لاپاروسکوپ در عمل جراحی لاپاروسکوپی این ربات در ابتدای ورود به بازار محبوبیت بسیار زیادی پیدا کرده به طوریکه از سال ۱۹۹۵ تا سال ۱۹۹۹ بیش از هشتاد هزار عمل جراحی لاپاروسکوپی با این ربات انجام شده‌است. ولی این ربات از ابتدای امر مشکلاتی را به همراه داشته که با وجود برطرف شدن برخی از آنها برخی دیگر از قبیل چرخش تصویر و نیاز به اصلاح دستی زاویه‌ی قائم لاپاروسکوپ توسط جراح و همچنین مشکل کنترل با صدا همواره با این ربات همراه بوده‌است. از آنجا که این ربات با صدا کنترل می‌شده در صورت تغییر صدای جراح بر اثر سرماخوردگی یا افزایش سن و یا عوض شدن جراح کار نکرده و نیاز به آموزش مجدد با ۴۰۰ کلمه را داشته است. به دلیل این مشکلات و وقت گیر بودن کار با این ربات رفته رفته تعداد عمل‌های جراحی انجام شده با این ربات از سال ۱۹۹۹ تا سال ۲۰۰۳ به بیست هزار عمل کاهش پیدا کرده و سرانجام در سال ۲۰۰۳ شرکت سازنده‌ی آن برای جلوگیری از ورشکستگی اعلام انحلال کرده‌است. در این پروژه سعی شده است با طراحی مکانیزمی مناسب رباتی طراحی شود که با ساختاری ساده و کارآمد مشکلاتی از این قبیل را به همراه نداشته باشد و با دارا بودن هزینه‌ی ساخت پایین و کارآمدی بالا در بیمارستان‌های کشور قابل استفاده بوده و با محیط اطاق عمل و شرایط عمل‌های جراحی لاپاروسکوپی همخوانی داشته باشد.

از آنجا که هدف رسیدن به مکانیزمی با حداقل تعداد عملگرها بوده، کلیه‌ی نیازهای کاربری و حرکات مورد نیاز در

عمل‌های مختلف به دقت بررسی شده و حداکثر تعداد درجات آزادی مستقل مورد نیاز در حرکات مختلف استخراج شده است و سعی شده است مکانیزمی طراحی شود که بتواند در کلیه‌ی عمل‌های جراحی لاپاروسکوپی مورد استفاده قرار گیرد.

این ربات بایستی با داشتن درجات آزادی و مکانیزم مناسب بتواند فضای کاری مورد نیاز برای عمل لاپاروسکوپی را تحت پوشش قرار دهد و علاوه بر آن بتواند از مسیرهای مناسب (طبق تشخیص جراح) به نقطه‌ی مورد نظر دسترسی پیدا کرده و حرکات‌های مورد نیاز را انجام دهد. همچنین باید به گونه‌ای طراحی شود که در حین عمل و انجام حرکات به بافت‌های مجاور نیروی ناچیزی را وارد کرده و بعد از ورود به داخل شکم دارای سه درجه آزادی (نفوذ به عمق و دوران حول دو محور قائم و افقی عمود بر امتداد خود لاپاروسکوپ گذرنده از محل ورود لاپاروسکوپ به داخل شکم) باشد. به منظور جلوگیری از بزرگ شدن شکاف، دو درجه‌ی آزادی لاپاروسکوپ که حرکت در صفحه‌ی شکاف ایجاد شده می‌باشد، بایستی مقید شود.

هدف نهایی این پروژه ساخت نمونه‌ی واقعی ربات طراحی شده طی این پایان نامه می‌باشد به طوریکه بتواند در اطاق عمل ایفای نقش نماید.

۱-۴. مروری بر فصل‌های پایان نامه

روند کلی پیگیری شده در این پروژه، استفاده از یک خط مشی برنامه ریزی شده طبق روش ارائه شده در مرجع [7] به منظور انجام یک فرایند طراحی مهندسی از ابتدا تا انتها بوده و سعی شده است با این روش مناسب ترین مکانیزم برای اهداف یاد شده طراحی شود.

در فصل اول این پایان نامه به عنوان مقدمه، جراحی با حداقل آسیب و به تبع آن جراحی لاپاروسکوپی معرفی شده و شیوه‌ی انجام این نوع عمل‌ها به اختصار بیان گشته است. سپس در بخش جایگاه و اهمیت پروژه، نیاز جامعه‌ی جراحی به یک ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی مورد بررسی قرار گرفته و نظر جراحان متخصص لاپاروسکوپی نسبت به چنین سیستمی بیان شده است. در نهایت اهداف این پروژه بیان شده است.

در فصل دوم مرور کلی بر جراحی رباتیک انجام شده است. در این فصل پس از یک مقدمه‌ی کوتاه توانایی‌ها و محدودیت‌های انسان جراح با ربات جراح مقایسه شده و علل استفاده از ربات‌ها در جراحی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس اصول کلی طراحی ربات‌های جراح بیان شده و واسطه‌های مابین جراح و ربات مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در

نهایت مروری بر سیستم‌های جراحی رباتیک موجود انجام شده و این سیستم‌ها در دو حیطه‌ی سیستم‌های رباتیکی به منظور افزایش قابلیت‌های جراح و سیستم‌های رباتیکی دستیار جراح مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در فصل سوم تحت عنوان مروری بر مکانیزم‌های موجود، مکانیزم‌های طراحی شده به منظور هدایت و نگهداری لاپاروسکوپ در سه حیطه‌ی تجاری، تحقیقاتی و ثبت اختراع مورد معرفی و بررسی دقیق قرار گرفته و سعی شده‌است مزایا و معایب هر یک دقیقاً استخراج شود. این کار به منظور آشنایی با مشکلات و محدودیت‌های موجود صورت گرفته و هدف این بوده که با شناسایی این موارد در ادامه‌ی پروژه مکانیزمی طراحی شود که ضمن برطرف کردن مشکلات مکانیزم‌های قبلی مزایای آنها را نیز به دنبال داشته باشد.

در فصل چهارم تحت عنوان طراحی مکانیزم ربات، در اولین گام مساله‌ی طراحی و نیازهای کاربری تعریف شده‌است. در این بخش شناسایی نیازهای کاربری و مشخصات فنی مورد نیاز به سه روش جمع آوری اطلاعات از منابع علمی، بازدید از جراحی‌های لاپاروسکوپی مختلف در اطاق عمل و مشاوره با جراحان متخصص لاپاروسکوپی انجام شده‌است. سپس قبل از طراحی مکانیزم ربات، ابتدا به عنوان نتیجه‌ای از فصل قبل مکانیزم‌های موجود مورد ارزیابی قرار گرفته اند و مزایا و معایب اصلی آنها خاطر نشان شده‌اند. سپس وارد مساله‌ی طراحی مکانیزم شده و با در نظر گرفتن نیازهای کاربری و مشخصات فنی استخراج شده در مرحله‌ی قبلی، مکانیزم‌هایی به این منظور طراحی شده‌اند. سپس این مکانیزم‌ها در نرم افزار vNASTRAN مورد شبیه سازی حرکتی قرار گرفته و توانایی آنها در انجام حرکات مورد نیاز تایید شده است. در نهایت با بررسی مزایا و معایب مکانیزم‌های طراحی شده، مناسب‌ترین مکانیزم به عنوان مکانیزم نهایی برای ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی انتخاب شده است. در نهایت طراحی ابعاد کلی مکانیزم مورد توجه قرار گرفته است.

در فصل پنجم تحت عنوان تحلیل سینماتیکی - دینامیکی و معیارهای کمی فضای کاری، ابتدا مساله‌ی سینماتیک مستقیم و وارون ربات حل شده و فضای کاری آن مورد بررسی قرار گرفته است. سپس معیارهای کمی مشخصات فضای کاری معرفی و اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از آن ارائه شده است. در بخش بعدی روابط مربوط به ماتریس ژاکوبین، سرعت‌ها و نیروهای استاتیکی استخراج شده و در بخش بعد نیز روابط مربوط به گشتاورها و نیروهای به وجود آمده در هر مفصل در حالت دینامیکی استخراج شده‌است.

در فصل ششم تحت عنوان تولید مسیر، فرایند تولید مسیر در مکانیزم انتخاب شده برای ربات، معرفی شده و طی ارائه‌ی رابطه‌ی مربوط به موقعیت هر مفصل در اجرای یک دستور مشخص، به منظور تایید این روابط، شبیه سازی کاملی

از مکانیزم ربات در پیمایش مسیرهای کروی- شعاعی در نرم افزارهای MATLAB و vNASTRAN انجام شده است. از آنجا که در این شبیه سازی ها از روابط استخراج شده برای موقعیت هر مفصل استفاده شده است، نتایج مطلوب حاصل از شبیه سازی، صحت روابط را تضمین می نماید.

در فصل هفتم تحت عنوان انتخاب اجزاء و طراحی تفصیلی ضمن معرفی روش ساخت ربات به معرفی قطعات اصلی انتخاب شده به عنوان عملگرهای ربات پرداخته شده و به عنوان طراحی تفصیلی ربات نقشه های اجزاء و ساختمان ربات و مشخصات فنی مدول های مورد استفاده، در بخش ضمایم ارائه شده است.

در فصل هشتم تحت عنوان نتایج، نوآوری ها و برنامه های آتی مروری کلی بر محتوای پایان نامه و نتیجه ی اصلی آن و همچنین نوآوری های طرح و برنامه های آتی پروژه شده است.

فصل دوم

جراحی رباتیک

۲-۱. مقدمه

در سال‌های اخیر پژوهش‌های بسیاری در زمینه بکارگیری ربات‌ها در جراحی انجام شده‌اند و با موفقیت‌های کسب شده هم اکنون تعدادی از سیستم‌های رباتیکی مجوزهای لازم را برای کاربرد کلینیکی را به‌دست آورده‌اند. عواملی چون دقت و کارایی بیشتر در عملهای جراحی با حداقل آسیب، برش، سوراخ کردن و ... مهمترین دلایل گسترش سریع تقاضاها در زمینه کاربرد رباتهای جراح محسوب می‌شوند. عملکرد انسانی در عمل جراحی شامل محدودیتهای متعددی است که از جمله می‌توان به اندازه ناحیه‌ی عمل حداقل ۱۰۰ میکرون، افزایش لرزش بر اثر خستگی و قدرت تشخیص حرکت حداکثر ۲۰۰ Hz اشاره کرد. رباتها می‌توانند با گسترش ناحیه‌ی عمل تا کمتر از ۱۰ میکرون، فیلتر لرزشها و پیگیری یا حذف حرکت، کمکهای موثری برای رفع این محدودیت‌ها ارائه کنند. روشهای جراحی با حداقل آسیب با استفاده از رباتهای کنترل از راه دور به جراح اجازه می‌دهند که کلیه عملیات جراحی را بدون نیاز به برش‌های بزرگ انجام دهد.

۲-۲. چرا جراحی رباتیک؟

نکته‌ای که باید به آن توجه کرد آن است که تا به حال هیچ ربات جراحی که بتواند به تنهایی و بدون دخالت جراح عمل جراحی را انجام دهد ساخته نشده و منظور از ربات‌های جراح ربات‌هایی است که قادرند تحت نظارت و فرمان مستقیم جراح، عمل جراحی را انجام دهند. اکثر این ربات‌ها قادرند حرکات جراح را کپی کرده و با حذف لرزش‌ها و خطاها اعمال جراحی را با دقت و کیفیت بالایی انجام دهند. برخی از ربات‌های جراحی نیز در واقع کمک جراح بوده و قادرند در برخی از اعمال مثل نگهداری دوربین جراحی و ایجاد تصویر مناسب برای جراح به وی کمک کنند. در واقع انسان و ربات جراح هر دو توانایی‌ها و محدودیت‌هایی دارند که با شناخت آن‌ها می‌توان از هر یک در جای مناسب خود

استفاده کرد و با ترکیب فعالیت آنها در موارد مناسب از توانایی‌ها و مزایای هردو استفاده کرده و بر محدودیت‌ها فائق آمد.

در جدول (۱-۲) توانایی‌ها و محدودیت‌های انسان و ربات در کاربردهای جراحی با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۱-۲. مقایسه‌ی توانایی‌ها و محدودیت‌های انسان و ربات در کاربردهای جراحی

توانایی‌ها	محدودیت‌ها
انسان جراح رای و تشخیص بسیار خوب هماهنگی چشم و دست عالی مهارت بسیار خوب (در مقیاس‌های طبیعی انسانی) توانایی یکپارچه سازی و عمل بر اساس منابع اطلاعاتی مختلف رفتار ساده دارای استعداد و توانایی‌های بالبداهه	خستگی پذیر و امکان کم دقتی وجود لرزش در حرکات ظریف محدودیت در توانایی دستی و مهارت در خارج از مقیاس‌های طبیعی مجری نهایی بزرگ (دست) دقت هندسی محدود سختی استریلیزاسیون تاثیر پذیر از امواج رادیو اکتیو و عوامل عفونی
ربات جراح دقت هندسی بسیار عالی خستگی ناپذیر و پایدار مقاوم در برابر تشعشعات زیان آور قابل طراحی برای عملکرد در مقیاس‌های متفاوت و بارهای مختلف توانایی یکپارچه سازی اطلاعات از منابع مختلف عددی و داده های جمع آوری شده	رای و تشخیص ضعیف مشکل در انطباق با شرایط جدید مهارت محدود هماهنگی چشم و دست محدود توانایی محدود در یکپارچه سازی و تفسیر اطلاعات پیچیده

۲-۳. اصول طراحی ربات‌های جراح

اجزای اصلی سیستم‌های جراحی رباتیک شبیه به سایر سیستم‌های رباتیکی می‌باشد که عبارتند از: یک کنترل

کننده‌ی اصلی، بازوهای مکانیکی ماهر، عملگرهای انتهایی، واسطه‌های ارتباطی و غیره. همچنین بسیاری از مباحث

طراحی ربات‌های جراح با ربات‌های صنعتی مشابه است ولی تفاوت اصلی در این بین آن است که در ربات‌های صنعتی

عمدتاً هدف عملکرد خودکار ربات و بدون دخالت انسان است ولی در ربات‌های جراح تاکید اصلی بر فرمان پذیری و یا

عملکرد مشترک ربات با جراح است.

مهمترین پارامتر در طراحی ربات‌های جراح ایمنی می‌باشد که در هر مرحله از طراحی بایستی مورد توجه خاص قرار گیرد. به این منظور هر یک از اجزاء نرم افزاری و سخت افزاری ربات باید در هر مرحله، از طراحی گرفته تا ساخت، اجرا و نصب در اطاق عمل، مورد ارزیابی دقیق قرار گیرند. بررسی استحکام و پایداری ربات در حالت‌ها و عملکردهای بحرانی از جمله تست‌های ضروری می‌باشد.

استریلیزه بودن نیز یکی از فاکتورهای بسیار مهم در ربات‌های جراح می‌باشد که بایستی حتماً رعایت شود. معمولاً تنه‌ی ربات و اجزاء آن به وسیله‌ی پاکت‌های پلاستیکی و استریل پوشانده شده و مجری نهایی و ابزار جراحی نیز به گونه‌ای طراحی می‌شود که قابل استریلیزه کردن باشند. روش متداول استریلیزاسیون در دستگاه اتوکلاو می‌تواند به سنسورها و اجزاء الکترومکانیکی مجری نهایی آسیب برساند، به همین دلیل معمولاً استفاده از سایر روش‌های استریلیزاسیون، مثل استفاده از گاز یا مایع استریل ترجیح داده می‌شود.

در طراحی بازوی مکانیکی ماهر برای استفاده در اعمال جراحی باید به ایمنی حرکتی ربات نیز توجه شود، به طوریکه مجری نهایی دارای ماکزیمم سرعت محدودی بوده و دارای حرکات تند و خشن نباشد. از طرفی باید محدوده‌ی کاری ربات به گونه‌ای در نظر گرفته شود که به نقاط تکین نزدیک نشده و سرعت و نیروی اعمالی توسط مجری نهایی همواره قابل کنترل باشد. به منظور ایجاد دقت اندازه‌گیری و حرکتی بالا در ربات‌های جراح بایستی از سنسورهای موقعیت سنج با ریزنگری بالا استفاده شود. همچنین برای کاهش ماکزیمم سرعت مجری نهایی بایستی از گیربکس‌هایی با نسبت کاهش‌ی بالا استفاده گردد.

در بسیاری از کاربردهای جراحی مثل لاپاروسکوپی یا نورواندوسکوپی بایستی ابزار از طریق یک سوراخ باریک وارد بدن بیمار شود. وجود این قید منجر به طراحی دو دسته‌ی خاص از ربات‌های جراح شده است. دسته اول ربات‌هایی هستند که قادرند ابزار را حول نقطه‌ی مرکزی سوراخ ایجاد شده روی بدن بیمار حرکت دهند و از تغییر موقعیت مکانی نقطه‌ی یاد شده جلوگیری کنند [8-10] دسته‌ی دوم ربات‌هایی هستند که با دارا بودن دو مفصل دورانی غیر فعال در مفاصل انتهایی خود به ابزار اجازه می‌دهند جهت‌گیری خود را با موقعیت سوراخ وفق داده و سازگار کند [11,12]. هر دو مکانیزم یاد شده دارای ویژگی‌های مناسبی بوده و می‌توانند به طور مناسب و نتیجه بخشی با هم ترکیب شوند [13]. ربات‌های دسته‌ی اول دقت و پایداری بیشتری دارند و دسته‌ی دوم نیز از ویژگی سادگی و انطباق خود به خودی ابزار با

بدن بیمار برخورد دارند.

از آنجا که ربات‌های جراح اغلب همزمان با فرایند تصویربرداری پزشکی کار می‌کنند، بایستی به ماده‌ی تشکیل دهنده‌ی ساختار اصلی آنها نیز توجه شود، به گونه‌ای که در صورت نیاز اشعه‌های تصویربرداری بتوانند از آنها یا حداقل بخش‌های نزدیک به بدن بیمار عبور کرده و در فرایند تصویربرداری خللی وارد نشود [14,15]. در شکل (۱-۲) رباتی نشان داده شده که با داشتن مجری نهایی از جنس مناسب می‌تواند در عمل استخراج سنگ کلیه همراه با تصویر برداری مفید واقع شود.



شکل ۱-۲. ربات RCM دارای مجری نهایی نامرئی در امواج تصویربرداری حین عمل جراحی استخراج سنگ کلیه [9]

به دلیل وجود میدان‌های مغناطیس قوی و امواج رادیویی (RF) در سیستم‌های تصویربرداری MRI، توسعه‌ی ربات‌هایی که بتوانند همزمان با این تجهیزات به عملکرد خویش پردازند، بحث جدیدی را مطرح کرده است [15,16].

۲-۴. واسطه‌های مابین جراح و ربات

سیستم‌ها و تجهیزات کامپیوتری برای اینکه بتوانند به طور مشترک با انسان همکاری نمایند، بایستی قادر باشند به منظور تبادل اطلاعات و دریافت فرمان‌ها و راهنمایی‌ها با یکدیگر ارتباط برقرار کنند.

واسطه‌های مابین انسان و ماشین (HMI)^۱ همان‌طور که در سایر صنایع مطرح می‌باشند، در بحث رابطه‌ی بین جراح و ربات جراح نیز کاربرد پیدا کرده‌اند و فناوری‌هایی از قبیل ارتباط صوتی^۲، تصویری و گرافیکی^۳، لامسه‌ای^۴ و غیره را شامل می‌شوند که البته در سایر صنایع نیز مشاهده می‌گردند. در بیشتر موارد، زیرسیستم‌هایی از HMI که به منظور استفاده در سایر صنایع طراحی شده‌اند با اندکی تغییرات در سیستم‌های جراحی نیز قابل استفاده اند، که البته در این بین بایستی به شرایط خاص و نیازهای ویژه‌ی موجود در محیط جراحی نیز توجه شود [17].

یکی دیگر از واسطه‌های مابین انسان و ماشین تصاویر ویدئویی هستند. یکی از محدودیت‌های عمده در این سیستم‌ها ریزنگری و قدرت تفکیک پایین در تصویر است، این موضوع به ویژه در جراحی‌های در ابعاد میکرو و یا در کاربردهایی که نیاز به تفکیک پذیری رنگی بالایی دارد، خودنمایی می‌کند.

کلیه‌ی واسطه‌های متداول در ارتباط انسان با کامپیوتر مانند موش‌واره، جوی استیک، صفحات لمسی، کلیدهای فشاری، پدال‌ها و کلیدهای پای و غیره می‌توانند به عنوان واسطه‌ای بین جراح و کامپیوتر استفاده شوند. برای طراحی فرایند عمل جراحی در کامپیوتر پیش از انجام آن، جراح می‌تواند از کلیه‌ی واسطه‌های متداول یاد شده استفاده کند ولی برای اجرا و انجام عمل جراحی روی بیمار، این واسطه‌ها بایستی دارای مشخصاتی از قبیل استریلیزه بودن، ایمنی الکتریکی و ملاحظات ارگونومیکی باشند.

فیدبک‌های نیرویی و لامسه‌ای از عمل جراحی حین انجام آن با واسطه‌ی ربات و یا در حین شبیه سازی عمل جراحی توسط کامپیوتر نیز از نیازها و علایق اصلی جراحان در جراحی رباتیک و جراحی از راه دور می‌باشد. این واسطه‌ها نیز شبیه واسطه‌های موجود در سایر سیستم‌های رباتیکی در صنعت می‌باشند با این تفاوت که بایستی دارای ویژگی‌هایی از قبیل استریلیزه بودن و ایمنی الکتریکی باشند.

۲-۵. مروری بر سیستم‌های جراحی رباتیک

۲-۵-۱. سیستم‌های رباتیکی به منظور افزایش قابلیت‌های جراح

تاکید اصلی بر استفاده از ربات جراح در جراحی افزایش قابلیت‌های جراح و راندمان جراحی می‌باشد. این‌گونه

¹ Human - Machine Interfaces (HMI)

² Speech

³ Computer vision and graphics

⁴ Haptics

سیستم‌ها که در واقع به صورت ماستر-اسلیو^۱ و تحت فرمان و کنترل خود جراح عمل می‌کنند امروزه تحت عنوان تله سرجری^۲ یا جراحی از راه دور شناخته می‌شوند [18, 19, 20, 21- 25] به گونه‌ایکه جراح با قرارگرفتن در کنسول جراحی و با استفاده از ابزار فرمان دهنده به ربات و با نگاه در محیط مجازی فرایند عمل جراحی را به ربات فرمان داده و ربات این اعمال را در محل بدن بیمار و در محیط واقعی با ویژگی‌هایی از قبیل دقت و عدم لرزش و خستگی اجرا می‌کند. به گزارش FDA دو سیستم رباتیک جراحی تا کنون توانسته‌اند گواهینامه FDA برای ورود به بازار ایالات متحده را کسب نمایند [6]: یکی سیستم جراحی داوینچی^۳ ساخت شرکت Intuitive Surgical و دیگری سیستم جراحی رباتیک ژئوس ساخت شرکت Computer motion که در زیر به معرفی این دو سیستم می‌پردازیم:

سیستم جراحی داوینچی

سیستم جراحی داوینچی از رباتهای پیشرو در جراحی قلب محسوب می‌شود. سیستم مزبور شامل یک میز با صفحه فرمان جراح^۴، یک ارباب کنار بیمار^۵، تجهیزات پردازش تصویر و وسایل جراحی است و سرتاسر اتاق عمل را در بر گرفته و به تمام تیم جراحی کمک می‌کند. در شکل (۲-۲) سایت سیستم جراحی داوینچی مشاهده می‌شود.

میز جراح شامل دسته‌هایی است که حرکت جراح را کپی می‌کنند و با استفاده از سیستم بینایی و از طریق پدالهای پای کنترل می‌شوند و درک محیط را همانند آنچه در جراحی باز رخ می‌دهد به نمایش می‌گذارند. بدین ترتیب جراح در حالی که با آرامش پشت میز نشسته است و تصویری سه بعدی از محیط جراحی را مشاهده می‌کند، عمل جراحی را انجام می‌دهد. تکنولوژی داوینچی حرکات جراح را بدون خطا و به طور دقیق به حرکات واقعی ابزارهای جراحی درون بدن بیمار تبدیل می‌کند. ارباب کنار بیمار شامل دو یا سه بازوی رباتیکی و یک بازوی اندوسکوپی است که دستورات جراح را اجرا می‌کنند. بازوهای جراح دارای چهار درجه آزادی در مچ انتهایی و در محل ابزار بوده و ۸ درجه آزادی نیز در خارج از بدن بیمار دارند (کلاً ۱۲ درجه آزادی). بازوی لاپاروسکوپی نیز با ۸ درجه آزادی قادر است در یک فضای ۱ سانتی متری بچرخد و باعث کاهش آسیب‌های وارده به بافت و اعصاب شود. در شکل (۲-۳) بازوهای رباتیکی سیستم داوینچی شامل سه بازوی عمل کننده و یک بازوی نگهدارنده‌ی اندوسکوپ که هر یک بر روی یک بازوی اسکارا با چهار

¹ Master- Slave

² Telesurgery

³ da vinci

⁴ Console with Master

⁵ Patient Side-Cart

درجه‌ی آزادی نصب شده‌اند در سیستم جراحی دایونچی مشاهده می‌شود [26].



شکل ۲-۲. سایت سیستم جراحی دایونچی [26]



شکل ۲-۳. بازوهای رباتیکی سیستم جراحی دایونچی [26]

وسایل انتهایی مچی در سیستم دایونچی ، طیف وسیعی از دستگاه ها را شامل می‌شوند که با ۴ درجه آزادی طراحی

شده اند و می‌توانند مهارت‌های مچ انسان را عیناً تکرار کنند (شکل ۲-۴). هر وسیله هدف جراحی بخصوصی دارد مانند گرفتن، بخیه زدن، دستکاری بافت و.... اهرم‌های عمل‌کننده سریع، سرعت تعویض وسایل را در حین عمل جراحی افزایش می‌دهند. تجهیزات پردازش تصاویر سه بعدی اندوسکوپی با وضوح بالا، یک محیط زنده سه بعدی مجازی از واقعیت را فراهم می‌کنند. تصاویر عمل بوسیله سنکرون‌کننده های تصویر، نورپردازیهای قوی و واحد های کنترل دوربین، بهینه سازی و تصفیه می‌شوند. در شکل (۲-۵) تصویری از اندوسکوپ به کار رفته در سیستم داوینچی مشاهده میشود.



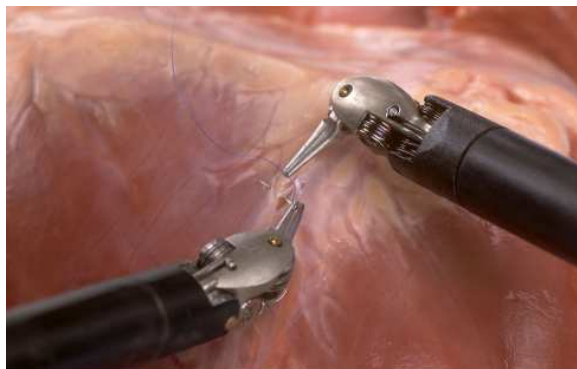
شکل ۲-۴. ابزار انتهایی مچی در سیستم جراحی رباتیک داوینچی [26]



شکل ۲-۵. اندوسکوپ به کار رفته در سیستم داوینچی [26]

در روشهای سنتی جراحی قلب برای دسترسی به قلب احتیاج به یک بریدگی ۱۲ تا ۱۸ اینچی در قفسه سینه است تا استخوان جناغ سینه باز نگهداشته شود که این امر یکی از عوامل اصلی دردهای پس از جراحی است. همچنین در حین عمل، بیمار به یک ماشین قلب وریه وصل می‌شود که بعنوان جایگزین موقت قلب عمل می‌نماید و قلب تنیده متوقف میگردد. این عملیات خطر مرگ بیمار را افزایش می‌دهد و ناراحتیهای ناشی از آن تا زمان بهبود بیش از یک ماه به طول

می انجامد. هم اکنون بجای این عملیات ، سیستم رباتیک جراحی داوینچی به ارزش یک میلیون دلار با سه بازو در جراحی حضور می یابد و جراح در پشت کامپیوتر در گوشه ای از اتاق عمل نشسته قلب بیمار را از درون دوربین کوچکی که از سوراخی به اندازه یک مداد وارد شده مشاهده میکند. دوربین یا لاپاروسکوپ وارد شده به وسیله اهرم های دستی و پدال های پایی کنترل می شود . دو بریدگی دیگر در بدن بیمار امکان وارد شدن وسایل جراحی را فراهم می کنند که برای دسترسی به رگهای کوچک خونی و بریدن و دوباره به هم دوختن آنها بکار می روند. جراح دو دسته مشابه (همانند دسته های بازیهای کامپیوتری) را با مهارت هدایت می کند و همتای واقعی آنها درون بدن بیمار حرکت هایی را که جراح ایجاد می کند تکرار می نمایند (شکل ۲-۶). از آنجا که تصویر محدوده ی جراحی بزرگ نمایی شده است، هنگامی که جراح چاقوی مجازی خود را حرکت می دهد، ابزارهای جراحی تنها یک سوم از مسافت پیموده شده توسط دست جراح را کپی می کنند. سیستم داوینچی قیمتی معادل یک میلیون دلار دارد و در حال حاضر تنها سیستم جراحی رباتیک تجاری دنیا می باشد. طبق آمار تا سال ۲۰۰۲ بیش از ۵۰ سیستم از آن در مراکز پزشکی آمریکا ، ۳۴ واحد در اروپا و ۵ واحد در آسیا به کار گرفته شده اند [6].



شکل ۲-۶ . ابزار انتهایی مچی با فرمان گیری از مسترهای در دست جراح حرکات جراح را کپی می کنند [26]

سیستم جراحی زئوس

سیستم جراحی رباتیک زئوس یکی دیگر از ربات‌های جراحی اندوسکوپی مورد استفاده در عملهای جراحی قلب است. این سیستم دارای سه بازوی مکانیکی ماهر است که دو عدد از آنها به عنوان دودست جراح عمل کرده و با اهرمهای دستی و پدال‌های پایی کنترل می‌شوند و سومی به عنوان بازوی نگهدارنده دوربین یا لاپاروسکوپ عمل می‌کند و ایساپ^۱ نام دارد و با دستورات ساده صوتی کنترل می‌شود: "حرکت کن، بایست، عقب، راست، چپ، ایست". در شکل (۲-۷) سایت جراحی رباتیک زئوس شامل کنسول هدایت بازوها و سه بازوی رباتیکی این سیستم را مشاهده می‌نمایید [27].



شکل ۲-۷. سایت جراحی رباتیک زئوس [27]

استفاده از مچ‌های کوچک در بازوهای جراح این سیستم سبب می‌شود که مهارت جراح در شرایط جراحی باز بطور کامل به محیط MIS منتقل شود. دسته‌های منطبق با شکل اصلی ابزارها یک مواجهه طبیعی و بسیار حساس را برای جراح فراهم می‌کنند. حرکات دست جراح توسط زئوس ترجمه می‌شوند و سپس بصورت دقیق و با مقیاس مناسب به حرکات

¹ Automated Endoscopic System for Optimal Positioning (AESOP)

بسیار ظریف در محدوده عمل تبدیل می‌گردند. این سیستم که دارای قابلیت استفاده در هر دو روش قلب متوقف و قلب تپنده است، مزایایی نظیر بریدگی کوچک در حدود قطر یک مداد، کاهش قابل ملاحظه درد و شوک بیمار، مشاهده بهینه در میدانهای ۲ بعدی یا ۳ بعدی، کاهش دوره نقاهت و اقامت در بیمارستان، و کاهش خستگی جراح با محیط عمل مناسب با ویژگیهای انسانی را در اختیار قرار می‌دهد. سیستم ربات جراح زئوس در زمان تولید قیمتی معادل ۹۷۵۰۰۰ دلار داشته و از سال ۲۰۰۳ به بعد با منحل شدن شرکت Computer Motion تولید آن متوقف شده است. شایان ذکر است تا سال ۲۰۰۲ بیش از ۳۰ واحد زئوس در آمریکای شمالی، ۱۵ واحد در اروپا و خاور میانه و ۵ واحد از آن در آسیا به کار گرفته شده بود [6].

۲-۵-۲. سیستم‌های رباتیکی دستیار جراح

ربات ایساپ

امروزه در دنیا استفاده از ربات‌های دستیار جراح یا کمک جراح به منظور انجام کارهای متداول و روتین در جراحی مثل نگهداری و حرکت دادن دوربین در اعمال جراحی لاپاروسکوپی بسیار متداول شده است. یک نمونه از این ربات‌های جراح که با وجود دارا بودن معایب زیادی به دلیل اولین و تنهاترین نمونه‌ی موجود در بازار با استقبال زیادی از طرف جراحان روبرو شد و از سال ۱۹۹۵ تا سال ۱۹۹۹ بیش از ۸۰۰۰۰ عمل جراحی MIS با استفاده از این ربات به عنوان نگهدارنده اندوسکوپ در سراسر جهان انجام شده است، ربات ایساپ می‌باشد. این ربات به عنوان بخشی از سیستم زئوس یک نگهدارنده دوربین یا لاپاروسکوپ مستقل می‌باشد که به تنهایی و خارج از سیستم جراحی رباتیک زئوس نیز قابل استفاده است. این ربات دارای یک بازوی مکانیکی ۳ درجه آزادی است که یک بخش انتهایی با ۳ درجه آزادی (دو تا غیر فعال و یکی فعال) به آن اضافه می‌شود (کلاً ۶ درجه آزادی) و بر روی یک میز متحرک نصب شده است. دو درجه آزادی غیر فعال باعث هماهنگی لاپاروسکوپ با سوراخ ایجاد شده در بدن بیمار شده و درجه آزادی فعال می‌تواند لاپاروسکوپ را حول محور طولی خود بچرخاند. در شکل (۲-۸) ربات ایساپ ۳۰۰۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۸. ایساپ ۳۰۰۰ [27]

در شکل (۲-۹) نیز نمایی دیگر از ربات ایساپ در حین عمل جراحی MIS مشاهده می‌شود. این ربات در زمان تولید به تنهایی قیمتی حدود ۹۰۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰ دلار در بازارهای مختلف داشته است.



شکل ۲-۹. ربات ایساپ به عنوان نگهدارنده لاپاروسکوپ در جراحی MIS [27]

ربات مسیریاب

رباتهای جراحی اندوسکوپی در عملهای جراحی مغز و اعصاب نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. از تکنولوژی ربات هم اکنون برای نشانه گرفتن آندوسکوپ‌ها در جراحی‌ها با آسیب ناچیز و همچنین فرستادن وسایل جراحی به سمت تومورها در جراحی مغز استفاده می‌شود. در جراحی مغز و اعصاب رباتهای با راهنمای تصویری می‌توانند ضایعات مغزی را با حداقل آسیب به بافت‌های مجاور تکه برداری کنند. در بعضی از روش‌ها جراح دسته‌هایی به دست می‌گیرد که به جراح فیدبکی از نیروهای وارد شده به ربات در محل جراحی می‌دهند. شرکت ARMSTRONG از پیشروان ارائه کننده ربات های هوشمند برای جراحی است که یکی از محصولات آن مسیریاب^۱ اولین ربات هوشمند دنیا در جراحی مغز و اعصاب محسوب میشود. در شکل (۲-۱۰) نمایی از این ربات مشاهده می‌شود [28].



شکل ۲-۱۰. ربات Path finder برای استفاده در جراحی های مغز و اعصاب [28]

این ربات دارای راهنمایی تصویری و یک سکوی دقیق و با دوام برای هدایت ابزار در جراحی‌های مغز و اعصاب است. استفاده از آن به سادگی امکان پذیر است و از قابلیت انطباق با تجهیزات موجود برخوردار می‌باشد. مسیریاب قادر

¹ Path finder

است با طیف وسیعی از ابزارهای ساده و پیچیده از کانولا تا راه اندازهای موتورها برای وسایل استاندارد جراحی اعصاب تطبیق یابد. از نظر تطابق با روشهای تصویر برداری، این ربات می تواند تصاویر DICOM3 استاندارد را، که فرمت خروجی اغلب اسکنرهای مدرن است، قبول کند و فرمت های تصویری قدیمی تر را اصلاح و تطبیق نماید. ربات از قابلیت انطباق با تکنیکهای جراحی و وسایل موجود برخوردار است و روی یک پایه چرخ دار قرار گرفته که می تواند در هر موقعیتی از سر بیمار قرار گیرد. ثبت اتوماتیک و منحصر به فرد تصاویر بیمار، هدایت پایدار دستگاه های حمل شونده با دست و واحد موتور دار جابجایی وسایل، از دیگر ویژگیهای این سیستم پیشرفته محسوب می شوند. در شکل (۲-۱۱) نمای دیگری از این ربات مشاهده می شود.



شکل ۲-۱۱. ربات مسیریاب در حین مسیرهی برای نفوذ به داخل جمجمه از مسیر مشخص شده ی قبلی و انجام عمل جراحی [28]

ربات نورومیت^۱

یک سیستم رباتیکی دیگر برای جراحی های مغز و اعصاب نورومیت است که دارای کنترل کامپیوتری و راهنمای تصویری است. این سیستم دارای یک ایستگاه برنامه ریزی قبل از جراحی می باشد که ابزارهای جراحی را همانگونه که در ایستگاه برنامه ریزی تصویر توسط جراح طرح ریزی شده ماهرانه در جهت و مکان مناسب قرار می دهد. سیستم در

¹ NEUROMATE

طی عمل جراحی با جراح در ارتباط است و خود را با تغییراتی که در عمل جراحی لازم به نظر می رسند تطبیق می دهد. اولین نسل نورومیت به قاب های سر که در جراحی دستی فعلی استفاده می شوند و دست و پا گیر و آزار دهنده می باشند احتیاج داشت. اما هم اکنون روشهای جراحی بدون قاب ISS به طور کامل نیاز به قاب های آزار دهنده و دست و پا گیر را حذف می کنند. در شکل (۲-۱۲) این ربات مشاهده می شود [29].



شکل ۲-۱۲. ربات Neuromate برای استفاده در عمل جراحی مغز و اعصاب [29]

مروری بر مکانیزم‌های موجود

۳-۱. مقدمه

مشخصه‌ی اصلی مکانیزمی که در عمل لاپاروسکوپی قابل استفاده باشد، آن است که بتواند لاپاروسکوپ را حول نقطه‌ی ورود به شکم حرکت داده و به این نقطه نیروی زیادی اعمال نکرده و محل آن را تغییر ندهد. این نقطه را اصطلاحاً مرکز ثابت حرکت یا مرکز حرکت می‌نامیم. به بیان دیگر در کلیه‌ی حرکات بایستی لاپاروسکوپ از این نقطه عبور کرده و طی حرکت در داخل شکم نقطه‌ی ورود به شکم را تغییر ندهد.

در این مرحله از پروژه با هدف طراحی بهترین و مناسب‌ترین مکانیزمی که بتواند با داشتن کلیه‌ی ویژگی‌های لازم به صورت خودکار این عمل را انجام دهد به بررسی مکانیزم‌های موجود پرداخته و محاسن و معایب هر یک را بررسی کرده و سعی شده است با شناخت مشکلات مکانیزم‌های موجود، این مشکلات در این پژوهش بر طرف شده و در مرحله‌ی بعدی، پس از شناخت دقیق نیازهای کاربری مکانیزمی طراحی شود که هم از نظر کیفیت عملکردی و هم از نظر اقتصادی بهینه‌تر باشد.

۳-۲. روش شناسایی و بررسی مکانیزم‌های ویژه‌ی نگهداری لاپاروسکوپ

با هدف بررسی و آشنایی با مکانیزم‌های موجود برای هدایت و نگهداری لاپاروسکوپ، طی این پژوهش، تحقیقات وسیعی در حوزه‌ی مکانیزم‌های تحقیقاتی، آزمایشگاهی، نمونه‌های تجاری و مکانیزم‌های ثبت شده در کل دنیا به عمل آمده‌است. در مرحله‌ی اول این پژوهش ابتدا نمونه‌های تجاری موجود از طریق بازدید از نمایشگاه‌های تجهیزات پزشکی و جستجو در شبکه‌ی گسترده‌ی جهانی شناسایی شده و مشخصات و توانایی‌های ربات‌ها و مکانیزم‌های موجود در بازار

به دقت بررسی شده‌اند. سپس نظر جراحان استفاده کننده از این ربات‌ها نیز بررسی شده و رضایت خاطر جراحان در استفاده از چنین سیستم‌هایی معین گشته است. سپس با مطالعه‌ی ادبیات مربوط به جراحی رباتیک و به ویژه جراحی لاپاروسکوپی با مکانیزم‌های طراحی شده به منظور هدایت و نگهداری لاپاروسکوپ و مزایا و معایب آنها آشنا شده و در نهایت مکانیزم‌های ثبت شده به عنوان اختراع در کل دنیا به منظور هدایت و نگهداری لاپاروسکوپ گردآوری شده و مورد بررسی دقیق قرار گرفته‌اند.

۳-۳. نتایج: انواع مکانیزم‌های ویژه‌ی نگهداری لاپاروسکوپ و مزایا و معایب هر یک

حاصل این تحقیقات دسته‌بندی مکانیزم‌های یاد شده در دو گروه اصلی مکانیزم‌های غیرفعال^۱ (بدون عملگر) و فعال^۲ (مجهز به عملگر) می‌باشد که هر یک از این گروه‌ها خود دارای دو نوع مکانیزم‌های مرکز حرکت ثابت و مرکز حرکت انطباق یابنده می‌باشند [30, 31]. همانطور که ذکر شد منظور از مرکز حرکت نقطه‌ای است که بایستی کلیه‌ی حرکات لاپاروسکوپ در یک مختصات کروی حول آن نقطه انجام گیرد.

به این منظور برخی از مکانیزم‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که این مرکز حرکت نقطه‌ای مشخص و ثابت در مختصات پایه‌ی مکانیزم است و در شروع عمل بایستی آن نقطه را بر نقطه‌ی ورود به شکم انطباق داد، این مکانیزم‌ها را مکانیزم‌های مرکز حرکت ثابت می‌نامیم. از جمله ویژگی‌های این مکانیزم‌ها دقت و پایداری زیاد است، به همین دلیل این مکانیزم‌ها بیشتر برای نگهداری و حرکت ابزار جراحی رباتیک که دقت در آنها بسیار مهم می‌باشد توصیه می‌شوند. محدودیت این مکانیزم‌ها نیز در عدم انطباق خود به خود با حرکاتی است که گاه جراح در حین عمل به بدن بیمار اعمال می‌کند؛ به گونه‌ای که در صورت جابجا شدن بدن بیمار نقطه‌ی ورود به بدن بایستی دوباره با مرکز حرکت ثابت ربات تطبیق داده شود.

نوع دیگر، مکانیزم‌های دارای مرکز حرکت انطباق یابنده می‌باشند، این مکانیزم‌ها با دارا بودن یک یا دو مفصل غیرفعال در انتهای بازوی خود، به لاپاروسکوپ اجازه می‌دهند از نقطه‌ی ورود به شکم به عنوان تکیه‌گاه استفاده کرده و به طور غیرفعال خود را با نقطه‌ی ورود به شکم تطبیق دهد و همواره از آن عبور کند. عملکرد این نوع مکانیزم‌ها شبیه به عملکرد انسان در نگهداری لاپاروسکوپ بوده و نیروهای کمی را به دیواره‌ی شکم اعمال می‌کنند. از جمله ویژگی‌های این نوع مکانیزم‌ها سادگی استفاده (عدم نیاز به انطباق اولیه‌ی مرکز حرکت) و تطبیق خودکار با حرکات بدن بیمار است.

^۱ Passive

^۲ Active (Actuated)

دقت این نوع مکانیزم‌ها برای نگهداری و حرکات لاپاروسکوپ قابل قبول است [32] ولی چنانچه هدف، حرکت ابزار جراحی باشد نمی‌توان از این نوع مکانیزم‌ها استفاده کرد.

در ادامه به معرفی هر گروه و مزایا و معایب هر یک پرداخته، سپس نمونه‌های تجاری، تحقیقاتی و موارد ثبت اختراع شده از هر گروه معرفی شده و مشکلات اصلی مکانیزم‌های یاد شده خاطر نشان می‌شود. از آنجا که هدف این پروژه طراحی یک ربات با مفاصل فعال می‌باشد، مکانیزم‌های غیر فعال نیز با هدف بررسی امکان فعال سازی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۳-۳-۱. مکانیزم‌های غیر فعال

از آنجا که عمل ثابت نگهداشتن لاپاروسکوپ به عنوان یک فعالیت استاتیک خستگی زیادی را به همراه دارد، مکانیزم‌های مختلفی به منظور نگهداری لاپاروسکوپ در یک موقعیت ثابت طراحی شده‌اند. عملکرد این مکانیزم‌ها به گونه‌ای است که قادرند در موقع نیاز حرکت لاپاروسکوپ در راستاهای مجاز را آزاد کرده و به جراح اجازه دهند لاپاروسکوپ را در جهت و راستای مورد نظر حرکت داده و سپس در موقعیت مطلوب ثابت کند. برخی از این مکانیزم‌ها دارای مفاصل قفل شونده بوده و برخی با استفاده از اصطکاک نسبی موجود در مفاصل، لاپاروسکوپ را در جای خود ثابت می‌کنند.

از جمله مزایای این مکانیزم‌ها سادگی، ظرافت و کوچکی و از همه مهم‌تر امکان ساخت با هزینه‌ی کم می‌باشد ولی نکته‌ی اصلی در مورد این مکانیزم‌ها عدم عملکرد خودکار بوده و در صورت استفاده از این مکانیزم‌ها جراح مجبور است ابزار جراحی را رها کرده و حرکات مورد نیاز خود را به لاپاروسکوپ اعمال کند. از طرفی برخی از این مکانیزم‌ها که دارای مفاصل قفل شونده نمی‌باشند از صلبیت و پایداری کافی برخوردار نبوده و بر اثر برخورد با دست جراح و یا عوامل دیگر تغییر حالت می‌دهند. در ادامه نمونه‌هایی از این نوع مکانیزم‌ها معرفی می‌شوند.

مکانیزم سری با مفاصل قفل شونده

این مکانیزم که ساخت شرکت Richard Wolf آلمان می‌باشد از جمله طرح‌های تجاری این شرکت بوده که هنوز رسماً وارد بازار نشده است. این محصول حدود ده هزار یورو ارزش گذاری شده است. اطلاعات ذکر شده در این بخش از طریق بازدید از نمایشگاه اولین کنگره انجمن اندویورولوژی و یورولاپاروسکوپی ایران در تاریخ ۲۲-۲۴ مهرماه ۱۳۸۳

به دست آمده است. این بازو دارای شش مفصل دورانی غیر فعال می باشد که به وسیله پنج رابط با زوایای پیچش 90° به طور سری به هم متصل می شوند. کل بازو با استفاده از یک مفصل غیرفعال خطی در راستای قائم به کناره ی تخت بیمار محکم می شود. در انتهای بازو اهرمی وجود دارد که با فشار دادن آن هر شش مفصل دورانی به طور همزمان آزاد شده و بازو کاملاً شل می شود، به این ترتیب جراح می تواند با فشار دادن این اهرم بازو را به موقعیت دلخواه برده و با رها کردن اهرم، بازو را در جای خود ثابت نگه دارد. در انتهای بازو مکانیزمی برای نگهداری لاپاروسکوپ طراحی شده که قابل جدا شدن بوده و اتوکلاو پذیر می باشد. بازو به گونه ای طراحی شده که می تواند روی خود جمع شده و در زمانی که نیازی به آن نیست حجم کمی را در کنار تخت اشغال می کند. کل بازو می تواند در یک پوشش نایلونی قرار گیرد. در شکل (۳-۱) بازوی ارائه شده در نمایشگاه یاد شده ملاحظه می شود.



شکل ۳-۱. بازوی سری با مفاصل قفل شونده ساخت شرکت Richard Wolf (نمایشگاه اولین کنگره انجمن اندوورولوژی و یورولاپاروسکوپی ایران در تاریخ ۲۲-۲۴ مهرماه ۱۳۸۳)

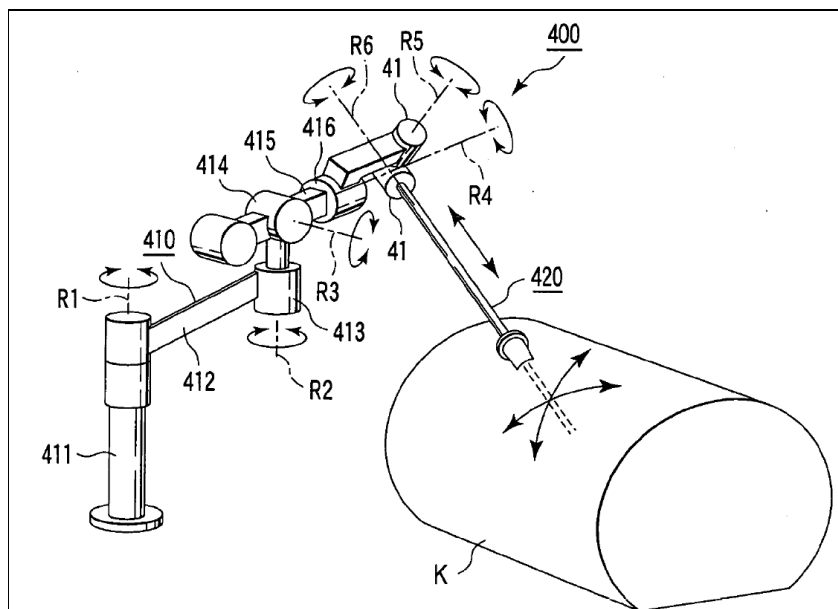
طبق بررسی های انجام شده مزایای اصلی این مکانیزم را می توان در ساده و سبک بودن، دارای مفاصل قفل شونده، حرکت روان و بدون نیاز به تنظیم تک تک مفاصل و امکان ساخت با هزینه ی پایین، خلاصه کرد. همچنین معایب این مکانیزم عبارتند از: احتمال زیاد عملکرد در مرز فضای کاری و نزدیک به نقاط تکیه، عدم حرکت یکنواخت و هموار در

کلیه‌ی جهات (عدم یکرندی^۱ در فضای کاری)، تعداد درجات آزادی زائد، امکان اعمال نیرو به محل ورود به شکم، پیچیدگی محاسبات در صورت فعال سازی مفاصل، نیاز به اصلاح زاویه‌ی قائم دید.

مکانیزم سری با مفاصل اصطکاکی

این مکانیزم که از مرجع [33] استخراج شده دارای شش درجه‌ی آزادی دورانی و یک درجه‌ی آزادی خطی در امتداد لاپاروسکوپ می باشد (شکل ۳-۲). کلیه‌ی درجات آزادی غیر فعال بوده و با استفاده از اصطکاک موجود در مفاصل قادرند لاپاروسکوپ را در جای خود ثابت نگهدارند. به دلیل استفاده از دو مفصل دورانی هم راستا و در جهت قائم در مفاصل اول و دوم ربات ($R1, R2$)، مکانیزم کاملاً بالانس بوده و می‌تواند به راحتی و بدون نیاز به قفل شدن مفاصل، در جای خود ثابت شود. زیرا تحت اثر نیروی جاذبه قرار نمی‌گیرد. مفصل سوم ($R3$) به عنوان آرنج عمل کرده و می‌تواند بازو را از حالت افقی خارج کرده و در موقعیت‌های خاص مچ بازو را به شکم بیمار نزدیک کند. این مفصل بسیار هوشمندانه تعبیه شده و از عملکرد بخش افقی و ابتدایی بازو در سطح بدن بیمار جلوگیری می‌کند. بخش انتهایی بازو که مچ ربات را شکل می‌دهد از سه مفصل دورانی متقاطع $R4, R5, R6$ تشکیل شده که طبق روش پایپر [34] امکان ارائه‌ی حل بسته برای مساله‌ی سینماتیک معکوس ربات را فراهم می‌کند. در نهایت لاپاروسکوپ از محل تقاطع سه محور انتهایی عبور کرده و از طریق راهگاه ایجاد شده روی دیواره‌ی شکم وارد شکم می‌شود. در این محل لاپاروسکوپ دارای یک درجه‌ی آزادی خطی در امتداد خود برای ایجاد بزرگنمایی مثبت و منفی می‌باشد.

در این مکانیزم، مفاصل اول تا سوم بایستی از اصطکاک نسبتاً زیادی برخوردار باشند تا بتوانند لاپاروسکوپ را در محل خود ثابت نگهدارند ولی سه مفصل دورانی انتهایی کاملاً آزاد می‌باشند مفاصل $R4, R5$ به لاپاروسکوپ اجازه می‌دهند خود را با محل ورود به شکم تطبیق داده و مفصل $R6$ به منظور اصلاح زاویه‌ی قائم دید توسط جراح تعبیه شده است. در این مکانیزم جراح بایستی به صورت دستی لاپاروسکوپ را در موقعیت مورد نظر خود قرار دهد. پایه‌ی ربات می‌تواند به کناره‌ی تخت ثابت شود. این مکانیزم در دسته‌ی مکانیزم‌های غیرفعال با مرکز حرکت انطباق یابنده قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر نیازی نیست در شروع عمل محل ورود به شکم برای مکانیزم مشخص شود.

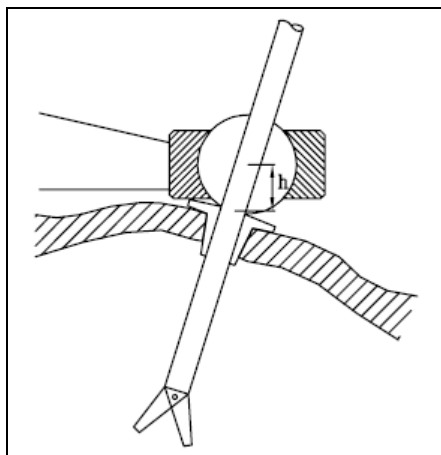


شکل ۳-۲. مکانیزم سری با مفاصل اصطکاکی [33]

طبق بررسی‌های انجام شده مزایای اصلی این مکانیزم عبارتند از: عدم عملکرد کل بازو در سطح بدن بیمار (به دلیل طراحی هوشمندانه‌ی مفصل R3)، عدم نیاز به تنظیم اولیه و انطباق خودکار کامل با محل ورود به شکم و حتی حرکات بدن بیمار، عدم محدودیت زیاد در بازه‌ی حرکتی لاپاروسکوپ. از جمله معایب این مکانیزم عملکرد بخش میچ ربات در سطح بدن بیمار و امکان برخورد با سایر ابزارهای جراحی، تعداد درجات آزادی زائد و نیاز به اصلاح زاویه‌ی قائم دید می‌باشد.

میچ با مفصل گوی و کاسه‌ای

در این مکانیزم از یک مفصل گوی و کاسه‌ای (چشمی) که به لاپاروسکوپ اجازه‌ی حرکت در امتداد خود را نیز می‌دهد استفاده شده است. این مفصل در انتهای میچ بازوی ربات نصب شده و روی محل ورود به شکم قرار می‌گیرد (شکل ۳-۳). در این رویکرد لاپاروسکوپ ابتدا از مرکز مفصل یاد شده عبور کرده و سپس وارد شکم می‌شود [35].



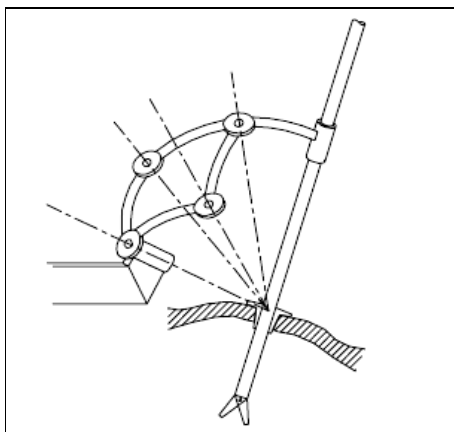
شکل ۳-۳. میچ با مفصل گوی و کاسه‌ای [35]

مزایای این مکانیزم عبارتند از: سبک و جمع و جور بودن، عدم اشغال فضای زیاد روی شکم بیمار، استفاده از حداقل تعداد قطعات متحرک، سادگی طراحی و هزینه‌ی ساخت پایین. همچنین برخی از معایب این مکانیزم عبارتند از: بازه‌ی حرکت دورانی محدود، عدم انطباق مرکز ثابت حرکت بر نقطه‌ی ورود به شکم (طبق شکل (۳-۳) نقطه‌ی ثابت حرکت در فاصله‌ی h از محل ورود به شکم قرار می‌گیرد)، اعمال نیرو و ایجاد حرکت در محل ورود به شکم، عدم قابلیت فعال سازی و نصب عملگر روی مکانیزم، نیاز به اصلاح زاویه‌ی قائم دید.

مکانیزم‌های کروی

در این نوع مکانیزم‌ها رابط‌های بین مفاصل به صورت کمان‌هایی از یک دایره با شعاع برابر و مرکزی منطبق بر نقطه‌ی ثابت حرکت بوده و با حرکت خود سطح یک کره را در محل نگهداری لاپاروسکوپ جارو می‌کنند. در این نوع مکانیزم‌ها محور کلیه‌ی مفاصل از محل نقطه‌ی ثابت حرکت عبور می‌کند که در شروع عمل بایستی این نقطه را بر محل ورود به شکم انطباق داد. این مکانیزم‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان ایجاد دو درجه آزادی دورانی حول دو محور عمود بر هم و تقاطع در محل نقطه‌ی ثابت حرکت را فراهم می‌نمایند. علاوه بر این لاپاروسکوپ می‌تواند در محل اتصال به مکانیزم در امتداد خود حرکت کرده و حول محور طولی خود نیز دوران نماید. به این ترتیب مکانیزم چهار درجه‌ی آزادی مجاز را برای لاپاروسکوپ فراهم می‌کند. علاوه بر این مکانیزم به یک پایه‌ی سه درجه آزادی به منظور انطباق اولیه‌ی مرکز ثابت حرکت با محل ورود به شکم احتیاج دارد. در این بخش سه نوع مکانیزم کروی با تعداد رابط‌های مختلف معرفی می‌شوند:

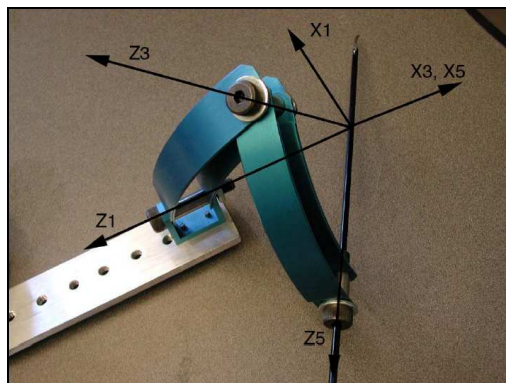
۱- مکانیزم کروی با پنج رابط کمانی: شکل (۳-۴) از مرجع [35] نمونه‌ای از این نوع مکانیزم‌ها می‌باشد. در این مکانیزم طراح با استفاده از پنج لینک کروی و چهار مفصل دورانی توانسته است امکان حرکت لاپاروسکوپ در جهات مورد نیاز را فراهم کند.



شکل ۳-۴. مکانیزم کروی با پنج رابط کمانی [35]

مزیت اصلی این مکانیزم توانایی ایجاد حرکت کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم بوده و معایب آن عبارتند از: عدم صلبیت و پایداری کافی به ویژه در نزدیکی مرزهای فضای کاری، عدم یکرندی در نزدیکی مرز فضای کاری، عدم کارایی مطلوب در صورت دقیق نبودن راستای محورها، تعداد زیاد مفاصل و رابط‌ها، بازه‌ی حرکتی محدود، نیاز به اصلاح زاویه‌ی قائم دید.

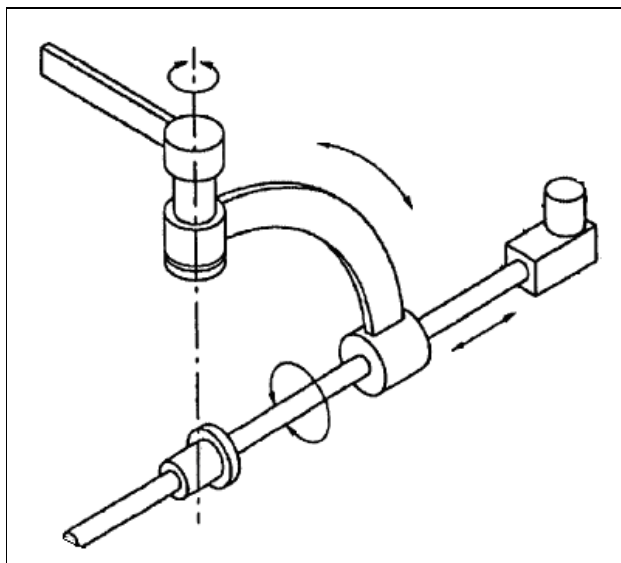
۲- مکانیزم کروی با دو رابط کمانی: در شکل (۳-۵) از مرجع [36] مکانیزم کروی دیگری با تعداد مفاصل و رابط‌های کمتری مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۵. مکانیزم کروی با دو رابط کمانی [36]

مزایای اصلی این مکانیزم عبارتند از: توانایی ایجاد حرکت کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم، تعداد مفاصل و رابط‌های کمتر. همچنین معایب این مکانیزم عبارتند از: عدم یکرندگی در نزدیکی مرز فضای کاری، عدم کارایی مطلوب در صورت دقیق نبودن راستای محورها، بازه‌ی حرکتی محدود، حجیم شدن میچ در صورت فعال سازی مکانیزم، نیاز به اصلاح زاویه‌ی قائم دید.

۳- مکانیزم کروی با یک رابط کمانی: در شکل (۳-۶) از مرجع [37] مکانیزمی که بسیار هوشمندانه و با توجه به نیاز کاربر و مشخصات فنی مورد نیاز برای حرکت لاپاروسکوپ طراحی شده است، مشاهده می‌شود. در این مکانیزم محور دورانی اول در راستای قائم بوده و بایستی در بالای نقطه‌ی ورود به شکم قرار گیرد، به این منظور مکانیزم نیاز به یک پایه‌ی سه درجه‌ی آزادی خطی دارد که بتواند میچ را در محل مناسب قرار دهد. محور دورانی دوم در صفحه‌ی افق قرار داشته و همواره بر محور اول عمود است. در نهایت درجه‌ی آزادی سوم خطی بوده و در امتداد خود لاپاروسکوپ قرار دارد. علاوه بر این برای استفاده از لنزهای زاویه دار نیز درجه‌ی آزادی دورانی دیگری حول خود لاپاروسکوپ در نظر گرفته شده است. در این مکانیزم درجات آزادی مجاز برای حرکت لاپاروسکوپ کاملاً مد نظر بوده و از اعمال درجات آزادی اضافی و مفاصل و رابط‌های اضافی پرهیز شده است. این مکانیزم از جمله مکانیزم‌هایی است که دارای نقطه‌ی ثابت حرکت بوده و در شروع عمل بایستی این نقطه بر محل ورود به شکم منطبق شود. مرکز ثابت حرکت در این مکانیزم محل تقاطع محورهای دورانی اول و دوم می‌باشد.



شکل ۳-۶. مکانیزم کروی با یک رابط کمانی [37]

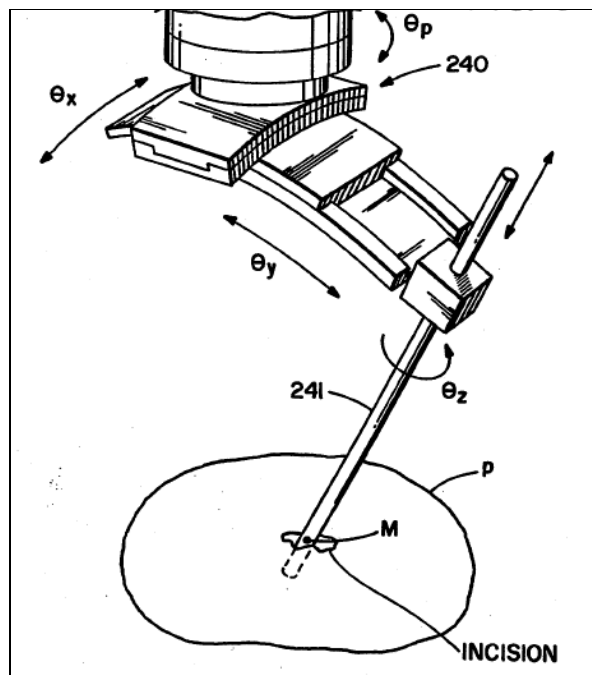
این مکانیزم مزایایی از قبیل عدم استفاده از مفاصل، رابط‌ها و درجات آزادی اضافی، طراحی دقیق و کاملاً اختصاصی برای عمل لاپاروسکوپی، توانایی ایجاد حرکت کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم و عدم اعمال نیروهای اضافی به این نقطه (دارای مرکز حرکت ثابت)، طراحی سبک و جمع و جور، هزینه‌ی ساخت پایین، دقت بالا، فضای کاری مناسب و از همه مهمتر عدم نیاز به اصلاح زاویه‌ی قائم دید را به همراه دارد. از جمله معایب این مکانیزم عبارتند از: نیاز به انطباق اولیه‌ی نقطه ثابت حرکت با محل ورود به شکم در هر سه راستای حرکتی، قرارگیری میچ ربات در نزدیکی شکم بیمار و حجیم شدن میچ در صورت فعال سازی (مجهز ساختن به عملگر) مفاصل.

۳-۲. مکانیزم‌های فعال

این مکانیزم‌ها قادرند به طور کاملاً فعال و خودکار لاپاروسکوپ را طبق فرمان جراح حرکت داده و در جای خود نگهدارند. مزیت اصلی این مکانیزم‌ها عملکرد خودکار آنها می‌باشد، به گونه‌ای که جراح می‌تواند همواره ابزار خود را در دست داشته و برای حرکت دادن لاپاروسکوپ از روش‌های فرمان دهی مختلفی چون صحبت کردن با ربات، حرکت سر یا پای خود استفاده کند. در مقابل این ربات‌ها هزینه‌ی ساخت بیشتری را نسبت به مکانیزم‌های غیر فعال در بر دارند.

مکانیزم کروی کشویی

در شکل (۷-۳) از مرجع [38] یک مکانیزم کروی کشویی که قادر است لاپاروسکوپ را به صورت فعال در یک مختصات کروی حرکت دهد، مشاهده می شود. این مکانیزم که از نوع مرکز حرکت ثابت می باشد، دارای کلگی نسبتاً بزرگی است که بالای نقطه‌ی ورود به شکم و در فاصله‌ی حدود 30 cm قرار می گیرد. محل قرار گیری کلگی بایستی به گونه‌ای باشد که اولین محور دورانی ربات از محل ورود به شکم عبور کند. بعد از این محور دورانی دو محور کشویی عمود بر هم که مطابق شکل (۳-۱۸) سطح یک کره را پوشش می دهند وجود دارد. مرکز این کره بایستی همان نقطه‌ی ورود به شکم باشد و لاپاروسکوپ هم در راستای شعاع این کره نصب می شود. در محل نصب لاپاروسکوپ در انتهای دومین مفصل کشویی دو درجه آزادی دورانی و خطی برای لاپاروسکوپ در نظر گرفته شده که امکان نفوذ به عمق و اصلاح زاویه‌ی قائم دید را فراهم می نماید. این مکانیزم دارای پنج درجه آزادی عملکردی و سه درجه آزادی خطی به منظور موقعیت دهی اولیه‌ی کلگی ربات است. کاملاً واضح است که این ربات به منظور انجام عمل لاپاروسکوپی طراحی شده ولی مکانیزم بهینه‌ای برای این منظور نمی باشد، زیرا برای ایجاد یک حرکت کروی سه درجه آزادی از پنج درجه آزادی فعال استفاده کرده و این از نظر اقتصادی بهینه نمی باشد. علاوه بر این با توجه به کروی بودن رابط‌ها و مکانیزم کشویی بکار رفته هزینه‌ی ساخت بسیار بالایی باشد.



شکل ۳-۷. مکانیزم کروی کشویی [38]

تنها مزیتی که می‌توان برای این مکانیزم در نظر گرفت عبارت است از توانایی ایجاد حرکت کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم. معایب این مکانیزم عبارتند از: استفاده از تعداد درجات آزادی، مفاصل و رابط‌های زیاد، نیاز به انطباق اولیه در هر سه راستای حرکتی، ایجاد مانع برای دید جراح، حجیم بودن و نیاز به اصلاح زاویه‌ی دید قائم.

بازوی نگهدارنده‌ی اندوسکوپ ربات داوینچی

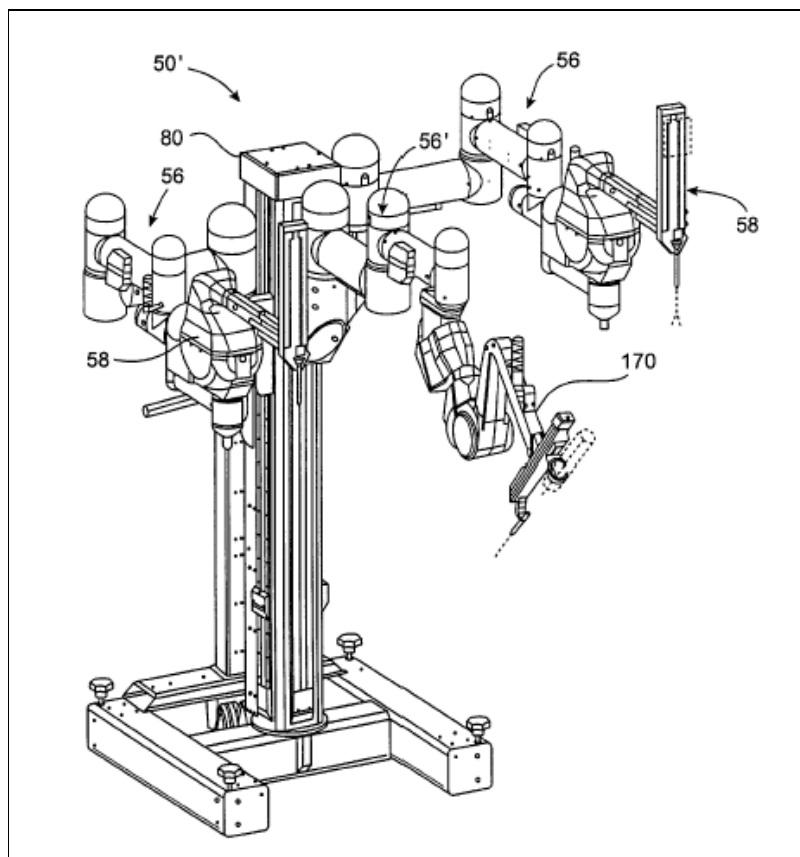
آنچه در سیستم جراحی داوینچی در حیطه‌ی توجه این پروژه قرار می‌گیرد، بازوی نگهدارنده‌ی اندوسکوپ در این سیستم است. آنچه در شکل (۳-۸) از مرجع [26] مشاهده می‌شود، تصویری از بازوی مذکور است.



شکل ۳-۸. بازوی نگهدارنده لاپاروسکوپ در سیستم جراحی داوینچی [26]

از آنجا که این ربات متعلق به ارتش آمریکا بوده مکانیزم‌های داخلی و دقیق این بازو به طور کامل منتشر نشده و در دسترس نمی‌باشد ولی آنچه از منابع [39, 40, 41] و منابعی مشابه آن قابل استخراج بوده و با توجه به شکل ظاهری بازو و محل قرار گیری موتورها می‌توان مکانیزم کلی ربات را به این ترتیب توصیف کرد: این مکانیزم از جمله مکانیزم‌های دارای مرکز حرکت ثابت می‌باشد که در شروع عمل می‌بایستی با استفاده از یک بازوی چهار درجه آزادی در موقعیت اولیه‌ی خود قرار گیرد و نقطه‌ی ثابت حرکت بر نقطه‌ی ورود به شکم منطبق شود. بازوی چهار درجه آزادی اولیه

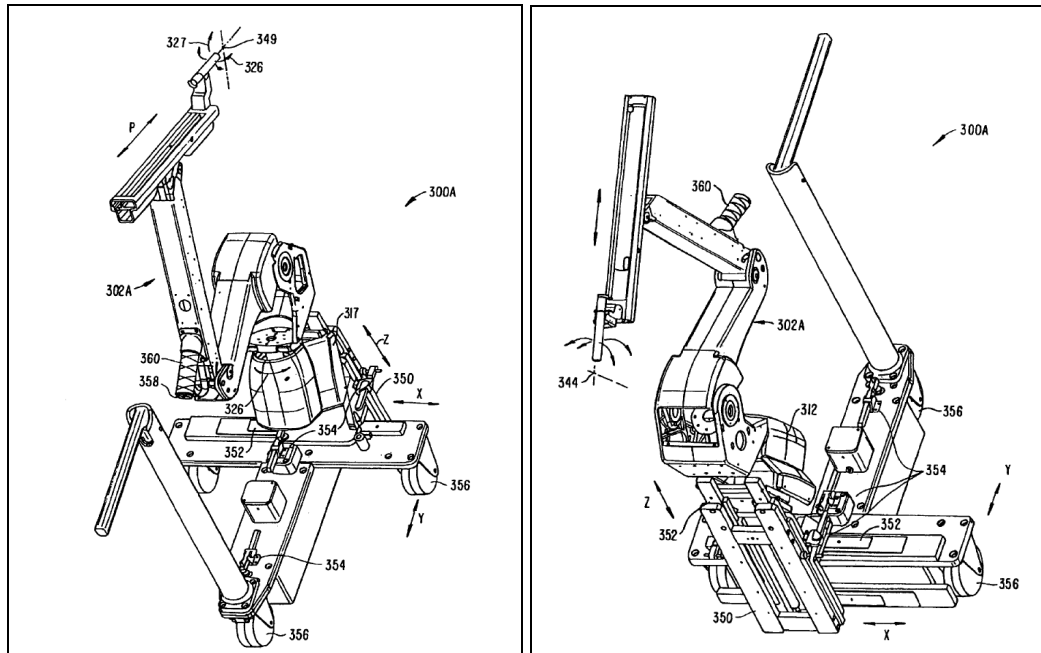
به عنوان یک موقعیت دهنده^۱ی اولیه در واقع یک بازوی اسکارا^۱ با یک درجه آزادی خطی و سه دورانی می‌باشد که می‌تواند علاوه بر موقعیت دهی در فضای سه بعدی، راستای بازوی ثانویه در صفحه‌ی افق را نیز اصلاح کند. در شکل (۳-۹)، بازوی میانی، قسمت اولیه (موقعیت دهنده) و ثانویه (مچ) بازوی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ را نشان می‌دهد. قسمت ثانویه یا مچ بازو که به وضوح در شکل (۳-۸) نشان داده شده، دارای چهار درجه آزادی می‌باشد و قادر است لاپاروسکوپ را در یک مختصات کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم حرکت دهد. اولین درجه آزادی، یک درجه آزادی دورانی است که امتداد آن از مرکز حرکت ثابت می‌گذرد. دومین درجه‌ی آزادی یک درجه آزادی دورانی، عمود بر محور مفصل قبلی می‌باشد که قادر است با یک مکانیزم خاص لاپاروسکوپ را حول نقطه‌ی ثابت حرکت بچرخاند. در انتها نیز یک درجه آزادی خطی به منظور نفوذ به عمق و یک درجه آزادی دورانی به منظور چرخش لاپاروسکوپ حول محور طولی خودش و اصلاح زاویه‌ی قائم در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۹. مکانیزم ربات داوینچی نصب شده بر روی پایه‌ی عمودی کنار تخت بیمار [39]

^۱ SCARA Robot

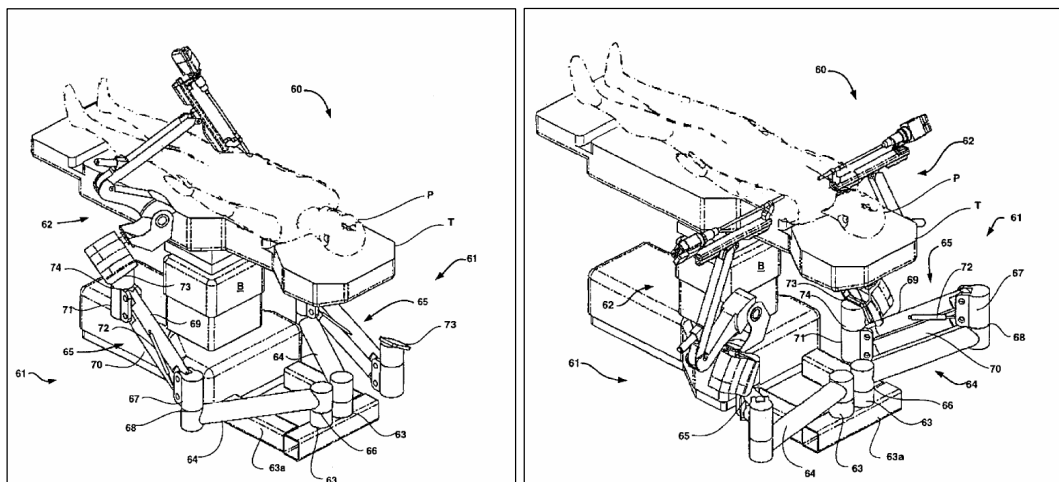
قسمت ثانویه بازوی نگهدارنده لاپاروسکوپ را می توان بجای پایهی ذکر شده، روی پایهای که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده نیز نصب کرد. این پایه بجای چهار درجه آزادی ذکر شده قبلی فقط یک درجه آزادی خطی فعال در امتداد قائم داشته و سه درجه دیگر از طریق چرخهای زیر پایهی ربات به صورت موقعیت دهی و جهت دهی در صفحهی افق تامین می شود.



شکل ۳-۱۰. نصب بازوی نگهدارندهی اندوسکوپ ربات داوینچی بر روی ارابهی چرخ دار [40]

در شکل (۳-۱۱) نیز طریقهی دیگری از نصب قسمت ثانویه ی این بازو نشان داده شده است. در این حالت بازوی ثانویه بر روی یک بازوی چهار درجه آزادی که پایهی آن زیر تخت بیمار نصب می شود قرار می گیرد. در این حالت نیز بازوی اولیه به عنوان پایهی بازوی ثانویه عمل کرده و آن را به موقعیت مناسب می رساند. این بازو دارای دو درجه آزادی دورانی در امتداد قائم است که به منظور موقعیت دهی در صفحهی افق طراحی شده و بلافاصله بعد از آن یک مکانیزم متوازی الاضلاعی^۱ که ارتفاع لازم برای بازو را بدون چرخاندن آن تامین می کند، قرار گرفته است. بعد از این مکانیزم نیز یک مفصل دورانی به منظور جهت دهی بازوی ثانویه در نظر گرفته شده که در مجموع این چهار درجهی آزادی نقطهی ثابت حرکت ربات را بر نقطهی ورود به شکم منطبق می کنند.

^۱ Parallelogram



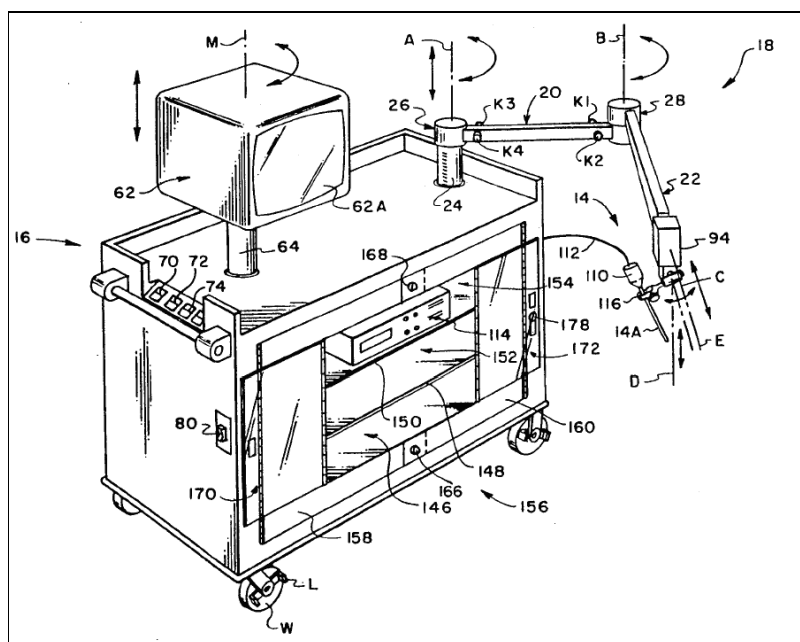
شکل ۳-۱۱. نصب بازوی نگهدارنده‌ی اندوسکوپ ربات داوینچی بر روی یک پایه‌ی چهار درجه آزادی نصب شده زیر تخت بیمار [41]

مزایای این مکانیزم عبارتند از: توانایی ایجاد حرکت کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم از راه دور و بدون داشتن هیچ مفصلی در روی سطح شکم بیمار، دقت کافی، پایداری و صلبیت بالا. معایب این مکانیزم برای استفاده در جراحی لاپاروسکوپی عبارتند از: استفاده از تعداد مفاصل، رابط‌ها و درجات آزادی زیاد برای حرکت فقط سه درجه آزادی لاپاروسکوپ، نیاز به یک درجه آزادی اضافی برای چرخش لاپاروسکوپ و اصلاح زاویه‌ی قائم دید، بزرگ و حجیم بودن و حرکت کل بازو در حجم زیادی از فضا در هنگام عملکرد مفصل دورانی اول و چرخش لاپاروسکوپ حول محور عمود بر خودش، حجیم بودن مکانیزم در انتها به دلیل وجود دو درجه آزادی انتهایی در مچ ربات (یک خطی و یک دورانی)، امکان برخورد با سایر ابزار جراحی، بازه‌ی حرکتی نسبتاً محدود و هزینه‌ی ساخت بالا.

ربات ایساپ

بازوی ایساپ که در واقع همان بازوی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ در مجموعه‌ی جراحی ژئوس می‌باشد، یک سیر تکاملی را از سال ۱۹۹۳ تا سال ۲۰۰۰ پیموده و در این مدت بیش از ۲۰ سند اختراع را در ایالات متحده به ثبت رسانده است. این ربات ساخت شرکت Computer Motion آمریکا بوده و اولین رباتی است که توانسته است گواهینامه‌ی FDA به منظور استفاده‌ی کلینیکی در اطاق عمل را کسب نماید [6]. شرکت ذکر شده در سال ۱۹۸۹ تاسیس شده و تا سال ۲۰۰۳ بیش از ۲۰۰۰ بازوی رباتیکی را برای استفاده در اطاق عمل به بازار عرضه کرده، که بیش از صد هزار عمل

جراحی با آنها انجام شده است. سر انجام در سال ۲۰۰۳ با پیوستن شرکت CM به شرکت IS این شرکت منحل شده و تولید بازوی ایساپ به عنوان معروفترین بازوی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ متوقف شده است. ربات ایساپ علی رغم محبوبیت و اعتبار جهانی از ابتدا دارای مشکلاتی بوده و با وجود برطرف شدن برخی از این مشکلات در آخرین طرح، همچنان مشکل اصلی یعنی نیاز به اصلاح زاویه‌ی قائم دید حل نشده است. این ربات با داشتن دو مفصل غیر فعال در میچ خود از جمله مکانیزم‌های دارای مرکز حرکت انطباق یابنده می‌باشد. در ادامه با معرفی و بررسی سیر تکاملی مکانیزم ایساپ، مزایا و معایب این بازو ذکر می‌شود. مکانیزم ابتدایی ربات ایساپ در سال ۱۹۹۳ مطابق آنچه در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده است می‌باشد.

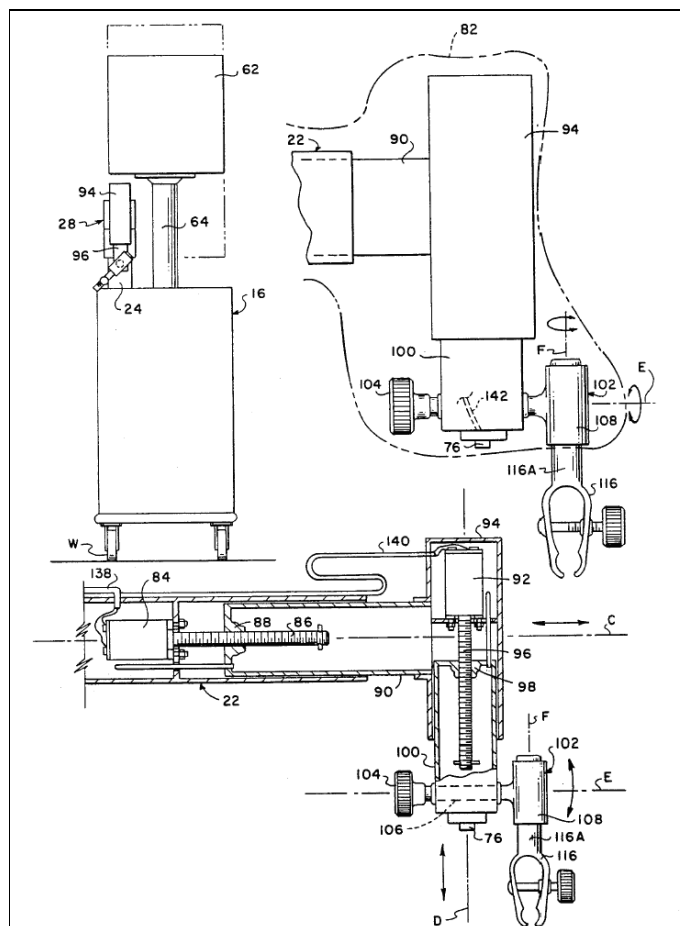


شکل ۳-۱۲. مکانیزم اولیه‌ی ربات ایساپ [42]

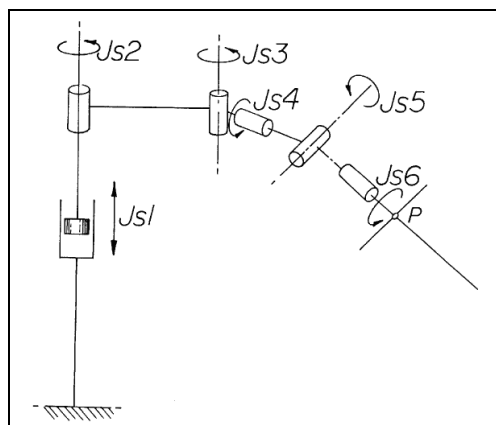
این مکانیزم به گونه‌ای است که می‌تواند بر روی یک ارابه‌ی متحرک نصب شود. بازوی اصلی دارای دو قسمت است که قسمت موقعیت دهی ابتدایی از یک بازوی شبه اسکارا با یک درجه آزادی خطی در ابتدا و دو درجه آزادی دورانی در راستای قائم تشکیل شده و می‌تواند موقعیت دهی در فضای سه بعدی را تامین کند. قسمت ثانویه‌ی بازو که وظیفه‌ی موقعیت دهی و تطبیق راستای لاپاروسکوپ با محل ورود به شکم را بر عهده دارد، مطابق شکل (۳-۱۳) از دو مفصل خطی فعال و دو مفصل دورانی غیر فعال تشکیل شده است. در این طرح دو مفصل خطی فعال به منظور موقعیت

دهی دقیق تر تعبیه شده اند و غیر ضروری می باشند، چنانچه در طرح های بعدی این دو مفصل حذف شده اند. از آنجا که دو مفصل دورانی غیر فعال میچ که وظیفه ی تطبیق راستای لاپاروسکوپ با محل ورود به شکم را دارند در نقطه ای با فاصله ی حدود 5 cm از محل گرفتن لاپاروسکوپ توسط ربات یکدیگر را قطع می کنند، لاپاروسکوپ و صفحه ی دوران آزاد در یک صفحه نبوده و هنگام حرکت دادن لاپاروسکوپ نیروهای قابل توجهی به محل ورود به شکم اعمال می شود. این مشکل در طرح های بعدی بر طرف شده [43, 44, 45] و میچ به گونه ای طراحی شده که دو محور دورانی غیر فعال یکدیگر را در محل حضور لاپاروسکوپ قطع نمایند. به این ترتیب لاپاروسکوپ و محور دورانی اول همواره در یک صفحه قرار می گیرند که کل صفحه حول محور دورانی اول و خود لاپاروسکوپ حول محور دورانی دوم می چرخد. این صفحه همواره از محل ورود به شکم می گذرد و به این ترتیب نیروی زیادی (بجز نیروهای ناشی از وزن و اصطکاک) به محل ورود به شکم اعمال نمی شود.

در شکل (۳-۱۴) از مرجع [45] نموداری شماتیک از طرح اصلاح شده ی ربات ایساپ در سال ۱۹۹۹ ارائه شده است. مفصل JS1 خطی بوده و به همراه دو مفصل دورانی JS2 و JS3 یک بازوی شبه اسکارا را تشکیل می دهد که می تواند میچ را به موقعیت مطلوب در فضای سه بعدی برسانند. در این طرح مفصل JS4 و JS5 غیرفعال بوده و یکدیگر را در محل قرارگیری لاپاروسکوپ در گیره ی بازو قطع می نمایند. علاوه بر این در این طرح دو مفصل خطی فعال و غیر ضروری طرح قبلی (در محل میچ ربات) نیز حذف شده اند. مفصل JS6 نیز وظیفه ی چرخاندن لاپاروسکوپ حول محور طولی خودش و اصلاح زاویه ی دید قائم را بر عهده دارد.



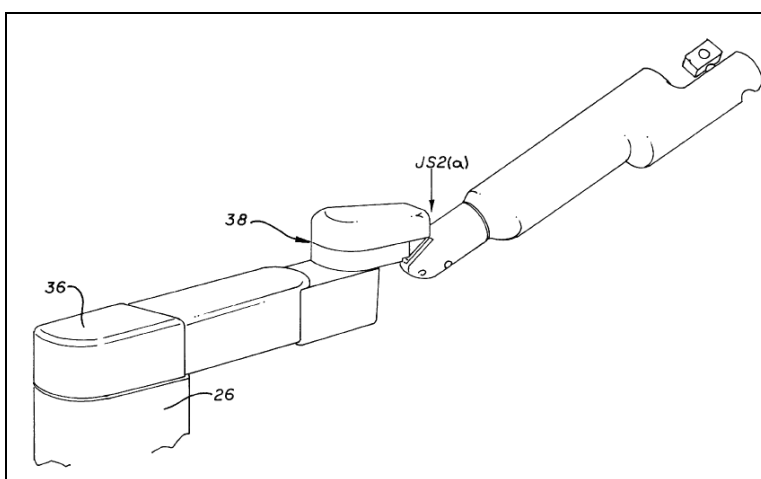
شکل ۳-۱۳. مکانیزم میچ ربات ایساپ در اولین طرح [42]



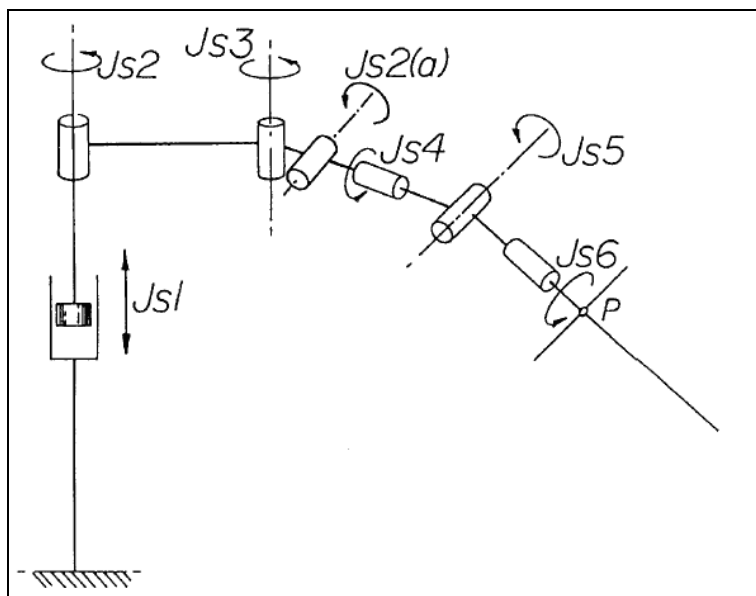
شکل ۳-۱۴. نمودار شماتیک مکانیزم ربات ایساپ در سال ۱۹۹۹ [45]

مشکل اصلی بعدی که در مکانیزم ایساپ خودنمایی می‌کند، عملکرد ربات و بازوی موقعیت دهنده‌ی اولیه‌ی آن در سطح بدن بیمار است که باعث ایجاد برخورد با سایر ابزار جراحی و دستان جراح می‌شود. این مشکل در سال ۲۰۰۰ با

اضافه شدن یک مفصل غیر فعال بین مفاصل JS3 و JS4 حل شده است. این مفصل در واقع به عنوان یک آرنج عمل کرده و با شکستن بازو آن را از صفحه‌ی افق خارج کرده و به بخش ابتدایی بازو اجازه می‌دهد در فاصله‌ی بیشتری از سطح بدن بیمار عمل نماید. این مفصل که تحت عنوان JS2a در شکل (۳-۱۵) در بازوی ربات و در شکل (۳-۱۶) به طور شماتیک نشان داده شده در ابتدای عمل تنظیم شده و تا آخر ثابت می‌ماند. شایان ذکر است زاویه‌ی اولیه‌ی این مفصل و دو مفصل غیر فعال انتهایی نیز همواره اندازه‌گیری شده و در معادلات سینماتیکی وارد می‌شوند.



شکل ۳-۱۵. بازوی ربات ایساپ شامل مفصل JS2a در سال ۲۰۰۰ [46]



شکل ۳-۱۶. طرح شماتیک بازوی ایساپ شامل مفصل JS2a [47]

به این ترتیب ربات ایساپ در آخرین مدل خود که تا سال ۲۰۰۳ تولید شد (شکل ۳-۱۷)، به مدت ده سال پر استفاده‌ترین و معروف‌ترین بازوی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ بود ولی همچنان مشکل چرخش زاویه‌ی قائم دید را به همراه داشت. در ادامه به اجمال، مزایا و معایب آخرین مدل از ربات ایساپ ارائه می‌شوند.



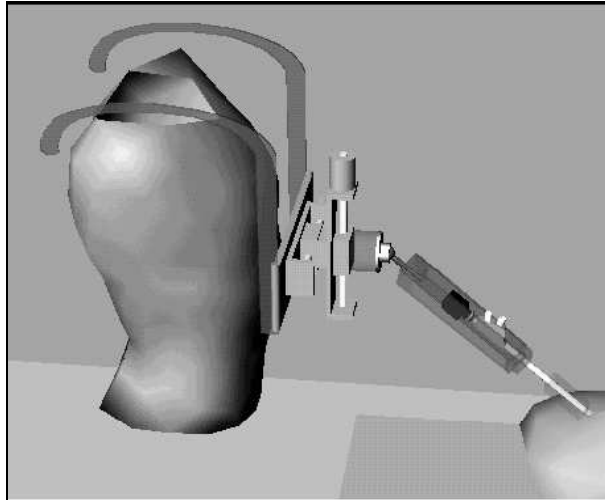
شکل ۳-۱۷. استفاده از آخرین مدل ربات ایساپ در عمل لاپاروسکوپی [48]

مزایای اصلی این مکانیزم عبارتند از: توانایی ایجاد حرکت کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم، عدم نیاز به انطباق اولیه و انطباق خودکار مکانیزم با حرکات بدن بیمار. معایب این مکانیزم عبارتند از: نیاز به اصلاح زاویه‌ی قائم دید، امکان برخورد بازو با سایر ابزار جراحی و دستان یا بدن جراح، ترس جراح از حضور بازویی با حرکاتی که پیش بینی آنها برای جراح مشکل است و جراح اطلاعی از چگونگی حرکت بازو در اجرای یک فرمان ندارد.

مکانیزم پوشیدنی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ

مکانیزمی که از مرجع [49] استخراج شده در واقع یک ربات پوشیدنی می‌باشد که از بدن جراح به عنوان پایه‌ی خود استفاده می‌نماید (شکل ۳-۱۸). این مکانیزم از جمله مکانیزم‌های دارای مرکز حرکت انطباق یابنده می‌باشد و دارای دو درجه آزادی خطی فعال روی سینه‌ی جراح است، مفصل بعدی یک مفصل گوی و کاسه‌ای غیر فعال بوده که وظیفه‌ی انطباق مرکز حرکت مکانیزم را با نقطه‌ی ورود به شکم به عهده دارد. بعد از مفصل گوی و کاسه‌ای یک مفصل فعال خطی در امتداد لاپاروسکوپ وجود دارد. به این ترتیب در این مکانیزم با استفاده از فقط سه مفصل فعال، طراح توانسته است

سه درجه آزادی مورد نیاز برای لاپاروسکوپ را فراهم کرده و از چرخش تصویر حول محور لاپاروسکوپ جلوگیری کند.



شکل ۳-۱۸. مکانیزم پوشیدنی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ [49]

مزایای این مکانیزم عبارتند از: توانایی ایجاد حرکت کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم، استفاده از حداقل تعداد درجات آزادی فعال ممکن و عدم ایجاد چرخش در تصویر. معایب این مکانیزم عبارتند از: محدودیت در بازه‌ی حرکتی، لرزش و تکان خوردن تصویر بر اثر نفس کشیدن، سرفه یا عطسه کردن، خندیدن و یا تکان خوردن جراح، خستگی مضاعف جراح هم به دلیل تحمل وزن دستگاه و هم به دلیل محدودیت در انجام حرکات ارادی و شخصی.

استفاده از ربات‌های صنعتی

در مطالعه‌ای که از مرجع [50] استخراج شده به منظور نگهداری لاپاروسکوپ از ربات صنعتی Stäubli RX60 با شش درجه آزادی کامل استفاده شده (شکل ۳-۱۹) که دو مفصل غیر فعال به انتهای میچ آن اضافه گشته است و رضایت جراح و کاهش طول عمل به اندازه‌ی سه دقیقه را به همراه داشته است



شکل ۳-۱۹. استفاده از ربات صنعتی Stäubli RX60 در جراحی لاپاروسکوپی [50]

۳-۴. نتیجه گیری: جایگاه کار حاضر نسبت به کارهای قبلی

با توجه به موارد یاد شده و نیاز شدید و استفاده زیاد جراحان از ربات‌های دستیار و کمک جراح و به ویژه نیاز جامعه‌ی پزشکی کشور به این تکنولوژی، به عنوان اولین و ضروری‌ترین گام در این زمینه دستیابی به رباتی با کاربردی شبیه به ربات ایساپ که به طور خاص برای این کاربرد طراحی شده بوده، بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در این پروژه سعی شده‌است با طراحی مکانیزمی مناسب کلیه‌ی مشکلات موجود در ربات ایساپ که منجر به انحلال کمپانی سازنده‌ی آن شده بر طرف شود و مکانیزم نهایی با ساختاری ساده و کارآمد بتواند در کلیه‌ی عمل‌های متداول لاپاروسکوپی مورد استفاده قرار گیرد

در نهایت به منظور کاهش هزینه‌های ساخت ربات سعی شده است حین برطرف شدن کلیه‌ی عیوب مکانیزم‌های موجود و دارا بودن همه‌ی توانایی‌ها و فضای کاری مورد نیاز، مکانیزمی طراحی شود که از حداقل تعداد عملگرها (یعنی دقیقاً برابر با درجات آزادی مستقل مورد نیاز) استفاده نماید و فضای کاری کاملی را پوشش دهد.

فصل چهارم

طراحی مکانیزم ربات

۴-۱. تعریف مساله‌ی طراحی و نیازهای کاربری

اولین گام در تعریف مساله‌ی طراحی شناسایی دقیق موضوع، نیازهای کاربری، ملاحظات و مشخصات فنی و نیازهای طراحی می‌باشد.

۴-۱-۱. مقدمه

با اهداف یاد شده در فصل‌های قبلی برای طراحی مکانیزمی مناسب در این بخش به بررسی دقیق موضوع پرداخته و سعی شده‌است نیازهای کاربری برای کلیه‌ی عمل‌های متداول لاپاروسکوپی شناسایی شود.

۴-۱-۲. روش شناسایی نیازهای کاربری و مشخصات فنی مورد نیاز

به منظور تایین نیازهای کاربری و مشخصات فنی ربات مورد نظر، روش‌های زیر به طور موازی پیگیری و انجام شده‌است:

۱- گردآوری اطلاعات از منابع علمی معتبر.

۲- حضور در اطاق عمل طی بیش از بیست عمل جراحی لاپاروسکوپی مختلف توسط جراحان متخصص لاپاروسکوپی در بیمارستان امام خمینی و استفاده از مشاهدات عینی در تایین نیازهای کاربری و مشخصات فنی.

۳- مشاوره‌های متعدد با جراحان متخصص در لاپاروسکوپی در بیمارستان امام خمینی و در دو کنگره‌ی بزرگ لاپاروسکوپی.

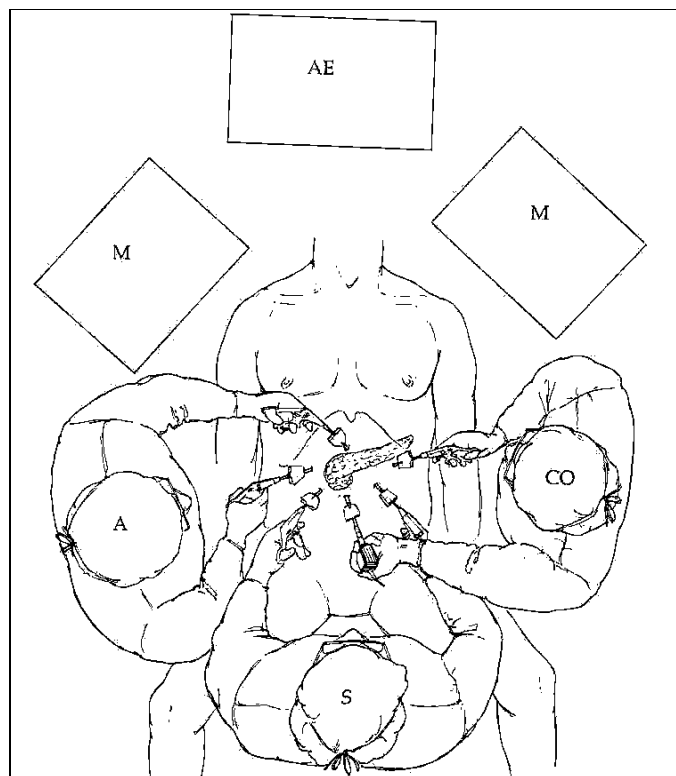
به منظور تبیین مشخصات فنی مورد نیاز نیز اندازه‌گیری‌هایی از ابعاد و نیروهای مورد نیاز برای کار با وسایل موجود

در اطاق عمل بیمارستان امام خمینی به عمل آمده که در استخراج مشخصات فنی مورد نیاز، مورد استفاده قرار گرفته است.

در ادامه مشروح هر بخش ارائه می شود:

۱- گردآوری اطلاعات از منابع علمی

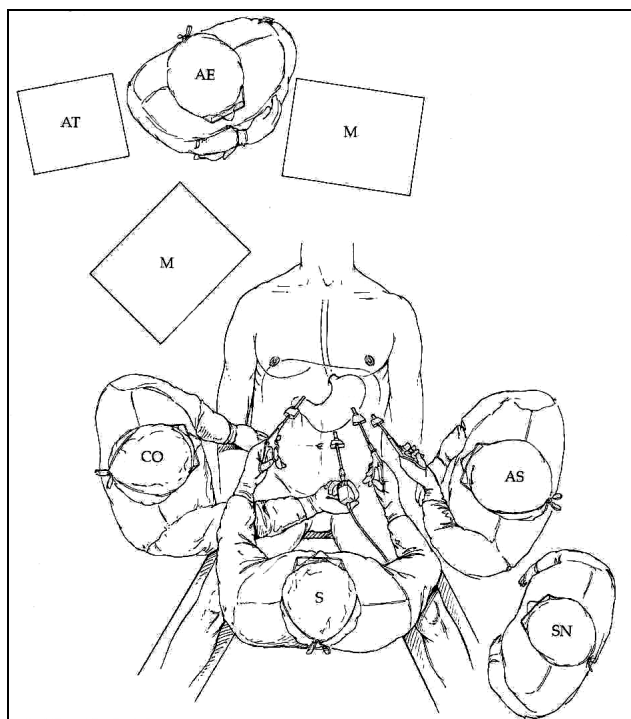
در این بخش با گردآوری و مطالعه‌ی منابع علمی مختلف از جمله اطلس جراحی لاپاروسکوپی [4] به بررسی دقیق چگونگی انجام عمل‌های جراحی لاپاروسکوپی مختلف پرداخته شده و موقعیت جراح، کمک جراحان، فرد نگهدارنده‌ی دوربین، بیمار و ابزارها مد نظر قرار گرفته است. در این مرحله هدف این بوده که با شناسایی محیط عمل‌های مختلف ربّاتی طراحی شود که در هر نوع عملی و در هر موقعیتی قابل استفاده بوده و محدودیتی در نوع عمل و نحوه‌ی قرار گیری افراد و ابزارها نداشته باشد. در شکل (۴-۱) نمونه‌ای از موقعیت قرارگیری جراح، کمک جراحان، بیمار و تجهیزات و ابزارآلات جراحی لاپاروسکوپی نسبت به یکدیگر در عمل روی غده‌ی پانکراس مشاهده می شود. همانطور که در این شکل نشان داده شده در حین این عمل لاپاروسکوپی فضای روی شکم بیمار به طور کامل توسط ابزارها و افراد اشغال شده و بازوی ربّاتیکی محدودیت زیادی از نظر فضای اشغالی و عدم برخورد با سایر ابزارها را دارا می باشد. این مشکل در بسیاری از عمل‌های لاپاروسکوپی وجود دارد [51].



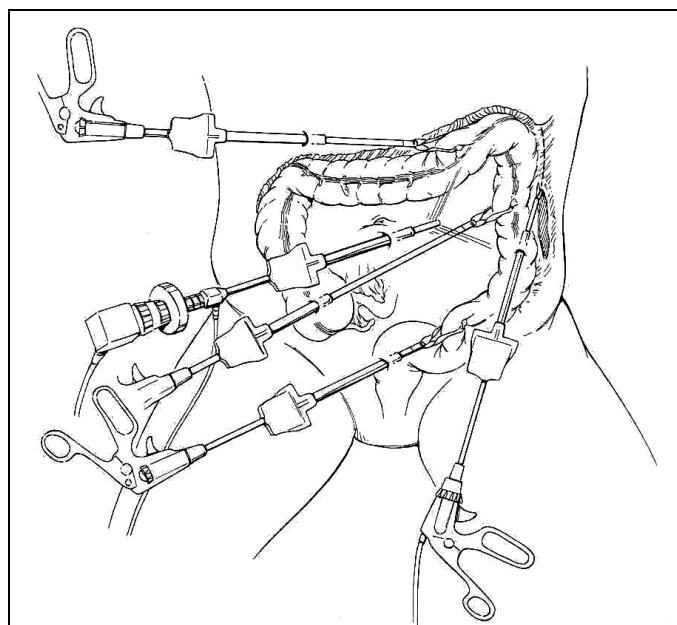
شکل ۴-۱. موقعیت افراد و ابزارها در نمونه‌ای از یک عمل لاپاروسکوپی بر روی غده پانکراس: S: جراح، A: کمک جراح، AE: تجهیزات بیهوشی، M: مانیتور، CO: نگهدارنده‌ی دوربین [4]

در شکل (۴-۲) عمل لاپاروسکوپی دیگری بر روی معده نشان داده شده است. در این عمل دست فرد نگهدارنده‌ی دوربین از زیر دست جراح عبور کرده و مشکلاتی از قبیل برخورد با دست جراح و خستگی زیاد به دلیل نحوه‌ی قرار گیری دست (با فاصله‌ی زیاد از بدن فرد) را به همراه دارد [52]. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود مکانیزم ربات باید به گونه‌ای باشد که بتواند به راحتی و بدون برخورد با دست جراح و سایر ابزارها لاپاروسکوپ را بین دو دست جراح قرار دهد.

در شکل (۴-۳) عمل لاپاروسکوپی دیگری بر روی روده‌ی بزرگ به نمایش گذاشته شده و نشان می‌دهد که در بعضی موارد دوربین یا لاپاروسکوپ بسیار نزدیک به سایر ابزارها قرار گرفته و بایستی ربات موردنظر در بخش انتهایی خود به اندازه‌ی کافی ظریف بوده و بتواند بدون برخورد با سایر ابزارها، حرکات مورد نیاز جراح را به لاپاروسکوپ اعمال کند.



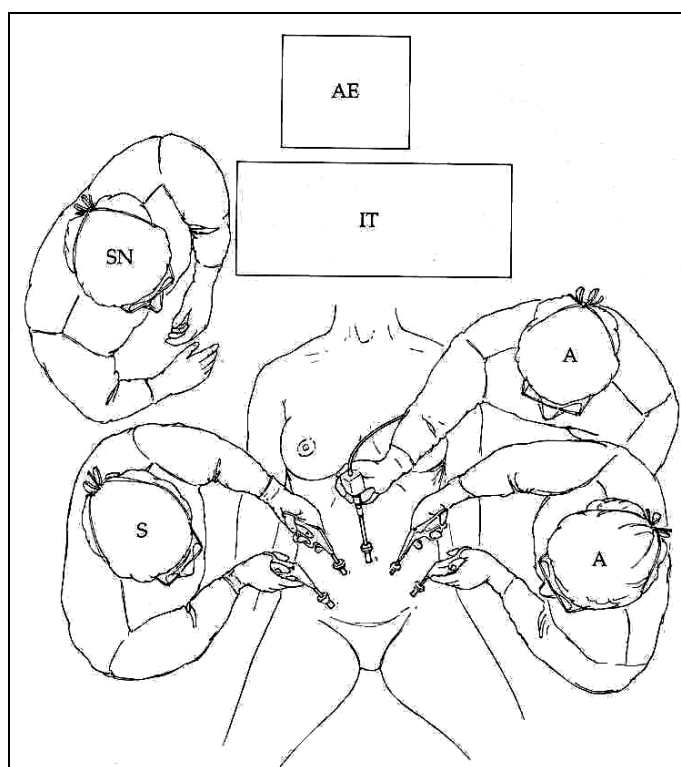
شکل ۴-۲. موقعیت افراد و ابزارها در نمونه‌ای از یک عمل لاپاروسکوپی بر روی معده: S: جراح، AS: کمک جراح، AE: متخصص بیهوشی، M: مانیتور، CO: نگهدارنده دوربین [4]



شکل ۴-۳. موقعیت ابزارها در نمونه‌ای از یک عمل لاپاروسکوپی بر روی روده‌ی بزرگ [4]

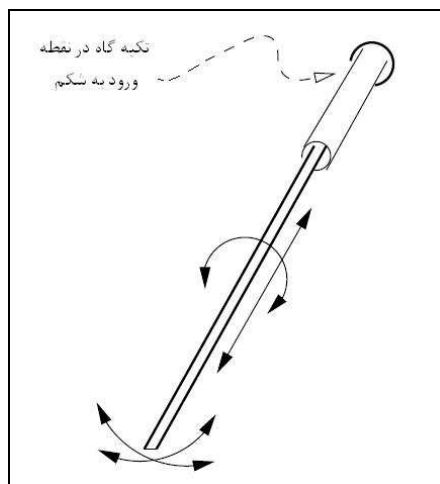
در شکل (۴-۴) عمل لاپاروسکوپی دیگری بر روی رحم یک بیمار نشان داده شده است. در این عمل بر خلاف

سایر عمل‌ها مانیتور جراحی در سمت پای بیمار قرار گرفته و افراد در سمت سر بیمار. به دلیل وجود فرد کمک جراح در این عمل، جراح مجبور شده در موقعیت نامطلوبی قرار بگیرد و عملکرد وی مطابق با اصول ارگونومی نباشد. با حذف فرد کمک جراح فضا برای موقعیت قرارگیری بهتر جراح خالی شده و راحتی و آسایش جراح فراهم می‌شود.



شکل ۴-۴. موقعیت افراد و ابزارها در نمونه‌ای از یک عمل لاپاروسکوپی بر روی رحم [4]

ملاحظات فنی: از لحاظ سینماتیکی هنگامی که لاپاروسکوپ وارد شکم می‌شود دو درجه آزادی از شش درجه آزادی خود به عنوان یک جسم صلب در فضای سه بعدی را از دست داده و دارای چهار درجه آزادی می‌باشد [53,8] (شکل ۴-۵). دو درجه‌ی مقید شده حرکت در صفحه‌ی شکم و چهار درجه‌ی باقیمانده یک حرکت خطی در امتداد خود لاپاروسکوپ و سه درجه‌ی دورانی حول سه محور عمود برهم که یکی از آنها در امتداد خود لاپاروسکوپ قرار می‌گیرد، می‌باشند.



شکل ۴-۵. درجات آزادی لاپاروسکوپ بعد از ورود به شکم

۲- بازدید از جراحی‌های لاپاروسکوپی مختلف در اطاق عمل

در این بخش با شرکت در چندین عمل لاپاروسکوپی مختلف توسط جراحان مختلف که هر یک به گونه‌ای متفاوت و گاه سلیقه‌ای عمل می‌کرده‌اند، سعی شده محیط عمل به طور دقیق شناسایی شده و نیازهای جراح و نحوه‌ی عملکرد وی شناسایی شود. با این هدف از عمل‌های متعددی که به منظور استخراج کیسه‌ی صفرا، آپاندیسیت، نصب تیوپ برای عمل دیالیز سفاقی و یک مورد عمل استخراج غده‌ای بدخیم در داخل قفسه‌ی سینه که توسط جراحان متخصص لاپاروسکوپی در بیمارستان امام خمینی انجام می‌شده، بازدید به عمل آمده است. در طی این عمل‌ها موقعیت افراد، ابزارها و بیمار مد نظر قرار گرفته و نیازهای کاربری از قبیل بازه‌ی حرکات مورد نیاز برای لاپاروسکوپ، نحوه‌ی قرارگیری دستان جراح و محدودیت در فضای قرارگیری بازوی رباتیکی به دقت مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل (۴-۶) نحوه‌ی قرارگیری دستان جراح و دستان فرد نگهدارنده‌ی دوربین در عمل استخراج کیسه‌ی صفرا مشاهده می‌شود. در این عمل در اکثر مواقع دست فرد نگهدارنده‌ی دوربین در زیر دست چپ جراح قرار گرفته و مشکلات زیادی از نظر حجم فضای مورد نیاز برای قرارگیری دست کمک جراح و همچنین برخورد دست جراح و کمک جراح را به دنبال دارد. در این نوع عمل جراح مجبور است دست خود را بالاتر از حد معمول نگهدارد و این امر خستگی زیادی را برای جراح به همراه دارد.

در شکل (۴-۷) نیز نحوه‌ی قرارگیری جراح و کمک جراح در حین انجام عمل آپاندیسیت به روش لاپاروسکوپی

مشاهده می‌شود. در این عمل دست فرد نگهدارنده دوربین از زیر دست چپ جراح عبور کرده و مشکل برخورد با دست جراح را به همراه دارد. در شکل (۴-۸) که عمل استخراج غده‌ای از داخل قفسه‌ی سینه را به تصویر می‌کشد، محل قرارگیری دست فرد نگهدارنده لاپاروسکوپ بین دو دست جراح و در ارتفاع پایین (حدود 70 تا 80 Cm از زمین) بوده و از آنجا که این عمل بسیار طولانی می‌باشد (در این نمونه ۵ ساعت)، خستگی زیادی را برای فرد نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ به همراه دارد. همچنین در این عمل محل پورت ورود لاپاروسکوپ به داخل شکم و در نتیجه محل قرارگیری فرد نگهدارنده‌ی دوربین چندین بار تغییر می‌کند.



شکل ۴-۶ . موقعیت افراد و ابزارها در عمل استخراج کیسه‌ی صفرا به روش لاپاروسکوپی (اطاق عمل بیمارستان امام خمینی)



شکل ۴-۷. موقعیت افراد و ابزارها در عمل آپاندیسیت به روش لاپاروسکوپی (اطاق عمل بیمارستان امام خمینی)



شکل ۴-۸. موقعیت افراد و ابزارها در عمل استخراج غده‌ای از داخل قفسه‌ی سینه به روش لاپاروسکوپی (اطاق عمل بیمارستان امام خمینی)

۳- مشاوره با جراحان متخصص لاپاروسکوپی

در این بخش سعی شده با انجام رایزنی‌ها و مشاوره‌های تخصصی با جراحان متخصص لاپاروسکوپی در بیمارستان امام خمینی، آقایان: دکتر طولابی، دکتر کریمیان و دکتر کشوری و بیش از سی جراح متخصص لاپاروسکوپی فعال در نقاط مختلف کشور و خارج از کشور در طی دو گنگره‌ی بزرگ لاپاروسکوپی از جمله آقایان دکتر سیم فروش، دکتر بصیری و سایر اساتید برجسته‌ی کشور در زمینه‌ی لاپاروسکوپی و آقای دکتر قوامی به عنوان یکی از اولین استفاده کنندگان از ربات ایساپ در کشور سوئیس و همچنین با استفاده از گزارشات منتشر شده در سطح دنیا [54,55] توسط جراحان لاپاروسکوپی، نیازهای کاربری و مشخصات فنی ربات مورد نظر استخراج شود. با جمع آوری این اطلاعات سعی شده‌است پارامترهای ارگونومیک مورد نیاز در حین جراحی لاپاروسکوپی با هدف ایجاد راحتی و آرامش برای جراح و تامین ایمنی بیمار نیز مد نظر قرار گرفته و ربات مورد نظر از لحاظ ارگونومی شاخصه‌های مطلوبی داشته باشد. آنچه در ادامه بیان می‌شود حاصل جمع نظرات جراحان مختلف است:

از آنجا که عمل نگهداری لاپاروسکوپ حرکت‌های محدود و کوچکی را به همراه دارد و در اکثر مواقع در طول عمل بایستی لاپاروسکوپ ثابت و بدون لرزش یا حرکت باشد، این فعالیت یک فعالیت استاتیک محسوب شده و نسبت به فعالیت دینامیک (مثل فعالیت خود جراح) خستگی بیشتری را به همراه دارد، به این ترتیب کمک جراح خیلی زودتر از جراح خسته شده و این خستگی عواقبی چون لرزش دست و در نتیجه خرابی تصویر، عدم هماهنگی کمک جراح با جراح اصلی و در نتیجه طولانی شدن طول عمل و عواقب بعدی آن را به همراه دارد. علاوه بر این صحبت کردن مداوم جراح با کمک جراح به منظور تصحیح محل قرار گیری و زاویه‌ی درست نمایش تصویر، باعث خستگی روانی جراح شده و ناراحتی‌هایی را برای وی به دنبال دارد. به این ترتیب استفاده از یک ربات کمک جراح که بتواند به عنوان دست سوم جراح و طبق دستورات او، وظیفه‌ی نگهداری و هدایت لاپاروسکوپ را به عهده بگیرد، می‌تواند علاوه بر حل مشکلات فوق، باعث افزایش سرعت، دقت و کیفیت عمل لاپاروسکوپی شود. همچنین به منظور قابل استفاده بودن این ربات در بیمارستان‌های کشور، هزینه‌ی ساخت پایین بایستی یکی از پارامترهای اصلی در طراحی این ربات منظور شود.

۴-۱-۳. نتیجه: نیازهای کاربری و ملاحظات و مشخصات فنی مورد نیاز

نیازهای کاربری و ملاحظات ارگونومی: طبق بررسی‌های انجام شده از نحوه‌ی عملکرد جراحان مختلف در حین

عمل جراحی لاپاروسکوپی این نتیجه حاصل شده که مکانیزم ربات باید به گونه‌ای باشد که جراح را در انتخاب محل ورود به شکم دچار محدودیت نکرده و بتواند فضای کاری مورد نیاز جراح را بدون ایجاد مزاحمتی برای سایر ابزارهای وارد شده به شکم تحت پوشش قرار دهد. از آنجا که چشم جراح در ناحیه‌ی بین دودست وی قرار دارد، انتظار می‌رود تصویر ایجاد شده از محل عمل نیز از ناحیه‌ی بین دو دست جراح تصویر برداری شود تا جراح بتواند از مهارت ذهنی خود در تشخیص موقعیت فضایی احشاء بهتر و راحت‌تر استفاده کند. بنابراین محدوده‌ی کاری ربات معمولاً بین دودست جراح بوده و باید به گونه‌ای طراحی شود که در انتهای مچ خود تا حد ممکن ظریف بوده و کمترین فضا را بین دستان جراح و سایر ابزارها اشغال کند. همچنین محل قرارگیری بازوی ربات باید به گونه‌ای باشد که هیچ فضایی از محدوده‌ی حرکتی دست جراح را اشغال نکرده و پیش‌بینی حرکات آن در اجرای فرامین جراح برای خود جراح امکان‌پذیر باشد و جراح ترسی از انجام حرکات بزرگ و غیر قابل پیش‌بینی توسط ربات نداشته باشد.

آنچه از انواع جراحی‌های لاپاروسکوپی که هفت مورد از آنها در این گزارش معرفی شده‌اند نتیجه می‌شود آن است که هیچ فضای خالی و مشخصی برای قرارگیری پایه و بازوی ربات در همه‌ی انواع عمل‌های لاپاروسکوپی وجود نداشته و مکانیزم ربات باید به گونه‌ای طراحی شود که در هر عملی در محل مناسبی قرارگرفته و دارای پایه‌ی متحرک باشد. به بیان دیگر مکانیزم ربات بایستی قادر باشد از نواحی مختلف به محل موردنظر دسترسی پیدا کرده و حرکات مورد نیاز را بر لاپاروسکوپ اعمال کند.

علاوه بر این مکانیزم ربات باید به گونه‌ای باشد که بدون ایجاد مزاحمتی برای جراح لاپاروسکوپ را بین دو دست وی نگهداری کرده و به طور مثال در عمل کیسه‌ی صفرا بتواند لاپاروسکوپ را از زیر دست چپ جراح نیز عبور دهد (شکل ۴-۶). همچنین از آنجا که در بعضی موارد لاپاروسکوپ در فضای بسیار محدود و در بین سایر ابزارها حرکت می‌کند (شکل ۴-۳) مچ ربات باید بسیار ظریف بوده و با سایر ابزارها برخوردی نداشته باشد.

همچنین ربات باید به گونه‌ای طراحی شود که بتواند در هر مرحله‌ای از عمل به راحتی از لاپاروسکوپ جدا شود و به جراح اجازه دهد کارهایی از قبیل تعویض لاپاروسکوپ یا محل ورود به شکم و ... را به راحتی انجام داده و در صورت نیاز ربات دوباره عمل نگهداری و هدایت لاپاروسکوپ را از نو آغاز کند. به ویژه در ابتدای عمل بایستی لاپاروسکوپ توسط خود جراح با مهارت زیادی وارد شکم شده و بعد از قرارگیری در محل مناسب، لاپاروسکوپ به دست ربات داده شود. به بیان دیگر ربات باید بتواند در هر مرحله‌ای از عمل از لاپاروسکوپ جدا شده و دوباره از محل

دیگری کار را از سر گیرد.

ملاحظات فنی مورد نیاز: این ربات بایستی بتواند طبق دستور جراح و با دقت کافی لاپاروسکوپ را در جهات دلخواه حرکت داده و در موقعیت مطلوب قرار دهد و می تواند با فرامین صوتی یا با حرکت سر یا پای جراح و یا با استفاده از کلیدهای تعبیه شده در زیر دستکش جراحی هدایت شود. ویژگی اصلی این ربات آن است که باید بتواند بدون ایجاد نیروهای زیاد در محل ورود لاپاروسکوپ به داخل شکم، همواره لاپاروسکوپ را در یک مختصات کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم حرکت دهد (این نقطه را اصطلاحاً **مرکز حرکت** یا نقطه‌ی ثابت حرکت می‌نامیم).

اگرچه از نظر سینماتیکی دوران لاپاروسکوپ حول محور طولی خود امکان پذیر می‌باشد ولی از نظر کاربری این حرکت مجاز نمی‌باشد زیرا دوران لاپاروسکوپ حول محور طولی خود باعث چرخش تصویر نشان داده شده حول محور عمود بر صفحه‌ی نمایشگر شده و تصویر نادرستی از محل عمل را ارائه می‌دهد. به این ترتیب لاپاروسکوپ بعد از ورود به داخل شکم فقط دارای سه درجه‌ی آزادی مجاز می‌باشد و بهینه‌ترین مکانیزم از نظر اقتصادی، مکانیزمی است که تنها با داشتن سه درجه آزادی فعال بتواند کلیه‌ی نیازهای کاربری و حرکات مورد نیاز برای لاپاروسکوپ را فراهم کند و هرگز لاپاروسکوپ را حول محور طولی خود نچرخاند. این حرکات عبارتند از: حرکت در امتدادهای چپ، راست، بالا و پایین نسبت به تصویر نمایش داده شده در مانیتور و حرکت در امتداد شفت لاپاروسکوپ به منظور ایجاد بزرگنمایی مثبت و منفی در تصویر.

علاوه بر موارد ذکر شده ایمنی عملکردی ربات یکی از مهمترین پارامترهای طراحی و فنی می‌باشد. به این منظور مکانیزم ربات بایستی به گونه‌ای طراحی شود که در صورت از کار افتادن به راحتی از لاپاروسکوپ جدا شده و بدون هیچ خللی در روند جراحی از صحنه‌ی عمل خارج شود.

به این ترتیب می‌توان ملاحظات فنی مورد نیاز برای ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی را به طور خلاصه به صورت زیر بیان کرد:

۱- توانایی ایجاد حرکت سر لاپاروسکوپ در امتدادهای چپ، راست، بالا و پایین نسبت به تصویر نمایش داده شده

در مانیتور

۲- توانایی ایجاد حرکت در امتداد شفت لاپاروسکوپ به منظور ایجاد بزرگنمایی مثبت و منفی در تصویر

۳- انجام حرکات یاد شده حول نقطه ی ورود به داخل شکم و عدم اعمال نیروهای بزرگ به این نقطه

۴- دقت حرکتی مطلوب در حد 1 mm

۵- ایمنی حرکتی

مشخصات فنی مورد نیاز: به منظور تبیین مشخصات فنی مورد نیاز، وسایل استفاده شده حین عمل لاپاروسکوپی در بیمارستان امام خمینی به دقت مورد بررسی قرار گرفتند. روند عمل به این ترتیب است که بعد از ایجاد یک شکاف به قطر حدود یک سانتیمتر بر روی شکم بیمار ابزاری لوله‌ای شکل به نام راهگاه یا پورت^۱ و یا تروکار^۲ را در داخل شکم کار می‌گذارند تا شکاف ایجاد شده همواره برای عبور لاپاروسکوپ باز بماند. این ابزار در شکل (۴-۹) نشان داده شده است. قطر داخلی لوله‌ی این ابزار 1.5 mm از قطر لنز لاپاروسکوپ بیشتر است و به این ترتیب لاپاروسکوپ بدون برخورد با هیچ نیرویی از داخل آن عبور می‌کند. ولی در سر خارج از شکم این ابزار یک حلقه‌ی سیلیکونی قابل ارتجاع وجود دارد که به منظور جلوگیری از خروج هوای فشرده از داخل شکم تعبیه شده و از آنجا که در حالت آزاد قطری حدود 2.5 mm کمتر از قطر لنز لاپاروسکوپ دارد، در هنگام ورود لاپاروسکوپ به داخل تروکار محکم به آن چسبیده و دور آن را می‌گیرد. در این حالت برای حرکت دادن لاپاروسکوپ در امتداد خودش از ابتدا به ساکن در خلاف جهت نیروی جاذبه نیرویی حدود 5 (N) در امتداد لاپاروسکوپ مورد نیاز است.

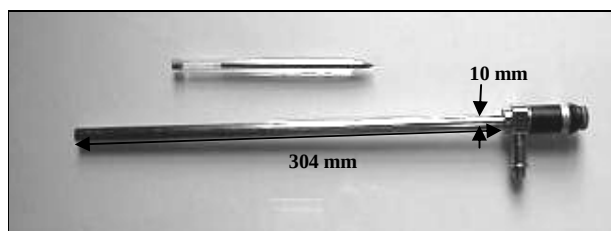


شکل ۴-۹. نوعی تروکار استفاده شونده در عمل لاپاروسکوپی

¹ Port

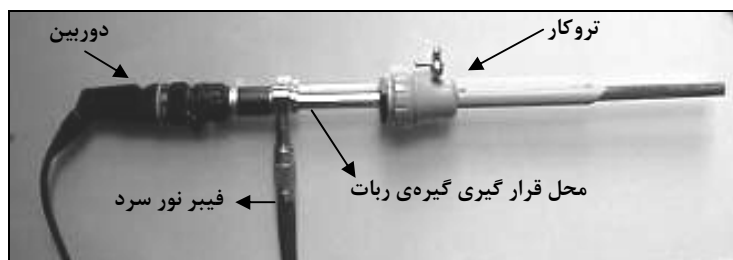
² Trocar

همانطور که در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده قطر لنز لاپاروسکوپ 10 mm (البته در برخی از عمل‌ها از لنزهای 5 mm نیز استفاده می‌شود) و طول آن 304 mm است. چنانچه طول گیره‌ی انتهایی ربات که بایستی ابتدای لنز لاپاروسکوپ را در دست گیرد 50 mm در نظر گرفته شود، طول بازه‌ی حرکت خطی ممکن در امتداد لاپاروسکوپ، یعنی طول بازه‌ی بزرگنمایی 250 mm می‌باشد.



شکل ۴-۱۰. لاپاروسکوپ (لنز) ۱۰ میلیمتری

در شکل (۴-۱۱) نحوه‌ی عبور لنز لاپاروسکوپ از داخل تروکار و محل قراگیری گیره‌ی ربات نشان داده شده‌است.



شکل ۴-۱۱. لاپاروسکوپ به همراه تروکار، دوربین و فیبر نور سرد متصل به آن

برخلاف گزارشات استخراج شده از منابع علمی [51] که بازه‌ی دورانی مورد نیاز برای لاپاروسکوپ را حدود $70^\circ \pm$ ذکر کرده‌اند، در عمل بازه‌ی حدود $90^\circ \pm$ نسبت به خط عمود بر دیواره‌ی شکم در محل ورود به آن برای دوران لاپاروسکوپ حول محور دورانی حاضر در صفحه‌ی شکم بیمار مورد نیاز است. برای دوران لاپاروسکوپ حول محور قائم نیز برای کلی‌ترین حالت بازه‌ی حرکتی 360° در نظر گرفته می‌شود. گشتاور مورد نیاز برای دوران

لاپاروسکوپ حول نقطه‌ی ورود به شکم بستگی به چاقی و قطر دیواره‌ی شکم بیمار دارد و در سخت‌ترین شرایط حدود 0.2 Nm تخمین زده می‌شود.

چنانچه حداقل طول بازوی گشتاور 50 mm در نظر گرفته شود، ماکزیمم نیروی مورد نیاز در راستای عمود بر لاپاروسکوپ از رابطه‌ی (۴-۱) معادل 4 N به‌دست می‌آید.

$$\tau = r_{\min} f_{\max \perp} \longrightarrow f_{\max \perp} = 0.2/0.05 = 4(N) \quad (۴-۱)$$

دقت حرکتی مورد نیاز برای انتهای لنز لاپاروسکوپ 1 mm می‌باشد.

با توجه به ابعاد ذکر شده برای لاپاروسکوپ بهترین مکانیزمی که بتواند کلیه‌ی عمل‌های لاپاروسکوپی را تحت پوشش قرار دهد باید فضای کاری‌ای معادل یک نیم کره به شعاع 250 mm روی سطح شکم بیمار را پوشش دهد. بنابر این حجم فضای کاری از رابطه‌ی (۴-۲) قابل محاسبه است.

(۴-۲)

$$w = \frac{2}{3} \pi r^3 = \frac{2}{3} \pi 250^3 = 32724923(mm^3)$$

با توجه به مطالب ذکر شده در این فصل مشخصات فنی مورد نیاز برای ربات موردنظر در جدول (۴-۱) قابل ارائه است. شایان ذکر است سایر مشخصات فنی از قبیل گشتاور مورد نیاز برای موتورها، طول رابط‌ها و غیره بعد از انتخاب نوع و طراحی دقیق مکانیزم قابل ارائه‌اند.

جدول ۴-۱. مشخصات فنی مورد نیاز برای مکانیزم ربات

ردیف	مشخصات فنی مورد نیاز برای مکانیزم ربات
۱	حداقل تعداد درجات آزادی فعال مورد نیاز
۲	دقت مورد نیاز
۳	ماکزیمم نیروی مورد نیاز در امتداد لاپاروسکوپ
	3
	1 (mm)
	5 (N)

۴	ماکزیمم نیروی مورد نیاز در راستای عمود بر امتداد لاپاروسکوپ	4 (N)
۵	ماکزیمم گشتاور مورد نیاز برای دوران لاپاروسکوپ	0.2 (Nm)
۶	قطر داخلی گریپر انتهایی	5 & 10 (mm)
۷	طول بازه‌ی بزرگنمایی	250 (mm)
۸	بازه‌ی دورانی حول محور افقی	$\pm 90^{\circ}$
۹	بازه‌ی دورانی حول محور قائم	360°
۱۰	حجم فضای کاری مورد نیاز	$32724923(mm^3)$
۱۱	سرعت خطی متوسط سر لاپاروسکوپ	10 (mm/s)

۴-۲. ارزیابی مکانیزم‌های موجود

در این قسمت با توجه به مکانیزم‌های مرور شده در فصل قبل و مزایا و معایب هر یک، نتیجه‌ی حاصل شده از بررسی هر مکانیزم ارائه شده و با توجه به نیاز این پروژه مکانیزم‌ها مورد ارزیابی کیفی قرار می‌گیرند.

به نظر می‌رسد مکانیزم سری با مفاصل قفل شونده برای نگهداری لاپاروسکوپ در یک موقعیت ثابت مناسب باشد ولی از آنجا که مکانیزم از نظر حرکتی در جهات مختلف یکرند نمی‌باشد، از نظر حرکتی دارای مشکلاتی بوده و در بعضی از موقعیت‌ها محدودیت‌هایی را برای جراح به وجود می‌آورد. از طرف دیگر این مکانیزم منطبق بر مهمترین پارامتر فنی در طراحی بازوی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ یعنی دارا بودن نقطه‌ی ثابت حرکت نبوده و در نتیجه این مکانیزم به هیچ وجه مکانیزم مناسبی تشخیص داده نمی‌شود.

مکانیزم سری با مفاصل اصطکاکی به عنوان یک مکانیزم غیر فعال و نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ نسبتاً مناسب می‌باشد ولی معایب یاد شده را به همراه دارد. علاوه بر این در صورتی که بخواهیم از این مکانیزم به عنوان یک مکانیزم فعال استفاده کنیم، بایستی مفاصل R1, R2, R6 و مفصل خطی انتهایی فعال شوند که این باعث حجیم شدن مکانیزم در بخش میج ربات شده و مطلوب نمی‌باشد.

در مورد مکانیزم میج با مفصل گوی و کاسه‌ای مشکل اصلی عدم انطباق نقطه‌ی ثابت حرکت بر نقطه‌ی ورود به شکم بوده و با توجه به اینکه این نکته پارامتر اصلی در انتخاب مکانیزم می‌باشد، استفاده از آن توصیه نمی‌شود.

مکانیزم کروی با پنج رابط کمانی به دلیل وجود محدودیت زیاد در فضای کاری و عدم وجود صلبیت و پایداری کافی، برای نگهداری لاپاروسکوپ مناسب نمی‌باشد.

همچنین مکانیزم کروی با دو رابط کمانی به دلیل وجود محدودیت در فضای کاری، برای نگهداری لاپاروسکوپ مناسب نمی‌باشد.

مکانیزم کروی با یک رابط کمانی به عنوان یک مکانیزم غیرفعال به طور نسبی بسیار مناسب ارزیابی می‌شود، ولی امکان فعال سازی آن با استفاده از قطعات مدولار مد نظر این پروژه وجود ندارد.

مکانیزم کروی کشویی اگرچه با توجه به نیاز جراحی لاپاروسکوپی طراحی شده ولی به دلیل استفاده از درجات آزادی و رابط‌های زیاد و همچنین هزینه ساخت بالا، مکانیزم مناسبی ارزیابی نمی‌شود.

بازوی نگهدارنده‌ی اندوسکوپ ربات داوینچی هرچند در مجموعه‌ای بزرگ و با حضور افراد متخصص زیادی طراحی شده ولی این بازو به هیچ وجه به عنوان یک بازوی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ که به طور جداگانه در اطاق عمل مورد استفاده قرار گیرد، مناسب نمی‌باشد. زیرا اولاً بسیار حجیم و پیچیده (شامل قطعات بسیار زیاد) طراحی شده و هزینه‌ی ساخت بالایی دارد و ثانیاً در عملی که توسط جراح انجام می‌شود و ابزارهای زیادی به بدن بیمار متصل است و امکان اعمال هیچ فرایند کنترلی جلوگیری از برخورد برای ربات وجود ندارد، امکان برخورد این مکانیزم با سایر ابزارهای جراحی زیاد است. علاوه بر این بازه‌ی حرکتی ربات دارای محدودیت‌هایی بوده و در همه‌ی عمل‌های لاپاروسکوپی قابل استفاده نمی‌باشد. این بازو با هشت درجه‌ی آزادی فعال و با هزینه‌ی بسیار زیادی طراحی شده که بیشتر برای عمل‌های جراحی قلب و به صورت جراحی از راه دور مناسب است، در این نوع جراحی بازه‌های حرکتی محدودتر بوده و از آنجا که همه‌ی ابزارها توسط ربات‌ها نگهداری می‌شوند امکان برنامه ریزی برای جلوگیری از برخورد بازوها وجود دارد.

استفاده‌ی زیاد از بازوی ایساپ نیز دلیلی بر کارآمد بودن آن در زمینه‌ی جراحی لاپاروسکوپی می‌باشد. ولی به هر حال این بازو مشکل چرخش و نیاز به اصلاح تصویر نشان داده شده به جراح و در نتیجه لرزش تصویر را به همراه دارد. علاوه بر این از آنجا که حرکات بازوی اسکارا در اجرای یک فرمان چندان برای جراح قابل پیش بینی نمی‌باشد، همواره ترس از برخورد بازو با سایر ابزار جراحی برای جراح وجود دارد. به این ترتیب به ویژه به دلیل مشکل اول، مکانیزم چندان مناسب ارزیابی نمی‌شود.

مکانیزم پوشیدنی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ نیز با وجود استفاده از حداقل تعداد درجات آزادی ممکن، به دلیل محدودیت‌های حرکتی و خستگی زیادی که برای جراح به دنبال دارد، مناسب ارزیابی نمی‌شود. حتی چنانچه این مکانیزم بجای بدن جراح بر روی پایه‌ی دیگری نیز نصب شود، به دلیل محدودیت زیاد در بازه‌ی حرکتی قابل استفاده نمی‌باشد. در رابطه با استفاده از ربات‌های صنعتی نیز اگرچه این کار میسر است، ولی به هیچ وجه از نظر اقتصادی بهینه

نمی‌باشد، علاوه بر این یک ربات صنعتی که با یک چنین اهدافی طراحی نشده به هیچ وجه توانایی در انجام کلیه‌ی حرکات مورد نیاز جراح در بازه‌ی وسیعی از فضای کاری را نداشته و کنترل آن برای ایجاد حرکات کروی نیز بسیار مشکل می‌باشد.

در نهایت به عنوان یک بررسی کمی بین ویژگی‌های مکانیزم‌های بررسی شده‌ی موجود، برخی از پارامترهای اصلی و مهم در این کاربرد در جدول (۴-۲) آورده شده و به هر مکانیزم به ازای هر پارامتر عددی از حداقل ۰ تا حداکثر ۵ امتیاز نسبت داده شده، و در نهایت جمع امتیازات هر مکانیزم مشخص شده است. در این جدول دقت مکانیزم با توجه به تعداد درجات آزادی غیر فعال که خود باعث کاهش دقت می‌شوند و همچنین با توجه به طول و تعداد رابط‌ها امتیاز دهی شده است. همچنین هرچه تعداد مفاصل غیر فعال بیشتر باشد، نیروی وارد شده به محل ورود به شکم برای انطباق لاپاروسکوپ با آن بیشتر خواهد بود. در مقابل هرچه تعداد مفاصل غیر فعال کمتر باشد، امکان تطابق خودکار با محل ورود به شکم کمتر خواهد شد. پارامتر فضای کاری ربات نیز با توجه به توانایی مکانیزم در پوشش فضای کاری مورد نیاز جراح امتیاز دهی شده است. در این جدول پارامتر ارگونومی جراحی با منظور کردن حدود ایجاد ایمنی برای بیمار و راحتی برای جراح امتیاز دهی شده است. پارامتر عدم برخورد با سایر ابزارها نیز با توجه به تعداد رابط‌های متحرک به ویژه در سطح بدن بیمار و بازه‌ی حرکتی رابط‌ها امتیاز دهی شده است.

جدول ۴-۲. معیارهای ارزیابی و امتیازات اختصاص داده شده به مکانیزم های موجود

نوع مکانیزم	نام مکانیزم	دقت	تطابق خودکار	عدم لرزش تصویر	سادگی و هزینه ی ساخت پایین	اعمال نیروی کم	فضای کاری مناسب	رعایت ارگونومی جراحی	عدم برخورد با سایر ابزارها	امکان فعال سازی	رتبه امتیاز
مکانیزم های غیر فعال	سری با مفاصل قفلی	۳	۰	۳	۱	۰	۱	۲	۲	۵	۱۷
	سری با مفاصل اصطکاکی	۳	۵	۳	۱	۳	۴	۳	۴	۴	۳۰
	گوی و کاسه ای	۳	۰	۳	۴	۰	۴	۴	۵	۰	۲۳
	کروی پنج لینکی	۱	۰	۳	۱	۴	۲	۰	۰	۱	۱۲
	کروی دو لینکی	۲	۰	۳	۲	۴	۲	۱	۰	۱	۱۵
	کروی با یک رابط کمانی	۵	۰	۵	۴	۵	۵	۰	۰	۳	۲۷
	کروی	۳	۰	۳	۰	۴	۳	۲	۴	۵	۲۴

										کشویی
۲۹	۵	۳	۳	۳	۵	۲	۴	۰	۴	داوینچی
۳۲	۵	۴	۴	۴	۳	۱	۴	۵	۲	ایساپ
۲۳	۵	۱	۱	۰	۳	۳	۴	۴	۲	پوشیدنی
۱۵	۵	۰	۰	۰	۳	۰	۳	۰	۴	ربات صنعتی

بر اساس این جدول ربات ایساپ با کسب بیشترین امتیاز، مناسب ترین مکانیزم از بین مکانیزم‌های موجود تشخیص داده می‌شود.

با توجه به هدف اصلی این پروژه که همانا طراحی یک بازوی فعال با کمترین هزینه‌ی ممکن برای نگهداری و حرکت لاپاروسکوپ می‌باشد، توجه به نکات زیر در انتخاب نوع مکانیزم ضروری می‌باشد:

مکانیزم بایستی به گونه‌ای طراحی شود که از حداقل تعداد درجات آزادی فعال استفاده کند. از آنجا که لاپاروسکوپ سه درجه‌ی آزادی مجاز دارد، حداقل تعداد درجات آزادی فعال ممکن سه می‌باشد، در عمل‌های پیشرفته که از لنزهای زاویه دار استفاده می‌شود، یک درجه‌ی آزادی برای دوران لنز (و نه دوربین) لاپاروسکوپ مورد نیاز است. بنابراین مکانیزم‌های مثل مکانیزم ربات معروف داوینچی با هشت درجه‌ی آزادی در هر بازو به هیچ وجه با اهداف این پروژه سازگاری ندارند. مکانیزم مورد نظر باید به گونه‌ای ساده طراحی شود که ساخت قطعات و رابط‌های آن در داخل کشور به راحتی انجام شود. همچنین مکانیزم باید کلیه‌ی ملاحظات فنی و کاربری ذکر شده را دارا بوده و بتواند مشکلات ذکر شده در مکانیزم‌های قبلی به ویژه مشکل نیاز به اصلاح زاویه‌ی قائم دید را برطرف سازد.

بهتر است مکانیزم ربات به گونه‌ای طراحی شود که از نظر ماهیت مکانیکی امکان انجام حرکات کروی به وسیله‌ی آن به راحتی میسر بوده و نیاز به کنترل پیچیده برای ایجاد یک حرکت کروی نداشته باشد. به عبارت دیگر از آنجا که در این کاربرد مسیرهایی که باید توسط عملگر انتهایی ربات پیموده شود، همیشه روی سطح یک کره و یا در امتداد شعاع آن قرار دارد، بهتر است مکانیزمی انتخاب شود که ماهیت حرکتی آن در مختصات کروی بسیار ساده و راحت باشد. به این

ترتیب می‌توان از محاسبات طولانی برای ایجاد مسیرهای کروی و دایره‌ای جلوگیری کرد.

۴-۳. طراحی مکانیزم

۴-۳-۱. مقدمه

در این مرحله از پروژه با در نظر گرفتن کلیه نیازهای کاربری و ملاحظات طراحی و مشخصات فنی مورد نیاز برای ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی که به تفصیل در بخش‌های قبلی مورد بررسی قرار گرفتند، سعی شده است مکانیزم‌هایی نو و بدیع با توجه خاص به موضوع این پروژه طراحی شوند و مورد تحلیل و بررسی دقیق قرار گرفته و صحت عملکرد مناسب آنها اثبات شود. در این مرحله با توجه به نیاز خاص کشور عزیزمان و با در نظر گرفتن وجود سرانه‌ی بهداشتی بسیار پایین در این کشور و عدم توانایی بیمارستان‌های کشور در پرداخت هزینه‌های سنگین، کاهش قیمت تمام شده برای ساخت ربات از طریق کاهش تعداد درجات آزادی فعال به عنوان یک معیار اصلی در طراحی و انتخاب نوع مکانیزم در نظر گرفته شده است. در عین حال کلیه نیازهای کاربری و ملاحظات فنی در طراحی ربات مورد توجه دقیق بوده و سعی شده است مکانیزم طراحی شده از هر نظر بهینه بوده و در کلیه عمل‌های جراحی لاپاروسکوپی قابل استفاده باشد. علاوه بر این امکان ساخت مدولار با توجه به مزایای تحقیقاتی از جمله پارامترهای اصلی در طراحی مکانیزم‌های مختلف بوده است.

در این راستا سه مکانیزم جدید که در عمل لاپاروسکوپی قابل استفاده هستند طراحی شده و مورد مدلسازی حرکتی قرار گرفته‌اند و مزایا و معایب هر یک بررسی شده و در نهایت مناسب‌ترین مکانیزم با توجه به اهداف این پروژه انتخاب شده است. از آنجا که ربات ایساپ یکی از موفق‌ترین ربات‌های موجود در این زمینه بوده، این ربات نیز مورد مدلسازی حرکتی قرار گرفته و با سه مکانیزم جدید ارائه شده در این پروژه مقایسه شده است. در مکانیزم نهایی انتخاب شده به عنوان بهترین طرح با وجود استفاده از کمترین تعداد عملگرهای ممکن مشکل اصلی مکانیزم ایساپ یعنی چرخش زاویه‌ی قائم دید حل شده است.

در نهایت ویژگی‌های منحصر بفرد مکانیزم نهایی، ارائه شده و به عنوان بهترین مکانیزم در ادامه‌ی پروژه مورد توجه قرار گرفته است.

۴-۳-۲. روش طراحی مکانیزم

به منظور ارائه‌ی طرحی برتر، با توجه به نیازهای خاص این پروژه ابتدا دو مکانیزم مختلف باتوجه به کاربرد مورد نیاز به صورت مفهومی طراحی شده و مورد بررسی قرار گرفته اند. در نهایت با توجه به هدف اصلی این پروژه مبنی بر استفاده از حداقل تعداد درجات آزادی فعال ممکن یعنی سه درجه به منظور کاهش هزینه‌ها سعی شده است از میان کلیه‌ی مکانیزم‌های سه درجه آزادی ممکن شامل ترکیبات مختلف مفاصل خطی و دورانی یعنی ۳۲ حالت مختلف، طرح نهایی با مناسب‌ترین شرایط طبق معیارهای ذکر شده در گزارشات قبلی از میان ۳۲ حالت موجود از جداول طراحی سیستماتیک انتخاب شود. سپس سه مکانیزم طراحی شده در این مرحله و همچنین مکانیزم ربات ایساپ با ابعاد واقعی در نرم افزار vNASTRAN مدل سازی حرکتی شده و توانایی انجام حرکات مورد نیاز توسط آنها مورد بررسی قرار گرفته است. پس از اثبات توانایی مکانیزم‌های طراحی شده در انجام حرکات مورد نیاز جراح، مزایا و معایب هریک به دقت بررسی شده و ویژگی‌های خاص هر طرح استخراج شده است. در نهایت مناسب‌ترین طرح مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفته و ویژگی‌های خاص و توانایی‌های منحصر بفرد طرح نهایی در عدم برخورد با سایر ابزارها و امکان عبور از زیر دست جراح در نرم افزار vNASTRAN مدل سازی شده است.

در این مرحله سه مکانیزم طراحی شده در این پروژه معرفی شده و ضمن ارائه‌ی روند دستیابی به طرح مورد نظر، مزایا و معایب هر یک بررسی شده و بهترین طرح انتخاب شده است:

مکانیزم سری با محورهای متقاطع در مرکز حرکت

طبق قانون زوایای اوایلر متحرک XYZ [56] چنانچه سه مفصل دورانی که به تناوب دو به دو بر هم عمود باشند و به صورت سری به هم متصل شوند می‌توانند در محل عضو انتهایی خود هر جهت گیری دلخواه را در فضا ایجاد کنند. در این بخش نیز هدف طراحی مکانیزمی است که بتواند هر جهت گیری دلخواه را به لاپاروسکوپ بدهد که طبق روابط اوایلر [56] این امر با سه محور دورانی دو به دو عمود بر هم امکان پذیر می‌باشد ولی نکته‌ی اصلی انجام این حرکات حول نقطه‌ی ورود به شکم یا همان مرکز حرکت می‌باشد. ربات‌های صنعتی مثل ربات Puma 560 با داشتن سه درجه آزادی دورانی متقاطع در مرکز میچ و به تناوب عمود بر هم قادرند هر جهت گیری مطلوب را برای ابزار فراهم کنند شایان ذکر است در این ربات کلیه‌ی دوران‌ها حول نقطه‌ای که در داخل محوطه‌ی میچ ربات قرار دارد انجام می‌شود. ولی در این کاربرد بایستی محل تقاطع محورهای دورانی که در ربات‌های صنعتی در مرکز میچ ربات قرار دارد در نقطه‌ای در

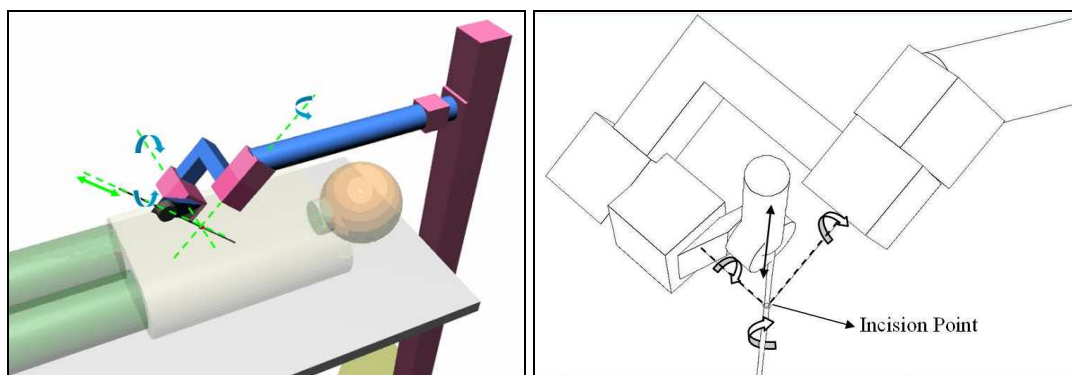
فضای باز و خارج از محدوده‌ی مکانیزم ربات قرار گیرد تا بتوان این نقطه را با محل ورود به شکم انطباق داد. این امر نیز به سادگی امکان پذیر بوده و طبق شکل (۴-۱۲) با طراحی رابط‌هایی با زاویه‌ی پیشش ۹۰ درجه میسر شده است. حرکت لاپاروسکوپ در امتداد خود نیز از طریق تعبیه‌ی یک مفصل خطی در انتهای میچ ربات امکان پذیر گشته است.

این مکانیزم که در دسته مکانیزم‌های دارای مرکز حرکت ثابت قرار می‌گیرد از دو بخش تشکیل شده:

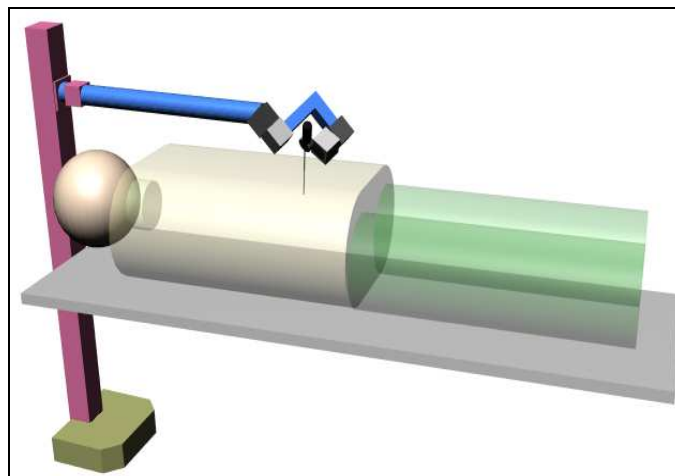
۱- پایه اصلی که دارای سه درجه‌ی آزادی بوده و به منظور تطبیق دادن اولیه‌ی مرکز حرکت بر نقطه‌ی ورود به شکم در شروع عمل در نظر گرفته شده است. این سه درجه عبارتند از حرکت در صفحه‌ی افق توسط چرخهای زیر پایه‌ی ربات و دیگری حرکت در امتداد قائم برای تنظیم ارتفاع میچ ربات، این سه درجه آزادی برای موقعیت دهی اولیه‌ی میچ بوده و بعد از تنظیم اولیه تا پایان عمل ثابت می‌مانند و می‌توان آنها را به صورت غیرفعال و متحرک با نیروی دست طراحی کرد.

۲- میچ ربات با چهار درجه‌ی آزادی فعال که وظیفه‌ی جهت دهی و حرکت لاپاروسکوپ در امتداد خود را بر عهده دارد. به این ترتیب که با داشتن سه مفصل دورانی عمود بر هم و مقاطع در محلمرکز حرکت قادر است لاپاروسکوپ را حول این نقطه دوران داده و با استفاده از یک مفصل خطی در امتداد لاپاروسکوپ، آن را در امتداد خود حرکت دهد (شکل ۴-۱۲ و ۴-۱۳).

نکته‌ی قابل توجه در طراحی این مکانیزم آن است که برخلاف ربات‌های صنعتی موجود، مکانیزم این ربات و نحوه‌ی قرارگیری رابط‌ها به‌گونه‌ای است که محل تلاقی محورهای دورانی میچ ربات در نقطه‌ای به دور از محل قرارگیری هریک از سه مفصل است و این امر باعث شده که این مکانیزم به دلیل نداشتن هیچ عضو یا مفصلی در محل مرکز حرکت در عمل لاپاروسکوپی قابل استفاده باشد. از جمله ویژگی‌های این مکانیزم دقت و پایداری زیاد می‌باشد و از آنجا که هر چهار محور حرکتی آن در یک نقطه متقاطع‌اند، طبق روش پایپر [34] سینماتیک وارون این ربات دارای حل بسته است.



شکل ۴-۱۲ . مکانیزم سری با محورهای متقاطع در مرکز حرکت (نقطه‌ی ورود به شکم)، شامل سه محور دورانی دو به دو عمود بر هم و یک محور خطی در امتداد لاپاروسکوپ



شکل ۴-۱۳ . نمای پایه‌ی سه درجه آزادی و میج چهار درجه آزادی ربات نگهدارنده لاپاروسکوپ

مزایا:

دقت و پایداری زیاد، توانایی ایجاد حرکت کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم، تعداد مفاصل و رابط‌های محدود

معایب:

عملکرد کل بازو در سطح بدن بیمار، محدودیت در فضای کاری، نیاز به اصلاح زاویه‌ی قائم دید به وسیله‌ی دوران لاپاروسکوپ حول محور طولی خودش، نیاز به انطباق اولیه‌ی نقطه‌ی ثابت حرکت مکانیزم بر نقطه‌ی ورود به شکم در هر سه راستای حرکتی به ویژه تنظیم ارتفاع، امکان برخورد با سایر ابزار جراحی، عدم انطباق خودکار ربات با حرکات بدن بیمار.

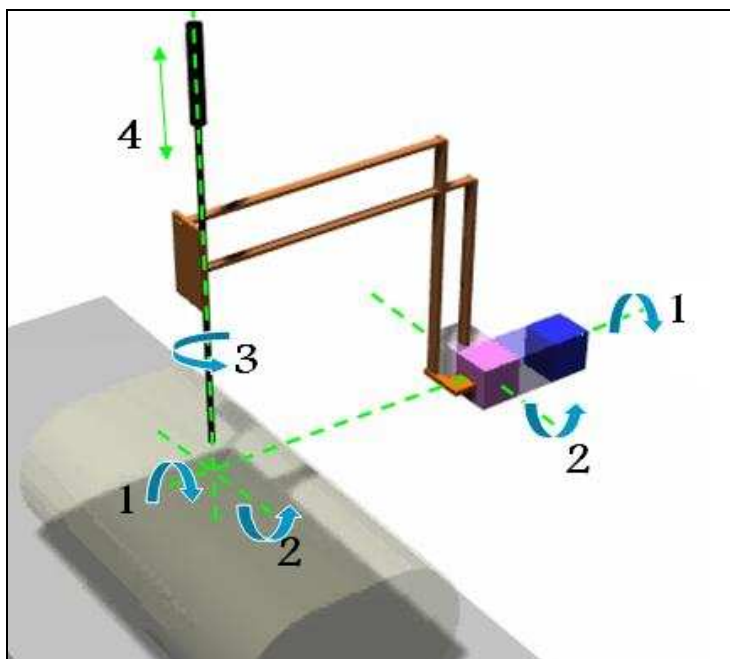
مکانیزم دو متوازی الاضلاعی دارای مرکز حرکت ثابت

ایده‌ی این طرح طراحی مکانیزمی بوده که بتواند مانند یک چهارضلعی لاپاروسکوپ را نگهداری کرده و حول تکیه گاه خود حرکت دهد، بدون آنکه مفصلی در محل ورود به شکم داشته باشد. به ازای حذف یک مفصل دو درجه آزادی در محل ورود به شکم، دو رابط موازی با رابط‌های دو و سه به مکانیزم چهار درجه آزادی اضافه شده اند. به این ترتیب دو مکانیزم متوازی الاضلاعی به صورت سری به هم متصل شده‌اند و باعث شده‌اند کل مکانیزم مانند یک مکانیزم متوازی الاضلاعی حرکت کند بدون آنکه مفصلی در محل ورود به شکم داشته باشد (شکل ۴-۱۴).

این مکانیزم نیز که در دسته‌ی مکانیزم‌های دارای مرکز حرکت ثابت قرار می‌گیرد از دو بخش تشکیل شده است:

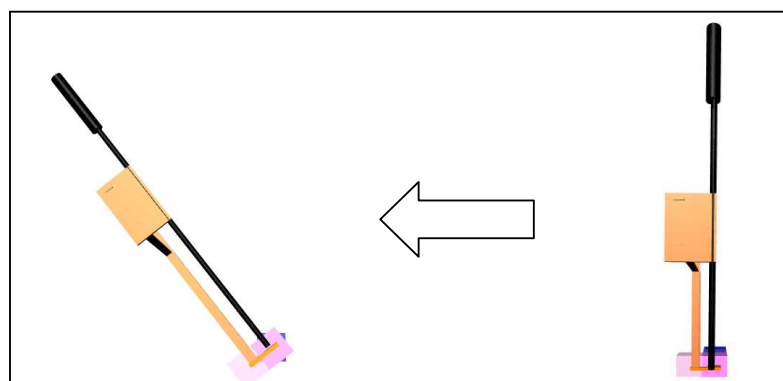
۱- پایه اصلی که دارای سه درجه‌ی آزادی بوده و به منظور تطبیق دادن اولیه‌ی مرکز حرکت بر نقطه‌ی ورود به شکم در شروع عمل در نظر گرفته شده است. این سه درجه عبارتند از حرکت در صفحه‌ی افق توسط چرخهای زیر پایه‌ی ربات و دیگری حرکت در امتداد قائم برای تنظیم ارتفاع میچ ربات، این سه درجه آزادی برای موقعیت دهی اولیه‌ی میچ بوده و بعد از تنظیم اولیه تا پایان عمل ثابت می‌مانند و می‌توان آنها را به صورت غیرفعال و متحرک با نیروی دست طراحی کرد.

۲- مکانیزم جهت دهی لاپاروسکوپ که با داشتن چهار درجه‌ی آزادی (سه دورانی و یک خطی) در واقع میچ ربات را تشکیل داده و وظیفه‌ی دوران لاپاروسکوپ حول مرکز حرکت و ایجاد حرکت خطی در امتداد خودش را بر عهده دارد. نحوه‌ی اهرم بندی مکانیزم میچ این ربات به گونه‌ای است که قادر است بدون آنکه هیچ مفصلی در محل نقطه‌ی ورود لاپاروسکوپ به داخل شکم داشته باشد، از فاصله‌ی دور لاپاروسکوپ را دقیقاً حول مرکز حرکت چرخانده و محل این نقطه را تغییر ندهد. در این مکانیزم بدیع در واقع دو مکانیزم متوازی الاضلاعی به صورت سری به هم متصل شده و در نتیجه کل مکانیزم مانند یک متوازی الاضلاع حرکت می‌کند ولی با این تفاوت که در انتهای این مکانیزم یعنی در مرکز حرکت هیچ مفصلی وجود نداشته و این نقطه توسط این اهرم بندی خاص ثابت می‌ماند. دوران کل این مکانیزم توسط موتورهایی که روی پایه‌ی ربات نصب شده‌اند انجام شده و موتورهای اصلی این ربات در فضا معلق نمی‌شوند که این خود یک ویژگی منحصربفرد نسبت به مکانیزم اول می‌باشد. بر اثر دوران اولین موتور نصب شده روی پایه‌ی ربات کل صفحه‌ی اهرم بندی حول محور گذرنده از مرکز حرکت چرخیده (محور ۱ در شکل ۴-۱۴) و بر اثر دوران موتور بعدی که درواقع به صورت سری و در راستای عمود بر محور موتور اول، بر روی شافت موتور اول نصب شده، مکانیزم در صفحه‌ی خود (حول محور ۲) مانند یک متوازی الاضلاع حرکت می‌کند. یک درجه آزادی دورانی به منظور دوران لاپاروسکوپ حول محور طولی خودش (محور ۳) و یک درجه‌ی خطی نیز برای حرکت لاپاروسکوپ در امتداد خودش به انتهای مکانیزم افزوده شده است (محور ۴).

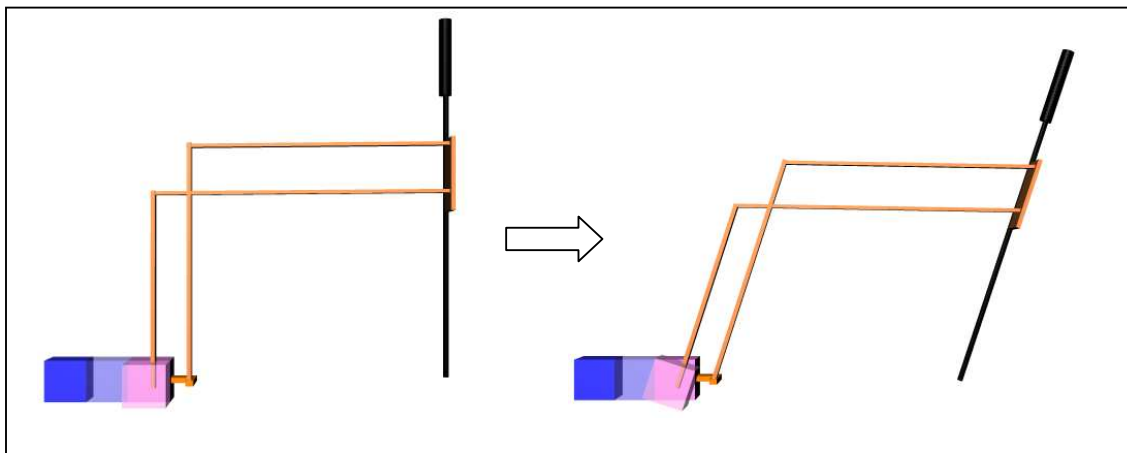


شکل ۴-۱۴. مکانیزم دو متوازی الاضلاعی دارای مرکز حرکت ثابت

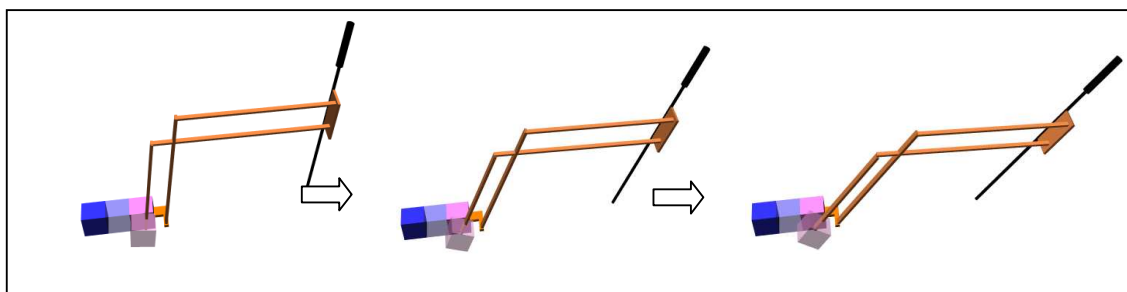
در شکل (۴-۱۵) چگونگی انجام حرکت حول محور ۱ از نمای روبرو و در شکل (۴-۱۶) چگونگی انجام حرکت حول محور ۲ از نمای جانبی و در شکل (۴-۱۷) همین حرکت از نمای ایزومتریک نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۵. چگونگی انجام حرکت حول محور ۱ از نمای روبرو



شکل ۴-۱۶. چگونگی انجام حرکت حول محور ۲ از نمای جانبی



شکل ۴-۱۷. چگونگی انجام حرکت حول محور ۲ از نمای ایزومتریک

مزایا:

توانایی ایجاد حرکت کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم از راه دور و بدون داشتن هیچ مفصلی در روی سطح شکم بیمار، دقت کافی، پایداری و صلبیت بالا.

معایب:

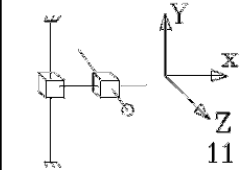
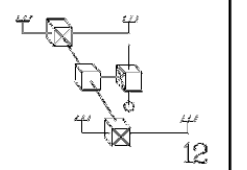
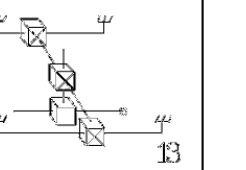
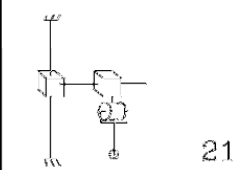
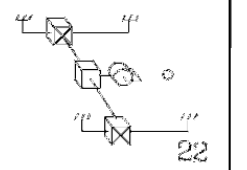
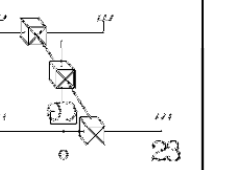
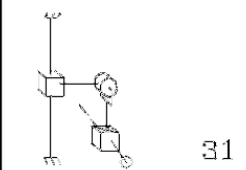
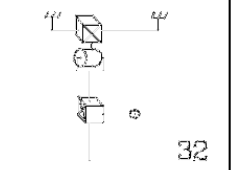
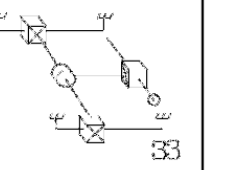
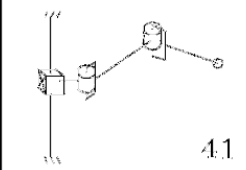
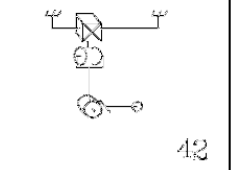
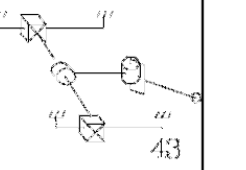
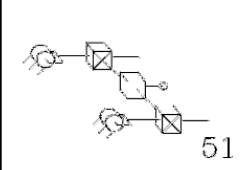
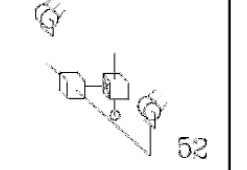
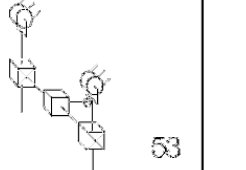
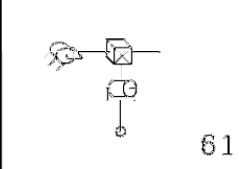
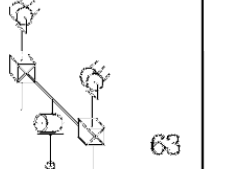
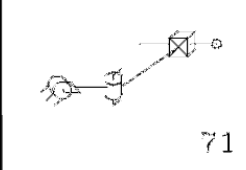
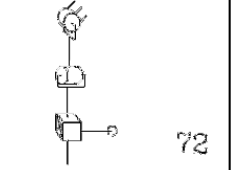
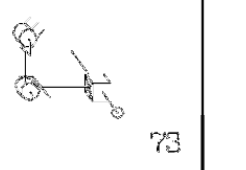
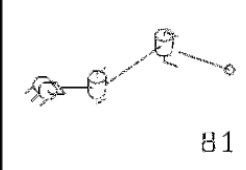
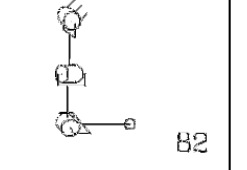
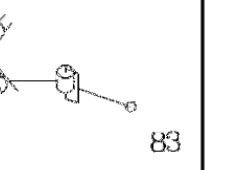
استفاده از تعداد مفاصل، رابط‌ها و درجات آزادی زیاد برای حرکت فقط سه درجه آزادی لاپاروسکوپ، نیاز به یک درجه آزادی اضافی برای چرخش لاپاروسکوپ و اصلاح زاویه‌ی قائم دید، بزرگ و حجیم بودن و حرکت کل بازو در حجم زیادی از فضا در هنگام عملکرد مفصل دورانی اول و چرخش لاپاروسکوپ حول محور عمود بر خودش، حجیم بودن مکانیزم در انتها به دلیل وجود دو درجه آزادی انتهایی در مچ ربات (یک خطی و یک دورانی)، امکان برخورد با سایر ابزار جراحی، بازه‌ی حرکتی نسبتاً محدود، هزینه‌ی ساخت بالا.

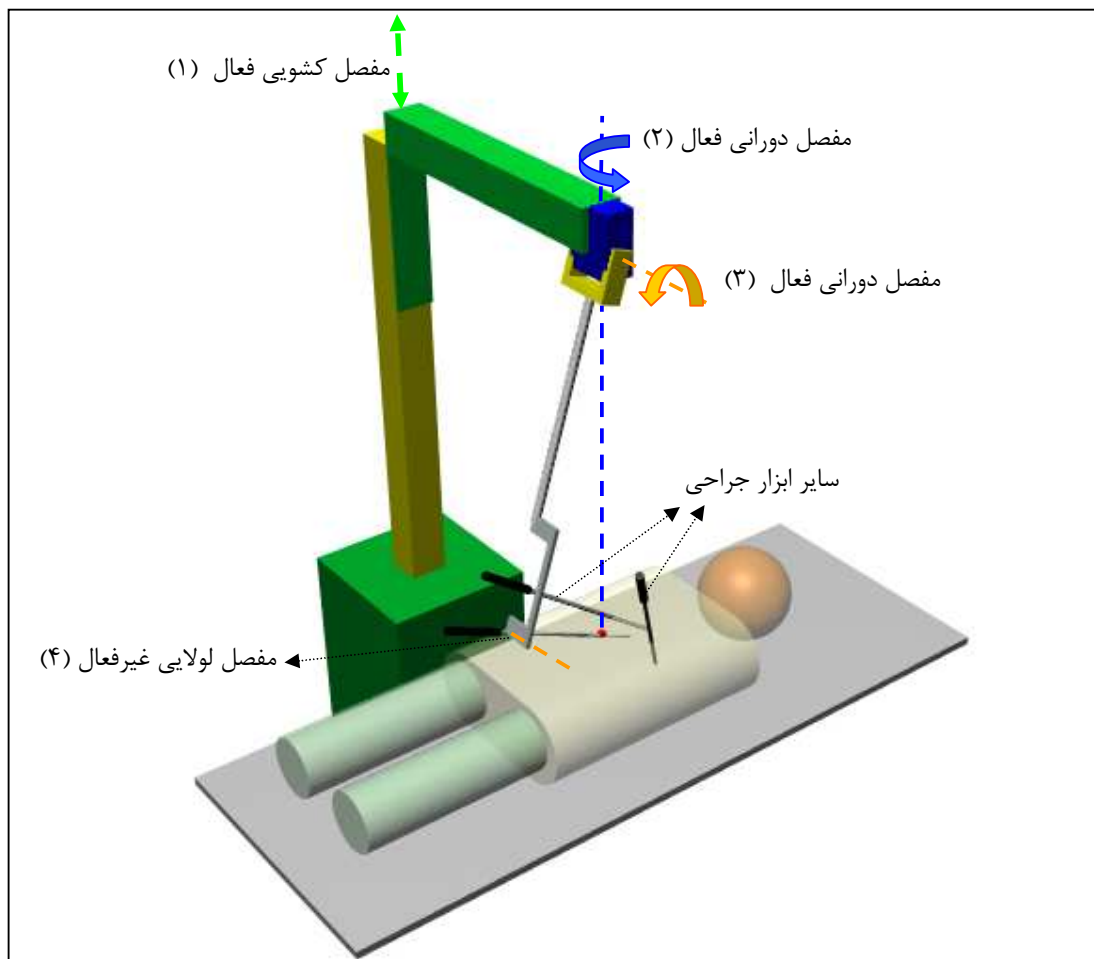
مکانیزم کروی - استوانه‌ای ایستاده (مکانیزم نهایی)

با توجه به تعداد درجات آزادی مجاز برای حرکت لاپاروسکوپ یعنی فقط سه درجه‌ی آزادی و با توجه به هدف اصلی این پروژه یعنی کاهش هزینه‌ها، بهترین طرح برای این پروژه طرحی است که در عین برآورده کردن کلیه‌ی نیازهای کاربری و مشخصات ذکر شده در گزارشات قبلی، از حداقل تعداد درجات آزادی فعال ممکن، یعنی سه درجه آزادی فعال مستقل استفاده نماید. با این هدف کلیه‌ی مکانیزم‌های سه درجه آزادی ممکن (جدول ۴-۳) شامل ترکیبات مختلف مفصل خطی و دورانی که ۳۲ حالت مختلف [35] را شامل می‌شود، مورد بررسی دقیق قرار گرفته و توانایی هر یک از این پیکربندی‌های مختلف در انجام فرایند مورد نیاز مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با انجام این بررسی این نتیجه حاصل شده که هیچ یک از مکانیزم‌های ارائه شده در جدول (۴-۳) نمی‌تواند به تنهایی کلیه‌ی نیازهای کاربری را تامین نماید، ولی چنانچه از مکانیزم شماره‌ی ۴۲ جدول (۴-۳) شامل یک محور کشویی و دو محور دورانی استفاده شود که محور کشویی و محور دورانی اول موازی بوده و محور سوم (دورانی) عمود بر آنها می‌باشد، می‌توان با اضافه کردن یک محور غیر فعال بعد از این سه محور به مکانیزم بدیع و بسیار مطلوبی رسید که در عین داشتن فقط سه درجه آزادی فعال، کلیه‌ی نیازهای کاربری را برآورده کرده و مشکل اصلی سایر مکانیزم‌های طراحی شده در این پروژه و سایر مکانیزم‌های موجود در دنیا یعنی نیاز به اصلاح زاویه‌ی قائم دید را نیز نداشته باشد. طراحی این مکانیزم حاصل انجام سعی و خطای فراوان در ارائه‌ی یک مکانیزم جدید بوده و حجم زیادی از کار را به خود اختصاص داده است. این مکانیزم در نرم افزار vNASTRAN به صورت مفهومی شبیه سازی شده و در شکل (۴-۱۸) ارائه شده است.

در این مکانیزم علاوه بر یک درجه آزادی غیرفعال که برای رسیدن به ارگونومی مناسب و عدم ایجاد تداخل فضایی برای ربات در نظر گرفته شده، تنها سه درجه‌ی آزادی فعال (یک خطی و دو دورانی) تعبیه شده است و با دارا بودن یک مفصل غیر فعال در ناحیه‌ی انتهایی بازوی خود در دسته‌ی مکانیزم‌های دارای مرکز حرکت انطباق یابنده در امتداد قائم قرار می‌گیرد.

جدول ۳-۲. ترکیبات مختلف مکانیزم‌های سه درجه آزادی شامل محورهای کشویی و دورانی [35]

PPP			
PPR			
PRP			
PRR			
RPP			
RPR			
RRP			
RRR			



شکل ۴-۱۸ . مکانیزم کروی- استوانه‌ای ایستاده به عنوان مناسب‌ترین مکانیزم طراحی شده برای ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی (شکل به وضوح توانایی مکانیزم در حرکت لاپاروسکوپ بین سایر ابزارهای جراحی را نشان می‌دهد)

نحوه‌ی قرارگیری محورهای دورانی فعال و غیر فعال در این ربات به گونه‌ای است که حین دادن حرکات مورد نیاز به لاپاروسکوپ، به هیچ وجه لاپاروسکوپ را حول محور دورانی خود نمی‌چرخاند و این از جمله ویژگی‌های منحصر بفرد این ربات است که بر خلاف مکانیزم‌های قبلی ربات را از نیاز به یک درجه آزادی اضافی برای چرخش لاپاروسکوپ حول خودش و خشی کردن چرخش ایجاد شده حول لاپاروسکوپ مستثنی می‌کند. پایه‌ی این ربات بر روی ارابه‌ای نصب شده که قبل از شروع عمل، امکان حرکت در صفحه‌ی افق را برای ربات فراهم می‌کند.

عملکرد ربات به گونه‌ای است که قادر است لاپاروسکوپ را حول یک محور دورانی قائم (که نسبت به پایه‌ی ربات ثابت است) بچرخاند. در شروع عمل بایستی با حرکت دادن ارابه‌ی ربات امتداد این محور را که توسط یک باریکه‌ی نوری لیزری مشخص می‌شود (محور ۲ در شکل ۴-۱۸)، از نقطه‌ی ورود به شکم گذراند و سپس در طول عمل ارابه‌ی ربات را

با قفل کردن چرخ‌های آن ثابت نگه داشت. این مکانیزم بر خلاف مکانیزم‌های دارای مرکز حرکت ثابت نیاز به تنظیم ارتفاع ندارد. اولین درجه آزادی فعال در این مکانیزم خطی بوده و قادر است بازوی رباتیکی را در امتداد قائم حرکت دهد. دو درجه آزادی فعال بعدی دورانی هستند اولی در امتداد قائم (گذرنده از محل ورود لاپاروسکوپ به داخل شکم) و دومی عمود بر آن و موازی با صفحه‌ی افق می‌باشد. مفصل بعدی که در انتهای بازوی ربات است و در امتداد گیره‌ی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ می‌باشد، یک مفصل دورانی غیر فعال است که با محور قبلی موازی می‌باشد. از آنجا که این مکانیزم لاپاروسکوپ را از بالا نگهداری می‌کند، هیچ فضایی را روی سطح بدن بیمار اشغال نکرده و ترس جراح را از برخورد با سایر ابزار جراحی بر طرف می‌کند. علاوه بر این مکانیزم یاد شده هیچ محدودیتی در انتخاب محل نقاط ورود به شکم برای جراح ایجاد نکرده و قادر است هر نقطه‌ای از بدن بیمار را تحت پوشش قرار داده و در ضمن محدودیتی برای حرکت دست جراح ایجاد نکند. طبق مطالعات و بررسی‌هایی که در این پروژه انجام شده و با شناسایی عمل‌های متداول لاپاروسکوپی [4] که نمونه‌هایی از آنها در بخش‌های قبلی ارائه شده‌اند این مکانیزم قادر است کلیه‌ی عمل‌های جراحی لاپاروسکوپی را تحت پوشش قرار داده و بدون هیچ مشکلی جراح را در انجام عمل لاپاروسکوپی یاری دهد. از جمله ویژگی‌های منحصر بفرد این ربات امکان ایجاد حرکت برای لاپاروسکوپ در زیر دستان جراح است. این ویژگی از طریق طراحی رابط ۴ یا همان میله‌ی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ با یک تورفتگی در انتهای خود ایجاد شده و به این ترتیب ربات می‌تواند بدون برخورد با دست جراح لاپاروسکوپ را زیر دست جراح ببرد. این ویژگی به ویژه در جراحی‌های کیسه‌ی صفرا که از متداول‌ترین و اولین جراحی‌هایی می‌باشد که از طریق لاپاروسکوپی انجام شده و نیاز به قرارگرفتن لاپاروسکوپ در زیر دست چپ جراح دارد (در هنگام مشاهده‌ی کانال سیستیک^۱) [4]، بسیار مطلوب بوده و استفاده از ربات نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ را در این نوع عمل امکان پذیر می‌سازد.

یکی از ویژگی‌های اصلی این ربات سادگی مکانیزم آن بوده و از آنجا که در این مکانیزم تعداد قطعات و رابط‌های حرکتی بسیار کم بوده و بازه‌ی حرکتی آنها در انجام حرکات مورد نیاز محدود می‌باشد، جراح ترسی از انجام حرکات بزرگ و برخورد با سایر ابزارها ندارد و به راحتی با مکانیزم و نحوه‌ی انجام حرکات آن آشنا می‌شود. به این ترتیب حرکت ربات در انجام دستور جراح به راحتی برای جراح قابل پیش بینی است.

¹ Cystic duct

همچنین بر خلاف اکثر ربات‌های صنعتی در این مکانیزم حرکت روی مسیرهای کروی و شعاعی بسیار ساده تر از حرکات مستقیم الخط بوده و می‌توان بدون نیاز به نقاط بینابینی و حل مداوم سینماتیک معکوس، ربات را از طریق روابط هندسی حاکم بر مفاصل و رابط‌های آن دقیقاً به صورت کروی یا شعاعی حرکت داد. این ویژگی زمان لازم برای ایجاد مسیر را حذف کرده و سرعت عملکرد ربات را افزایش می‌دهد. علاوه بر این مسیر حرکت ربات دقیقاً کمانی بوده و بر خلاف اکثر مکانیزم‌ها حرکات کمانی آن از به هم پیوستن نقاط بینابینی^۱ به وسیله‌ی حرکات راست خط ایجاد نمی‌شود. از آنجا که در این کاربرد بزرگنمایی تصویر بین ۳ تا ۱۵ برابر می‌باشد، پیوستگی و یکنواختی حرکت ربات در پیمودن یک مسیر کروی بسیار اهمیت داشته و از لرزش تصویر جلوگیری می‌کند. برای ایجاد حرکت چپ و راست نسبت به صفحه‌ی مانیتور کافی است محور ۲ به حرکت درآید و برای ایجاد حرکت‌های بالا/ پایین و بزرگنمایی مثبت/ منفی نیز حرکت همزمان محورهای ۱ و ۳ مورد نیاز است. در بخش مسیر دهی روابط هندسی حاکم بر حرکت این محورها برای ایجاد حرکات کاملاً کروی استخراج شده‌است.

از آنجا که کلگی ربات در ارتفاع حدود ۲ متر و بالای سر جراح قرار دارد، ربات مانعی برای دید جراح ایجاد نکرده و هیچ عضوی روی بدن بیمار نداشته و دسترسی جراح به قسمت‌های مختلف بدن بیمار را امکان پذیر می‌سازد. علاوه بر این مکانیزم ربات به گونه‌ای است که در انجام حرکات مورد نیاز جراح، هیچ یک از رابط‌های آن فضای مورد نیاز جراح یعنی سطح بدن بیمار را اشغال نکرده و مزاحمتی برای سایر ابزارها ایجاد نمی‌کند.

ازجمله ویژگی‌های ایمنی این ربات این است که در صورت از کار افتادگی موتورها، لاپاروسکوپ به راحتی از ربات جداشده و بدون بروز هیچ مشکلی ربات از صحنه‌ی عمل خارج شده و عمل جراحی ادامه می‌یابد.

به این ترتیب می‌توان ادعا کرد این ربات کلیه‌ی نیازهای کاربری ذکر شده در گزارشات قبلی را برآورده کرده و حین داشتن اغلب مزایای سایر مکانیزم‌ها بسیاری از مشکلات جدی آنها را حل کرده و علاوه بر این ویژگی‌های خاصی را نیز به همراه داشته است. در ادامه به اختصار مزایا و معایب این طرح ارائه می‌شود:

مزایا:

۱. استفاده از حداقل تعداد درجات آزادی فعال (سه درجه)

۲. عدم نیاز به اصلاح زاویه‌ی قائم دید

¹ Via point

۳. عدم وجود عملگر فعال در انتهای میچ و در نتیجه ظریف بودن این ناحیه
۴. امکان قرارگیری میچ ربات در فضای محدود بین ابزارها
۵. امکان حرکت لاپاروسکوپ به زیر دست جراح
۶. عدم محدودیت در بازه‌ی حرکتی لاپاروسکوپ
۷. پوشش کل فضای کاری موردنیاز برای هر نوع عمل لاپاروسکوپی
۸. عدم اشغال فضا روی بدن بیمار
۹. عدم برخورد رابطها با سایر ابزار جراحی
۱۰. طراحی و انتخاب فضای کاری رابطها در فضایی غیر مشترک با فضای کاری جراح و سایر ابزارها
۱۱. عدم ایجاد مانع روی بدن بیمار
۱۲. عدم نیاز به تنظیم نقطه‌ی ثابت حرکت در راستای قائم
۱۳. انطباق خودکار با حرکات بدن بیمار در راستای قائم
۱۴. استفاده از حداقل تعداد رابطهای متحرک و حرکات محدود و ظریف آنها
۱۵. سادگی امکان ایجاد حرکات روی مسیرهای کروی و شعاعی حول نقطه‌ی ورود به شکم
۱۶. امکان ساخت مدولار^۱
۱۷. امکان ساخت ساده رابطها با حداقل هزینه‌ی ممکن

معایب:

۱. نیاز به انطباق اولیه‌ی نقطه‌ی ثابت حرکت در صفحه‌ی افق بر محل ورود به شکم، قبل از شروع عمل
۲. عدم انطباق خودکار با حرکات بدن بیمار در صفحه‌ی افق

۴-۳-۳. بحث و نتیجه‌گیری برای انتخاب بهترین طرح

با توجه به مزایا و معایب ذکر شده برای مکانیزم سری با محورهای متقاطع در مرکز حرکت می‌توان نتیجه گرفت که مشکل اصلی این مکانیزم نسبت به سایر مکانیزم‌های طراحی شده در این پژوهش تعداد درجات آزادی بالا و در نتیجه بالا

بودن هزینه‌ی ساخت و احتیاج به انطباق اولیه در هر سه راستای حرکتی (به ویژه تنظیم ارتفاع) می‌باشد. همچنین در این ربات امکان برخورد با سایر ابزار جراحی زیاد بوده و چون در سطح بدن بیمار حرکت می‌کند دچار محدودیت فضایی می‌باشد. یعنی بخش زیادی از فضای مورد نیاز جراح را اشغال کرده و به همین دلیل برای این منظور مناسب نمی‌باشد. از جمله مشکلات اصلی مکانیزم دو متوازی الاضلاعی دارای مرکز حرکت ثابت نیاز به دقت بالا در ساخت اهرم بندی یاد شده و امکان قفل شدگی مکانیزم در صورت عدم رعایت تولرانس‌ها می‌باشد. همچنین از آنجا که اغلب شرایط کاری این ربات در نزدیکی مرز فضای کاری و نزدیک به نقاط تکیه است، معمولاً نیروهای زیادی برای حرکت دادن مکانیزم در نزدیکی مرز فضای کاری لازم است. تعداد درجات آزادی بالا، هزینه‌ی ساخت بالا، نیاز به انطباق اولیه در هر سه راستای حرکتی، امکان برخورد با سایر ابزار جراحی و عدم انطباق خودکار با حرکات بدن بیمار از جمله مشکلات این مکانیزم بدیع می‌باشد. علاوه بر این حرکات اهرم بندی این مکانیزم در اجرای دستورات جراح بسیار زیاد بوده و کل بازو در انجام یک فرمان حرکت داده می‌شود که این امر باعث افزایش ترس جراح در استفاده از چنین مکانیزمی می‌باشد. به این ترتیب این مکانیزم نیز برای منظور یاد شده مناسب تشخیص داده نمی‌شود.

با توجه به مزایای ذکر شده برای مکانیزم کروی- استوانه‌ای ایستاده و برتری‌های قابل توجه این مکانیزم نسبت به سایر مکانیزم‌ها، این مکانیزم به عنوان بهترین مکانیزم برای ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی تشخیص داده می‌شود. در نهایت به عنوان یک بررسی کمی بین ویژگی‌های سه مکانیزم طراحی شده در این پروژه و همچنین مکانیزم ربات ایساپ به عنوان یک ربات بسیار محبوب و پر استفاده در سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳، برخی از پارامترهای اصلی و مهم در این کاربرد در جدول (۴-۴) آورده شده و به هر مکانیزم به ازای هر پارامتر عددی از حداقل ۰ تا حداکثر ۵ امتیاز نسبت داده شده، و در نهایت جمع امتیازات هر مکانیزم مشخص شده است. در این جدول دقت مکانیزم با توجه به تعداد درجات آزادی غیر فعال که خود باعث کاهش دقت می‌شوند و همچنین با توجه به طول و تعداد رابط‌ها امتیاز دهی شده است. همچنین هرچه تعداد مفاصل غیر فعال بیشتر باشد، نیروی وارد شده به محل ورود به شکم برای انطباق لاپاروسکوپ با آن بیشتر خواهد بود. در مقابل هرچه تعداد مفاصل غیر فعال کمتر باشد، امکان تطابق خودکار با محل ورود به شکم کمتر خواهد شد. پارامتر فضای کاری ربات نیز با توجه به توانایی مکانیزم در پوشش فضای کاری مورد نیاز جراح امتیاز دهی شده است. در این جدول پارامتر ارگونومی جراحی با منظور کردن حدود ایجاد ایمنی برای بیمار و

راحتی برای جراح امتیاز دهی شده است. پارامتر عدم برخورد با سایر ابزارها نیز با توجه به تعداد رابط‌های متحرک به ویژه در سطح بدن بیمار و بازه‌ی حرکتی رابط‌ها امتیاز دهی شده است.

جدول ۴-۴. معیارهای ارزیابی و امتیازات اختصاص داده شده به هر مکانیزم

مکانیزمها معیارها	مکانیزم سری با محورهای متقاطع در مرکز حرکت	مکانیزم دو متوازی الاضلاعی دارای مرکز حرکت ثابت	مکانیزم ایسپ	مکانیزم کروی استوانه‌ای ایستاده
دقت	۵	۴	۲	۳
تطابق خودکار با حرکات بدن	۰	۰	۵	۴
عدم لرزش تصویر به دلیل چرخش لاپاروسکوپ	۴	۴	۴	۵
سادگی، کم بودن تعداد درجات آزادی و هزینه ساخت	۳	۲	۱	۵
اعمال نیروی کم در محل ورود به شکم	۵	۵	۳	۴
فضای کاری مناسب	۲	۳	۴	۵
رعایت ارگونومی جراحی	۲	۳	۴	۴
عدم برخورد با سایر ابزارها	۲	۳	۴	۵
جمع امتیازات	۲۳	۲۴	۲۷	۳۵

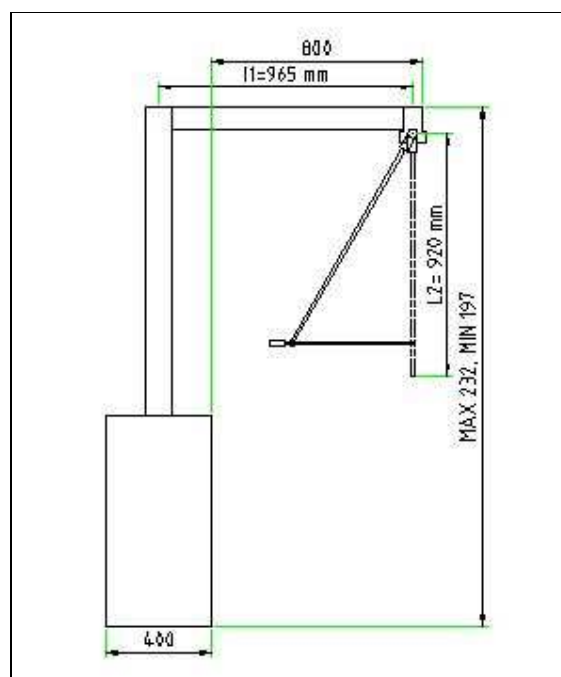
طبق جدول (۴-۳) مکانیزم کروی استوانه‌ای ایستاده با کسب بیشترین امتیاز (۳۵ امتیاز از حداکثر ۴۰ امتیاز) به عنوان مناسب‌ترین مکانیزم تشخیص داده می‌شود.

۴-۴. طراحی ابعاد مکانیزم

ابعاد این ربات به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که از نظر ارگونومی با شرایط عملی محیط عمل، جراح و بیمار

هماهنگی داشته باشد. به منظور جلوگیری از ایجاد مانع برای دید جراح، حداقل ارتفاع بخش تحتانی سر ربات (کلگی دو درجه آزادی)، ۱۸۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده. به این ترتیب با توجه به ابعاد مدول دو درجه آزادی انتخاب شده، حداقل ارتفاع کاری ربات به منظور پوشش فضای کاری مورد نیاز، ۱۹۷ Cm و حداکثر آن ۲۳۲ Cm می‌باشد. از آنجا که حین عمل جراحی لاپاروسکوپی، تخت جراحی در حداقل ارتفاع خود یعنی ۸۰ Cm تنظیم می‌شود، با در نظر گرفتن حداقل ارتفاع ۲۰ Cm برای شکم بیمار، نقطه‌ی ورود به شکم در ارتفاع ۱۰۰ Cm قرار می‌گیرد. پایین ترین حالت کاری سر ربات موقعی است که لاپاروسکوپ را به صورت افقی گرفته و قصد ورود به شکم را دارد. با در نظر گرفتن طول ۳۰ Cm برای لاپاروسکوپ و حداقل ارتفاع ۱۸۰ Cm برای بخش تحتانی کلگی ربات، طول میله‌ی انتهایی ربات ۸۵ Cm قابل محاسبه است (شکل ۴-۱۹).

به منظور اینکه ربات بتواند با فاصله‌ی مناسبی از تخت بیمار عمل نگهداری لاپاروسکوپ را انجام دهد. طول رابط افقی ربات ۹۶۵mm در نظر گرفته شده است. بالاترین ارتفاع ربات در هنگامی است که لاپاروسکوپ را در امتداد قائم و خارج از بدن بیمار نگهداری کرده، به این ترتیب بازه‌ی حرکتی محور خطی معادل ۳۵ Cm قابل محاسبه است.



شکل ۴-۱۹. ابعاد کلی مکانیزم

فصل پنجم

تحلیل سینماتیکی - دینامیکی و معیارهای کمی فضای کاری

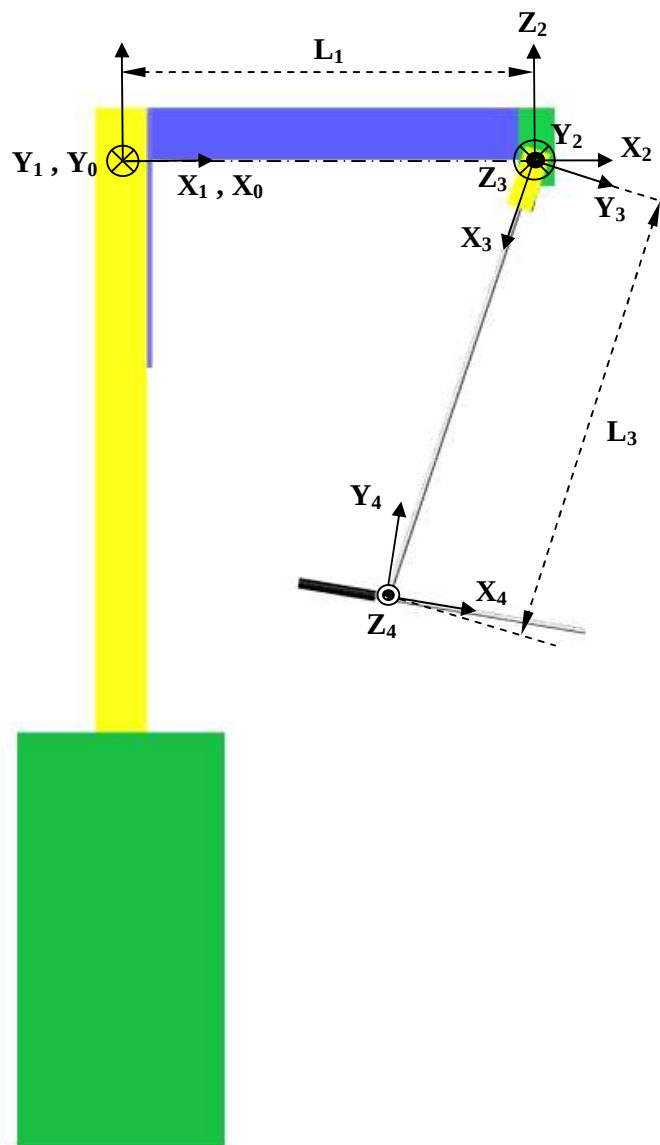
۵-۱. مقدمه

همانطور که در فصل قبل بیان شده، مکانیزم نهایی انتخاب شده برای ربات دارای سه مفصل فعال و یک مفصل غیر فعال می‌باشد. مفصل غیر فعال که در واقع چهارمین محور حرکتی ربات است به صورت یک لولا عمل کرده و به لاپاروسکوپ اجازه می‌دهد به صورت غیر فعال خود را به محل ورود به شکم در راستای قائم انطباق دهد. از آنجا که این محور غیر فعال است و گشتاوری روی آن اعمال نمی‌شود در فرایند تحلیل سینماتیکی فقط به منظور تعیین موقعیت و جهت گیری لاپاروسکوپ و مشخص شدن محل ورود به شکم زاویه‌ی آن اندازه گیری شده و سپس با اعمال کنترل روی سه محور فعال ربات لاپاروسکوپ را در جهت دلخواه حرکت می‌دهد. به طور مثال به منظور ایجاد بزرگنمایی مثبت/ منفی، ربات ابتدا زاویه‌ی محور چهار را خوانده و سپس با تشخیص راستای لاپاروسکوپ، گیره‌ی انتهایی بازوی خود را در راستای لاپاروسکوپ حرکت می‌دهد. به منظور تحلیل این مکانیزم از روش نمادگذاری بیان شده در مرجع [56] استفاده شده است. به طور مثال برای نشان دادن کسینوس زاویه‌ای مانند θ_1 ، از هر یک از صورت‌های c_1 یا $c\theta_1$ استفاده شده است.

۵-۲. سینماتیک مستقیم

به منظور حل مسأله‌ی سینماتیک مستقیم ربات ابتدا بایستی برای تعیین پارامترهای دناویت- هارتنبرگ، چهارچوب‌های لازم را برای رابط‌های ربات تعریف کرد. طبق قرارداد دناویت- هارتنبرگ [56] این چهارچوب‌ها تعریف شده و طبق شکل (۵-۱) به رابط‌ها متصل شده‌اند.

$$Z_1, Z_0$$



شکل ۵-۱. چهارچوب‌های متصل به رابط‌ها

بر اساس این چهارچوب‌ها پارامترهای دناویت هارتنبرگ طبق آنچه در جدول (۵-۱) نشان داده شده قابل ارائه‌اند.

جدول ۵-۱. پارامترهای دناویت- هارتنبرگ برای مکانیزم کروی- استوانه‌ای ایستاده

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	v_i
۱	۰	۰	d_1	۰
۲	۰	L_1	۰	v_2
۳	۹۰	۰	۰	v_3
۴	۰	L_3	۰	v_4

با استفاده از این پارامترها و ماتریس تبدیل کلی ${}^{i-1}_iT$ [56]، که در رابطه (۵-۱) آورده شده، می‌توان ماتریس تبدیل هر

دستگاه نسبت به دستگاه قبلی را به‌دست آورد.

(۵-۱)

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

با جایگزین کردن پارامترهای دناویت-هارتنبِروگ در رابطه‌ی (۵-۱) داریم:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_1 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۵-۲) \text{ و } (۵-۳)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^3_4T = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & l_2 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۵-۴) \text{ و } (۵-۵)$$

با ضرب متوالی این ماتریس‌ها خواهیم داشت:

$${}^2_4T = {}^2_3T {}^3_4T = \begin{bmatrix} c_{34} & -s_{34} & 0 & l_3c_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_{34} & c_{34} & 0 & l_3s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1_4T = {}^1_2T {}^2_4T = \begin{bmatrix} c_2c_{34} & -c_2s_{34} & s_2 & l_3c_2c_3 + l_1 \\ s_2c_{34} & -s_2s_{34} & -c_2 & l_3s_2c_3 \\ s_{34} & c_{34} & 0 & l_3s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_4T = {}^0_1T {}^1_4T = \begin{bmatrix} c_2c_{34} & -c_2s_{34} & s_2 & l_3c_2c_3 + l_1 \\ s_2c_{34} & -s_2s_{34} & -c_2 & l_3s_2c_3 \\ s_{34} & c_{34} & 0 & l_3s_3 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۵-۶) \text{ تا } (۵-۸)$$

ماتریس تبدیل ${}^0T_4$ در رابطه‌ی (۵-۸) که موقعیت و جهت‌گیری چهار چوب متصل به لاپاروسکوپ را نسبت به چهارچوب پایه‌ی ربات معرفی می‌کند در واقع جواب مسأله‌ی سینماتیک مستقیم ربات می‌باشد. یعنی با معلوم بودن متغیرهای مفصلی ربات ($d_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$) و با جایگزینی آن‌ها در رابطه (۵-۸) می‌توان مکان و جهت‌گیری چهارچوب متصل به لاپاروسکوپ را نسبت به چهارچوب پایه‌ی ربات به دست آورد.

۵-۳. سینماتیک وارون

با مساوی قراردادن ماتریس تبدیل ${}^0T_4$ با ماتریس کلی توصیف آخرین رابط ربات با درایه‌های Γ_{ij} می‌توان به معادلات سینماتیک وارون دست یافت. از آنجا که مکانیزم ربات بسیار ساده بوده و زاویه‌ی پیچش رابط‌ها همگی صفر یا نود درجه می‌باشند، حل معادلات سینماتیک معکوس بسیار ساده بوده و ربات دارای حل بسته است. در این محاسبات با توجه به فضای کاری مورد نیاز ربات محدوده‌ی کاری زوایای مفصلی طبق روابط (۵-۹) در نظر گرفته شده‌اند. در این محدوده ربات قادر است فضای یک نیم‌کره روی سطح بدن بیمار به شعاع 30 cm و به مرکزیت محل ورود به شکم را به طور کامل پوشش داده و در صورت نیاز از این محدوده خارج شود.

$$\begin{aligned} 0 &\leq d_1 \leq 350\text{mm} \\ -180^\circ &\leq \theta_2 \leq 180^\circ \\ -160^\circ &\leq \theta_3 \leq -90^\circ \\ 0 &\leq \theta_4 \leq 108^\circ \end{aligned} \quad (5-9)$$

به این ترتیب با توجه به محدوده‌ی زوایای مفصلی مورد نیاز، حل معادلات سینماتیک وارون طبق آنچه در روابط

(۵-۱۰) آورده شده قابل ارائه‌اند:

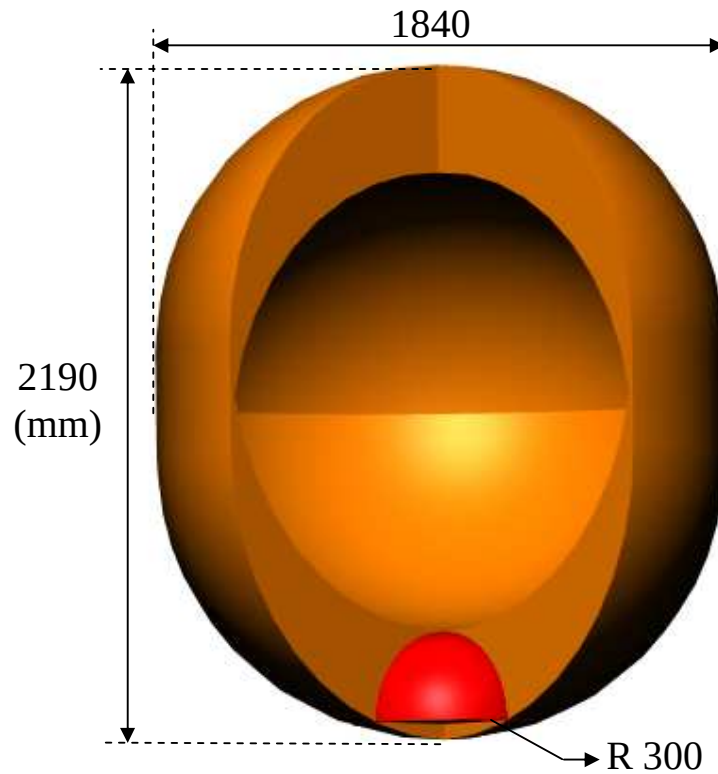
$$\begin{aligned}
\theta_2 &= \text{Atan2}(r_{13}, -r_{23}) \\
\text{if } \theta_2 &\neq 0 \text{ or } \pi \\
\text{else } C_3 &= r_{24} / L_3 S_2 \\
C_3 &= (r_{14} - L_1) / (L_3 C_2) \\
S_3 &= -\sqrt{1 - C_3^2} \\
\theta_3 &= \text{Atan2}(S_3, C_3) \\
\theta_{34} &= \text{Atan2}(r_{31}, r_{32}) \\
\theta_4 &= \theta_{34} - \theta_3 \\
d_1 &= r_{34} - L_3 S_3
\end{aligned}
\tag{۵-۱۰}$$

به این ترتیب با در اختیار داشتن ماتریس تبدیل معرفی کننده‌ی جهت‌گیری و موقعیت چهارچوب متصل به لاپاروسکوپ می‌توان با استفاده از روابط (۵-۱۰)، متغیرهای مفصلی را به طور یکتا به دست آورد. شایان ذکر است مساله‌ی سینماتیک وارون این ربات با توجه به محدودیت اعمالی بر مفصل‌ها فقط یک سری جواب دارد.

به منظور بررسی صحت حل مساله‌ی سینماتیک مستقیم و وارون، حل‌های مربوطه به صورت دو زیر برنامه‌ی مستقل در نرم افزار MATLAB نوشته شدند. سپس با استفاده از یک سری متغیرهای مفصلی دلخواه مساله‌ی سینماتیک مستقیم حل شده و جواب‌های حاصل از آن به عنوان ورودی مساله سینماتیک وارون در نظر گرفته شده است. این فرایند در بخش ضمایم ارائه شده است. برابر بودن جواب مساله‌ی سینماتیک وارون با مقادیر متغیرهای مفصلی دلخواه اولیه صحت معادلات به دست آمده را نشان می‌دهد.

۵-۴. فضای کاری

با توجه به ابعاد در نظر گرفته شده برای طول رابط‌ها، فضای کاری ربات بدون در نظر گرفتن محدودیت برای زوایای مفصلی دورانی طبق آنچه در شکل (۵-۲) نشان داده شده است قابل ترسیم است. ناحیه‌ی کروی تحتانی که به صورت یک نیم کره‌ی کوچک به شعاع 300 mm می‌باشد، فضای کاری مورد استفاده توسط گیره‌ی ربات در حین عمل لاپاروسکوپی می‌باشد. کل فضای کاری از سطح یک کره به قطر 1840 mm ایجاد شده که به اندازه‌ی 350 mm در امتداد قائم لغزانده شده است.



شکل ۵-۲. فضای کاری برش خورده‌ی مکانیزم کروی- استوانه‌ای در نظر گرفته شده برای ربات

۵-۴-۱. معیارهای کمی مشخصات فضای کاری

به منظور تعیین نقاط تکین و سایر معیارهای کمی مشخصات فضای کاری، ابتدا باید ماتریس ژاکوبین را برای سه محور فعال اول محاسبه نماییم. با مشتق گیری نسبت به متغیرهای مفصلی d_1, θ_2, θ_3 (از مقادیر ستون چهارم ماتریس ${}^0_4T$ که در واقع موقعیت گیره‌ی ربات را نسبت به مختصات پایه‌ی ربات بیان می‌کند، ماتریس ژاکوبین طبق رابطه‌ی (۵-۱۱) استخراج می‌شود.

$${}^0J(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & -l_3 s_2 c_3 & -l_3 c_2 s_3 \\ 0 & l_3 c_2 c_3 & -l_3 s_2 s_3 \\ 1 & 0 & l_3 c_3 \end{bmatrix} \quad (۵-۱۱)$$

• نقاط تکین

به منظور تعیین نقاط تکین در محدوده‌ی کاری ربات بایستی دترمینان ژاکوبین برابر صفر قرار داده شود. با محاسبه‌ی

دترمینان ماتریس ارائه شده در رابطه (۵-۱۱) طبق رابطه (۵-۱۲) داریم:

$$\det(J(\theta)) = l_3^2 s_3 c_3 \quad (۵-۱۲)$$

با مساوی صفر قرار دادن رابطه (۵-۱۲) نقاط تکین معادل $\theta_3 = -180, -90, 0, 90, 180^\circ$ به دست می‌آیند که نقاط

$\theta_3 = -180, 0, 180^\circ$ حالت تکین از نوع مرز فضای کاری و نقاط $\theta_3 = -90, 90^\circ$ حالت‌های تکینگی داخل فضای

کاری می‌باشند. البته با توجه به محدوده‌ی کاری در نظر گرفته شده برای متغیرهای مفصلی (روابط (۵-۹)) ربات در هیچ

یک از این حالات تکین قرار نگرفته و فقط در مواردی نادر در مرز محدوده‌ی کاری خود به حالت $\theta_3 = -90^\circ$ نزدیک

می‌شود. در این حالت ربات یک درجه آزادی حرکتی خود یعنی اثر v_2 را از دست می‌دهد. بنابراین بایستی از نزدیک

شدن ربات به این نقطه (حالتی که میله‌ی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ به صورت قائم در می‌آید و روی خط قائم گذرنده از

نقطه‌ی ورود به شکم قرار می‌گیرد) جلوگیری شود. شایان ذکر است با توجه به شرایط عمل و وجود تروکار هیچ گاه

فاصله‌ی شعاعی گیره‌ی ربات از این نقطه از 50 mm کمتر نمی‌شود.

• شاخص طولی سازه‌ای^۱

به منظور بررسی معیار شاخص طولی سازه‌ای، ابتدا بایستی مجموع طولی^۲ بازوی مکانیکی ماهر [56] به صورت

زیر محاسبه شود:

$$L = \sum_{i=1}^N (a_{i-1} + d_i) = 350 + 965 + 920 = 2235(mm) \quad (۵-۱۳)$$

در مرجع [57] شاخص طولی سازه‌ای، Q_L برابر با نسبت مجموع طولی بازو به ریشه‌ی سوم حجم فضای کاری تعریف

شده است، به این ترتیب با اندازه‌گیری حجم فضای کاری که معادل $W=1850108287.7 \text{ (mm}^3\text{)}$ به دست آمده

است، می‌توان شاخص طولی سازه‌ای این ربات را طبق رابطه (۵-۱۴) محاسبه کرد:

$$Q_L = L / \sqrt[3]{W} = 1.82 \quad (۵-۱۴)$$

از آنجا که طرح خوب طرحی است که در آن بازو دارای مجموع طولی کوچک و در عین حال حجم فضای کاری

^۱ Structural length index

^۲ Length sum

بزرگ باشد [56]، مقدار Q_L کوچک معیاری از بهینه بودن طرح است. مقدار Q_L ربات طراحی شده در این پژوهش نسبت به سایر ربات‌ها از جمله بازوهای مکانیکی دکارتی که مقدار مینیم Q_L آن‌ها سه می باشد [56]، بسیار مناسب است.

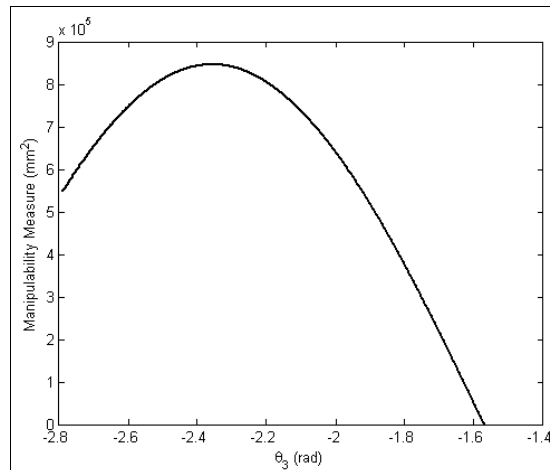
• معیار مهارت^۱

این معیار که در واقع معیاری از توانایی ربات در ایجاد حرکات یکنواخت در کلیه‌ی راستاها در فضای کاری خودش است و توانایی ربات را در عملکرد مناسب در کلیه‌ی جهات به نمایش می‌گذارد در مرجع [58] برای بازویی که درجه‌ی آزادی زاید نداشته باشد به صورت $\omega = |\det(J(\theta))|$ تعریف شده است.

در این رابطه $J(v)$ ماتریس ژاکوبین ربات می‌باشد. به این ترتیب معیار مهارت ربات طراحی شده در این پروژه به صورت زیر قابل استخراج است:

$$\omega = |\det(J(\theta))| = |l_3^2 S_3 C_3| \quad (5-15)$$

مقادیر معیار مهارت این ربات بر حسب مقادیر متغیر v_3 در محدوده‌ی ذکر شده در روابط (5-9) یعنی فضای کاری ربات قابل استخراج و ترسیم در یک نمودار دو بعدی می‌باشد. این نمودار در شکل (5-3) نشان داده شده است. هر بازوی مکانیکی خوب دارای نواحی بزرگی از فضای کاری با مقادیر بزرگ معیار مهارت کاری می‌باشد [56]. در واقع در یک طرح خوب بایستی معیار مهارت تا حد ممکن از مقدار صفر فاصله گرفته یا به عبارت دیگر در فضای مورد نظر از نقاط تکین خود به دور باشد.



¹ Manipulability Measure

شکل ۵-۳. مقادیر معیار مهارت در فضای کاری مکانیزم چهارم

همانطور که در شکل (۵-۳) مشخص است، مقادیر معیار مهارت این مکانیزم در داخل محدوده‌ی کاری بسیار بزرگ و مناسب است.

۵-۵. ژاکوبی، سرعت‌ها و نیروهای استاتیکی

در این بخش به منظور محاسبه‌ی سرعت مجری نهایی ربات (محل گرفتن لاپاروسکوپ) و نیروهای استاتیکی یعنی گشتاورها و نیروهای اعمالی در مفاصل در حالت استاتیکی، طبق روش ارائه شده در مرجع [56] صفحات (182-191) یعنی اشاعه‌ی سرعت از رابطی به رابط دیگر عمل شده است. طبق مرجع [56] برای مفاصل دورانی، سرعت خطی و زاویه‌ای برای رابط $i+1$ در چهارچوب $\{i+1\}$ طبق روابط (۵-۱۶) و (۵-۱۷) قابل محاسبه است:

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}_i R ({}^i v_i + {}^i \omega_i \times {}^i P_{i+1}) \quad (۵-۱۶)$$

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_i R {}^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (۵-۱۷)$$

برای حالتی که مفصل $i+1$ کشویی است داریم:

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_i R {}^i \omega_i \quad (۵-۱۸)$$

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}_i R ({}^i v_i + {}^i \omega_i \times {}^i P_{i+1}) + \dot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (۵-۱۹)$$

به این ترتیب با استفاده‌ی متوالی از روابط (۵-۱۶) تا (۵-۱۹) و روابط (۵-۲) تا (۵-۵) برای استخراج ماتریس دوران هر چهارچوب نسبت به چهارچوب بعدی به ازای مقادیر i از صفر تا سه، سرعت رابط‌ها طبق روابط (۵-۲۰) تا (۵-۲۷) قابل محاسبه‌اند:

$${}^1\omega_1 = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (۵-۲۰)$$

$${}^1v_1 = [0 \quad 0 \quad d_1]^T \quad (۵-۲۱)$$

$${}^2\omega_2 = [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_2]^T \quad (۵-۲۲)$$

$${}^2v_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dot{d}_1 \end{bmatrix}^T \quad (23-5)$$

$${}^3\omega_3 = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 s_3 & \dot{\theta}_2 c_3 & \dot{\theta}_3 \end{bmatrix}^T \quad (24-5)$$

$${}^3v_3 = \begin{bmatrix} \dot{d}_1 s_3 & \dot{d}_1 c_3 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (25-5)$$

$${}^4\omega_4 = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 s_{34} & \dot{\theta}_2 c_{34} & \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4 \end{bmatrix}^T \quad (26-5)$$

$${}^4v_4 = \begin{bmatrix} \dot{d}_1 s_{34} + \dot{\theta}_3 l_3 s_4 & \dot{d}_1 c_{34} + \dot{\theta}_3 l_3 c_4 & -\dot{\theta}_2 l_3 c_3 \end{bmatrix}^T \quad (27-5)$$

حال با استفاده از روابط (26-5) و (27-5) و با توجه به رابطه (28-5) که ارتباط بین ماتریس ژاکوبی، متغیرهای مفصلی و سرعت‌های خطی و زاویه‌ای مرجع مختصات {4} را نشان می‌دهد می‌توان ماتریس ژاکوبین در دستگاه مختصات {4} را طبق رابطه (29-5) به دست آورد.

$${}^4v = {}^4J(\theta) \begin{bmatrix} \dot{d}_1 & \dot{\theta}_2 & \dot{\theta}_3 & \dot{\theta}_4 \end{bmatrix}^T \quad (28-5)$$

$${}^4J(\theta) = \begin{bmatrix} s_{34} & 0 & l_3 s_4 & 0 \\ c_{34} & 0 & l_3 c_4 & 0 \\ 0 & -l_3 c_3 & 0 & 0 \\ 0 & s_{34} & 0 & 0 \\ 0 & c_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (29-5)$$

برای محاسبه ماتریس ژاکوبی در دستگاه مختصات پایه‌ی ربات با استخراج ${}^0_4R$ از رابطه (5-8) باید از رابطه (5-30)

استفاده شود [56]:

$${}^0 J(\theta) = \begin{bmatrix} c_2 c_{34} & -c_2 s_{34} & s_2 & 0 & 0 & 0 \\ s_2 c_{34} & -s_2 s_{34} & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ s_{34} & c_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_2 c_{34} & -c_2 s_{34} & s_2 \\ 0 & 0 & 0 & s_2 c_{34} & -s_2 s_{34} & -c_2 \\ 0 & 0 & 0 & s_{34} & c_{34} & 0 \end{bmatrix} {}^4 J(\theta) \quad (30-5)$$

به این ترتیب ژاکوبین در مختصات پایه‌ی ربات به صورت ساده شده در رابطه (31-5) قابل استخراج است:

$${}^0 J(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & -l_3 s_2 c_3 & -l_3 c_2 s_3 & 0 \\ 0 & l_3 c_2 c_3 & -l_3 s_2 s_3 & 0 \\ 1 & 0 & l_3 c_3 & 0 \\ 0 & 0 & s_2 & s_2 \\ 0 & 0 & -c_2 & -c_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (31-5)$$

حال با استفاده از رابطه (32-5) سرعت‌های خطی و زاویه‌ای مجری نهایی ربات در دستگاه مختصات پایه‌ی ربات قابل

استخراج است. داریم:

$${}^0 v = {}^0 J(\theta) \begin{bmatrix} \dot{d}_1 & \dot{\theta}_2 & \dot{\theta}_3 & \dot{\theta}_4 \end{bmatrix}^T \quad (32-5)$$

به این ترتیب سرعت‌های خطی مرکز دستگاه مختصات 4 (منطبق بر محل گرفتن لاپاروسکوپ) و سرعت‌های زاویه‌ای

دستگاه مختصات 4 (لاپاروسکوپ)، بیان در مختصات پایه‌ی روبات طبق روابط (33-5) تا (38-5) قابل ارائه‌اند.

$$v_4)_{x_0} = -l_3 s_2 c_3 \dot{\theta}_2 - l_3 c_2 s_3 \dot{\theta}_3 \quad (33-5)$$

$$v_4)_{y_0} = l_3 c_2 c_3 \dot{\theta}_2 - l_3 s_2 s_3 \dot{\theta}_3 \quad (34-5)$$

$$v_4)_{z_0} = \dot{d}_1 + l_3 c_3 \dot{\theta}_3 \quad (35-5)$$

$$\omega_4)_{x_0} = s_2 (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \quad (36-5)$$

$$\omega_4)_{y_0} = -c_2(\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \quad (37-5)$$

$$\omega_4)_{z_0} = \dot{\theta}_2 \quad (38-5)$$

به این ترتیب با داشتن سرعت و مقادیر متغیرهای مفصلی، مقادیر سرعت خطی و زاویه‌ای مجری نهایی ربات قابل محاسبه است.

به منظور محاسبه‌ی گشتاورها و نیروهای مفصلی در حالت استاتیکی طبق اثبات ارائه شده در مرجع [56] از رابطه (5-5) استفاده می‌شود. داریم:

$$\tau = {}^4J^T {}^4F \quad (39-5)$$

در این رابطه τ نیروها (برای مفاصل کشویی) و گشتاورهای (برای مفاصل دورانی) مفصلی ربات در حالت استاتیکی بوده و ${}^4J^T$ نیز ترانزاده‌ی ماتریس ژاکوبین در دستگاه ۴ می‌باشد که از رابطه (5-۲۹) قابل استخراج است. ${}^4F$ نیز مقادیر نیروها و گشتاورهایی است که مجری نهایی ربات به محیط وارد می‌کند. داریم:

$$\tau = \begin{bmatrix} s_{34} & 0 & l_3 s_4 & 0 \\ c_{34} & 0 & l_3 c_4 & 0 \\ 0 & -l_3 c_3 & 0 & 0 \\ 0 & s_{34} & 0 & 0 \\ 0 & c_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x s_{34} + f_y c_{34} \\ -f_z l_3 c_3 + \tau_x s_{34} + \tau_y c_{34} \\ f_x l_3 s_4 + f_y l_3 c_4 + \tau_z \\ \tau_z \end{bmatrix} \quad (40-5)$$

در این رابطه مقادیر ماتریس 6×1 نشان داده شده همان مقادیر نیروها و گشتاورهایی است که مجری نهایی ربات به محیط وارد می‌کند. از آنجا که در این مکانیزم مفصل نهایی یک مفصل لولایی غیرفعال است ربات قادر نیست در محل مجری نهایی خود گشتاوری را در راستای Z به محیط اعمال کند. بنابراین در این روابط τ_z برابر صفر می‌باشد. از آنجا که در رابطه (5-۳۹) از وزن رابطها صرفنظر شده و به این دلیل که در کاربرد این ربات نیروهای ایجاد شده در مجری نهایی بسیار کمتر از نیروهای حاصل از وزن رابطها هستند، بایستی نیروها و گشتاورهای حاصل شده از وزن رابطها که در این کاربرد به واقع مقادیر اصلی به حساب می‌آیند نیز به روابط بالا اضافه شوند. با در نظر گرفتن مقادیر m_1 و m_3 برای وزن رابطهای یک و سه (با توجه به شکل (5-۱) طول و وزن رابط ۲ صفر می‌باشد)، مقادیر نیرو و گشتاور استاتیکی ایجاد

شده در عملگرهای مفاصل یک تا سه بر اثر نیروی اعمالی توسط مجری نهایی و وزن رابطها از روابط (۵-۴۱) تا (۵-۴۳) قابل استخراج می‌باشد. داریم:

$$\tau_1 = f_x s_{34} + f_y c_{34} + (m_1 + m_3)g \quad (۵-۴۱)$$

$$\tau_2 = -f_z l_3 c_3 + \tau_x s_{34} + \tau_y c_{34} \quad (۵-۴۲)$$

$$\tau_3 = f_x l_3 s_4 + f_y l_3 c_4 + m_3 g l_3 / 2 c_3 \quad (۵-۴۳)$$

در این روابط τ_1 نیروی محور یک و τ_2 و τ_3 به ترتیب گشتاورهای اعمالی در محورهای ۲ و ۳ می‌باشند. نکته‌ی قابل توجه در مورد این ربات آن است که نیروهای ایجاد شده در مجری نهایی بسیار ناچیز بوده و نسبت به وزن رابطها قابل صرفنظر کردن می‌باشند.

۵-۶. محاسبه‌ی گشتاورها و نیروهای مفصلی در حالت دینامیکی

۵-۶-۱. مقدمه

در این بخش محاسبه‌ی نیروها و گشتاورهای مفصلی متناظر با مسیری مفروض برای ربات را مورد توجه قرار می‌دهیم. فرض می‌کنیم مکان، سرعت و شتاب متغیرهای مفصلی را می‌دانیم. با این دانسته‌ها و با داشتن اطلاعات سینماتیکی و توزیع جرم در ربات، می‌توانیم گشتاورهای مفصلی لازم برای ایجاد حرکت مورد نظر را محاسبه کنیم. الگوریتم استفاده شده در این بخش الگوریتم دینامیکی تکراری نیوتن-اولر می‌باشد که لوه^۱ و همکارانش در مرجع [59] ارائه کرده‌اند.

۵-۶-۲. روش: الگوریتم دینامیکی تکراری نیوتن-اولر

الگوریتم کامل محاسبه‌ی گشتاورهای مفصلی با استفاده از حرکت مفصلها از دو قسمت تشکیل شده‌است. در قسمت اول یا همان محاسبات تکراری بیرونی، سرعتها و شتابهای رابطها با استفاده از روابط تکراری، از رابط ۱ تا

¹ Luh

رابط n محاسبه شده و معادله‌های نیوتن-اولر برای هر رابط نوشته می‌شود. در قسمت دوم یا همان محاسبات تکراری درونی، نیروها و گشتاورهای بین رابط‌ها و گشتاورهای کارانداز مفصل به طور پی در پی از رابط n به رابط ۱ محاسبه می‌شوند. این معادله‌ها طبق آنچه در مرجع [56] آمده در روابط (۵-۴۴) تا (۵-۵۳) خلاصه شده‌اند.

محاسبات تکراری بیرونی: ($\dot{i}$ از صفر تا دو) برای مفصل لولایی عبارتند از:

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (۵-۴۴)$$

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i + {}^{i+1}R^i \omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (۵-۴۵)$$

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}R^i \left[{}^i\dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1}) + {}^i\dot{v}_i \right] \quad (۵-۴۶)$$

این روابط برای مفصل کشویی عبارتند از:

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R^i \omega_i \quad (۵-۴۷)$$

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i \quad (۵-۴۸)$$

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = & {}^{i+1}R^i \left({}^i\dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1}) + {}^i\dot{v}_i \right) \\ & + 2 {}^{i+1}\omega_{i+1} \times \dot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \end{aligned} \quad (۵-۴۹)$$

از این مرحله به بعد روابط مفصل کشویی و لولایی یکسان می‌باشند.

$${}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} = {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times ({}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}}) + {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} \quad (۵-۵۰)$$

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} \quad (۵-۵۱)$$

$${}^{i+1}N_{i+1} = {}^{C_{i+1}}I_{i+1} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{C_{i+1}}I_{i+1} {}^{i+1}\omega_{i+1} \quad (۵-۵۲)$$

محاسبات تکراری درونی: ($\dot{i}$ از سه تا یک) عبارتند از:

$${}^i f_i = {}^iR^{i+1} f_{i+1} + {}^iF_i \quad (۵-۵۳)$$

$${}^i n_i = {}^iN_i + {}^iR^{i+1} n_{i+1} + {}^iP_{C_i} \times {}^iF_i + {}^iP_{i+1} \times {}^iR^{i+1} f_{i+1} \quad (۵-۵۴)$$

مقادیر f سه مولفه‌ی نیروی ایجاد شده در مفصل و مقادیر n مولفه‌های گشتاوری ایجاد شده در مفصل می‌باشند. چنانچه مفصل کشویی باشد مولفه‌ی Z بردار f نیروی ایجاد شده توسط عملگر کشویی بوده و چنانچه مفصل دورانی باشد مولفه‌ی

z بردار n گشتاور ایجاد شده توسط عملگر دورانی می‌باشد.

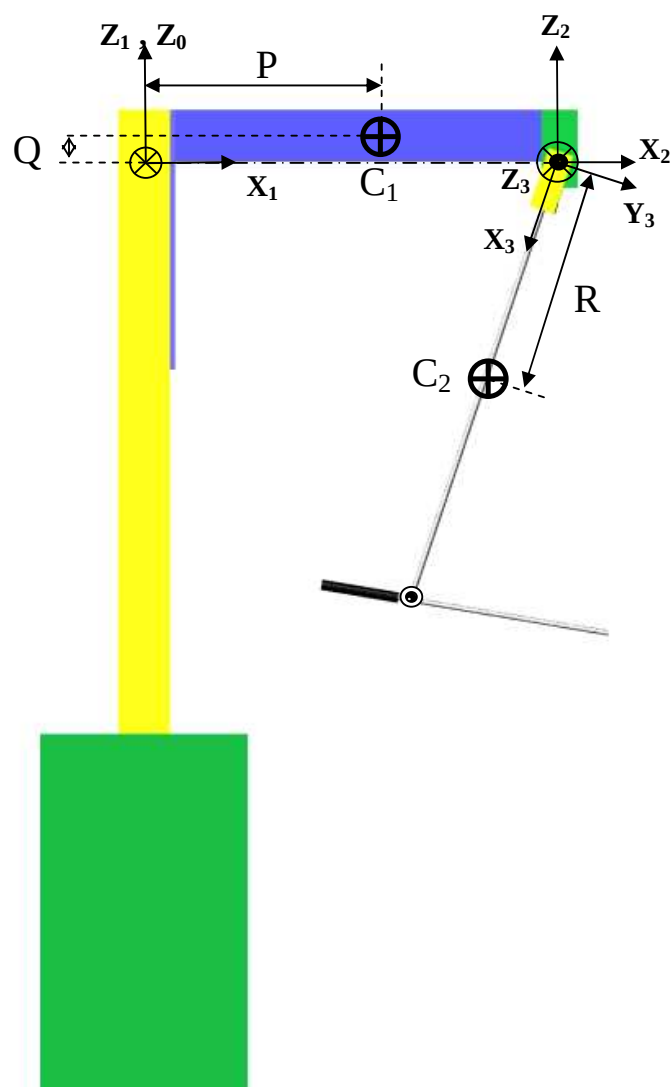
۳-۶-۵. نتیجه: نیروها و گشتاورهای مفصلی در حالت دینامیکی

در اینجا با استفاده از الگوریتم بیان شده در بخش قبل می‌توان گشتاورها و نیروهای مفصلی را در حالت دینامیکی برای ربات مورد نظر محاسبه کرد. از آنجا که مفصل چهارم غیر فعال است و گشتاوری در آن اعمال نمی‌شود، مساله را فقط برای سه محور فعال حل می‌نماییم. ابتدا بایستی مکان مرکز جرم هر رابط مشخص شود. طبق شکل (۴-۵) مکان مفروض برای مرکز جرم رابط‌ها به صورت بردارهای ارائه‌شده در روابط (۵-۵۵) تا (۵-۵۷) قابل ارائه‌اند.

$${}^1P_{C_1} = P\hat{X}_1 + Q\hat{Z}_1 \quad (۵-۵۵)$$

$${}^2P_{C_2} = 0 \quad (۵-۵۶)$$

$${}^3P_{C_3} = R\hat{X}_3 \quad (۵-۵۷)$$



شکل ۵-۴. مکان مرکز جرم رابط‌ها

از آنجا که رابط یک حرکت دورانی ندارد تانسور لختی آن در محاسبات وارد نمی‌شود. تانسور لختی برای رابط دو، صفر و برای رابط سه در رابطه (۵-۵۸) ارائه شده است.

$$c_3 I_3 = \frac{m_3 l_3^2}{12} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-58)$$

همانطور که قبلاً بیان شد در این کاربرد نیرویی که بر مجری نهایی وارد می‌شود بسیار ناچیز بوده و نسبت به وزن رابط‌ها

قابل صرفنظر کردن است. بنابراین داریم:

$${}^4f_4 = 0 \quad (5-59)$$

$${}^4n_4 = 0 \quad (5-60)$$

از آنجا که پایه‌ی ربات در حین کار دوران نمی‌کند، داریم:

$$\omega_0 = 0 \quad (5-61)$$

$$\dot{\omega}_0 = 0 \quad (5-62)$$

به منظور شمول نیروهای گرانی در معادلات فرض می‌کنیم پایه‌ی ربات با شتاب g به سمت بالا حرکت می‌کند. داریم:

$${}^0\dot{v}_0 = g\hat{Z}_0 \quad (5-63)$$

با استفاده از روابط (5-47) تا (5-52) محاسبات تکراری بیرونی برای رابط یک عبارتند از:

$${}^1\omega_1 = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (5-64)$$

$${}^1\dot{\omega}_1 = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (5-65)$$

$${}^1\dot{v}_1 = [0 \quad 0 \quad g + \ddot{d}_1]^T \quad (5-66)$$

$${}^1\dot{v}_{C_1} = [0 \quad 0 \quad g + \ddot{d}_1]^T \quad (5-67)$$

$${}^1F_1 = [0 \quad 0 \quad m_1(g + \ddot{d}_1)]^T \quad (5-68)$$

$${}^1N_1 = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (5-69)$$

محاسبات تکراری بیرونی برای رابط دو با استفاده از روابط (5-44) تا (5-46) و (5-50) تا (5-52) عبارتند از:

$${}^2\omega_2 = [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_2]^T \quad (5-70)$$

$${}^2\dot{\omega}_2 = [0 \quad 0 \quad \ddot{\theta}_2]^T \quad (5-71)$$

$${}^2\dot{v}_2 = [0 \quad 0 \quad g + \ddot{d}_1]^T \quad (5-72)$$

$${}^2\dot{v}_{C_2} = [0 \quad 0 \quad g + \ddot{d}_1]^T \quad (5-73)$$

$${}^2F_2 = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (5-74)$$

$${}^2N_2 = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (5-75)$$

به همین ترتیب محاسبات تکراری بیرونی برای رابط سه با استفاده از روابط (5-44) تا (5-46) و (5-50) تا (5-52)

عبارتند از:

$${}^3\omega_3 = [\dot{\theta}_2 s_3 \quad \dot{\theta}_2 c_3 \quad \dot{\theta}_3]^T \quad (۷۶-۵)$$

$${}^3\dot{\omega}_3 = [\ddot{\theta}_2 s_3 \quad \ddot{\theta}_2 c_3 \quad \ddot{\theta}_3]^T \quad (۷۷-۵)$$

$${}^3\dot{v}_3 = [s_3(g + \ddot{d}_1) \quad c_3(g + \ddot{d}_1) \quad 0]^T \quad (۷۸-۵)$$

$${}^3\dot{v}_{c_3} = \begin{bmatrix} -Rc_3^2\dot{\theta}_2^2 - R\dot{\theta}_3^2 + s_3(g + \ddot{d}_1) \\ R\ddot{\theta}_3 + Rs_3c_3\dot{\theta}_2^2 + c_3(g + \ddot{d}_1) \\ -Rc_3\ddot{\theta}_2 + Rs_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (۷۹-۵)$$

$${}^3F_3 = m_3 \begin{bmatrix} -Rc_3^2\dot{\theta}_2^2 - R\dot{\theta}_3^2 + s_3(g + \ddot{d}_1) \\ R\ddot{\theta}_3 + Rs_3c_3\dot{\theta}_2^2 + c_3(g + \ddot{d}_1) \\ -Rc_3\ddot{\theta}_2 + Rs_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (۸۰-۵)$$

$${}^3N_3 = \frac{m_3 l_3^2}{12} \begin{bmatrix} 0 \\ c_3\ddot{\theta}_2 - s_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_3 + s_3c_3\dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} \quad (۸۱-۵)$$

با استفاده از روابط (۵-۵۳) و (۵-۵۴) محاسبات تکراری درونی برای رابط سه عبارتند از:

$${}^3f_3 = m_3 \begin{bmatrix} -Rc_3^2\dot{\theta}_2^2 - R\dot{\theta}_3^2 + s_3(g + \ddot{d}_1) \\ R\ddot{\theta}_3 + Rs_3c_3\dot{\theta}_2^2 + c_3(g + \ddot{d}_1) \\ -Rc_3\ddot{\theta}_2 + Rs_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (۸۲-۵)$$

$${}^3n_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ m_3 \left(\left(\frac{l_3^2}{12} + R^2 \right) (c_3\ddot{\theta}_2 - s_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3) \right) \\ m_3 \left(\left(\frac{l_3^2}{12} + R^2 \right) (\ddot{\theta}_3 + s_3c_3\dot{\theta}_2^2) + Rc_3(g + \ddot{d}_1) \right) \end{bmatrix} \quad (۸۳-۵)$$

رابطه (۵-۸۲) بیانگر نیروهای وارد بر مفصل سه و رابطه (۵-۸۳) بیانگر گشتاور وارده بر این مفصل در حالت دینامیکی

می‌باشد. مولفه‌ی Z رابطه (۵-۸۳) در واقع گشتاور ایجاد شده توسط عملگر محور سه بوده (رابطه (۵-۸۴)) و بقیه توسط

بدنه‌ی مفصل تحمل می‌شوند.

$$\tau_3 = m_3 \left(\left(\frac{l_3^2}{12} + R^2 \right) (\ddot{\theta}_3 + s_3c_3\dot{\theta}_2^2) + Rc_3(g + \ddot{d}_1) \right) \quad (۸۴-۵)$$

در این رابطه جمله‌ی $s_3c_3\dot{\theta}_2^2$ که شامل مجذور سرعت مفصل می‌باشد، بر اثر حضور نیروی گریز از مرکز ایجاد

شده است.

با استفاده از روابط (۵-۵۳) و (۵-۵۴) محاسبات تکراری درونی برای رابط دو عبارتند از:

$${}^2f_2 = m_3 \begin{bmatrix} -R(c_3\ddot{\theta}_2^2 + c_3\dot{\theta}_3^2 + s_3\ddot{\theta}_3) \\ R(c_3\ddot{\theta}_2 - s_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3) \\ R(c_3\ddot{\theta}_3 - s_3\dot{\theta}_3^2) + g + \ddot{d}_1 \end{bmatrix} \quad (۵-۸۵)$$

$${}^2n_2 = \begin{bmatrix} -m_3s_3\left(\frac{l_3^2}{12} + R^2\right)(c_3\ddot{\theta}_2 - s_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3) \\ -m_3\left(\left(\frac{l_3^2}{12} + R^2\right)(\ddot{\theta}_3 + s_3c_3\dot{\theta}_2^2) + Rc_3(g + \ddot{d}_1)\right) \\ m_3c_3\left(\frac{l_3^2}{12} + R^2\right)(c_3\ddot{\theta}_2 - s_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3) \end{bmatrix} \quad (۵-۸۶)$$

رابطه (۵-۸۵) بیانگر نیروهای وارد بر مفصل دو و رابطه (۵-۸۶) بیانگر گشتاور وارده بر این مفصل در حالت دینامیکی

می باشد. مولفه ی Z رابطه (۵-۸۶) در واقع گشتاور ایجاد شده توسط عملگر محور دو بوده (رابطه (۵-۸۷)) و بقیه توسط

بدنه ی مفصل تحمل می شوند.

$\tau_2 = m_3c_3\left(\frac{l_3^2}{12} + R^2\right)(c_3\ddot{\theta}_2 - s_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3)$	$(۵-۸۷)$
--	----------

در این رابطه جمله ی $s_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3$ که شامل حاصل ضرب سرعت زاویه ای دو مفصل متفاوت می باشد بر اثر حضور شتاب

کوریولیس ایجاد شده است.

با استفاده از روابط (۵-۵۳) و (۵-۵۴) محاسبات تکراری درونی برای رابط یک عبارتند از:

$${}^1f_1 = \begin{bmatrix} m_3\left(c_2\left(-R(c_3\dot{\theta}_2^2 + c_3\dot{\theta}_3^2 + s_3\ddot{\theta}_3)\right) - s_2\left(R(c_3\ddot{\theta}_2 - s_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3)\right)\right) \\ m_3\left(s_2\left(-R(c_3\dot{\theta}_2^2 + c_3\dot{\theta}_3^2 + s_3\ddot{\theta}_3)\right) + c_2\left(R(c_3\ddot{\theta}_2 - s_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3)\right)\right) \\ m_3R(c_3\ddot{\theta}_3 - s_3\dot{\theta}_3^2) + (m_1 + m_3)(g + \ddot{d}_1) \end{bmatrix} \quad (۵-۸۸)$$

(۵-۸۹)

$${}^1n_1 = \begin{bmatrix} m_3 \left(\left(\frac{l_3^2}{12} + R^2 \right) (-c_2 s_3 c_3 \ddot{\theta}_2 + c_2 s_3^2 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + s_2 \ddot{\theta}_3 + s_2 s_3 c_3 \dot{\theta}_2^2) + R s_2 c_3 (g + \ddot{d}_1) \right) \\ m_3 \left(\left(\frac{l_3^2}{12} + R^2 \right) ((s_2 s_3^2 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 - s_2 s_3 c_3 \ddot{\theta}_2) - (c_2 \ddot{\theta}_3 + c_2 s_3 c_3 \dot{\theta}_2^2)) \right) - P m_1 (g + \ddot{d}_1) \\ - R c_2 c_3 (g + \ddot{d}_1) - l_1 (R (c_3 \ddot{\theta}_3 - s_3 \dot{\theta}_3^2) + (g + \ddot{d}_1)) \\ m_3 c_3 \left(\frac{l_3^2}{12} + R^2 \right) (c_3 \ddot{\theta}_2 - s_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) + l_1 m_3 \left(s_2 (-R (c_3 \dot{\theta}_2^2 + c_3 \dot{\theta}_3^2 + s_3 \ddot{\theta}_3)) \right. \\ \left. + c_2 (R (c_3 \ddot{\theta}_2 - s_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3)) \right) \end{bmatrix}$$

رابطه (۵-۸۸) بیانگر نیروهای وارد بر مفصل یک و رابطه (۵-۸۹) بیانگر گشتاور وارده بر این مفصل در حالت دینامیکی

می‌باشد. مولفه‌ی Z رابطه (۵-۸۸) در واقع نیروی ایجاد شده توسط عملگر محور یک بوده (رابطه (۵-۹۰)) و بقیه توسط

بدنه‌ی مفصل تحمل می‌شوند.

$$\tau_1 = m_3 R (c_3 \ddot{\theta}_3 - s_3 \dot{\theta}_3^2) + (m_1 + m_3) (g + \ddot{d}_1) \quad (۵-۹۰)$$

در این روابط جملات شامل ضرب سرعت زاویه‌ای دو مفصل متفاوت، ناشی از شتاب کوریولیس بوده و جملات

شامل مجذور سرعت یک مفصل بر اثر حضور نیروی گریز از مرکز ایجاد شده‌اند.

فصل ششم

تولید مسیر و شبیه سازی حرکتی

۶-۱. مقدمه

همانطور که ذکر شد در این کاربرد ربات فقط مجاز به انجام حرکات کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم می‌باشد. در مجموع این ربات بایستی بتواند سه حرکت بزرگنمایی مثبت/ منفی، حرکت سر لاپاروسکوپ به چپ/ راست و همچنین حرکت سر لاپاروسکوپ به بالا/ پایین را در یک مختصات کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم انجام دهد. به منظور انجام این حرکات انتهای رابط سه و یا همان مبداء دستگاه مختصات چهار را به عنوان مجری نهایی ربات در نظر گرفته و آن را در مسیر کروی به حرکت در می‌آوریم.

۶-۲. روش تولید مسیر کروی

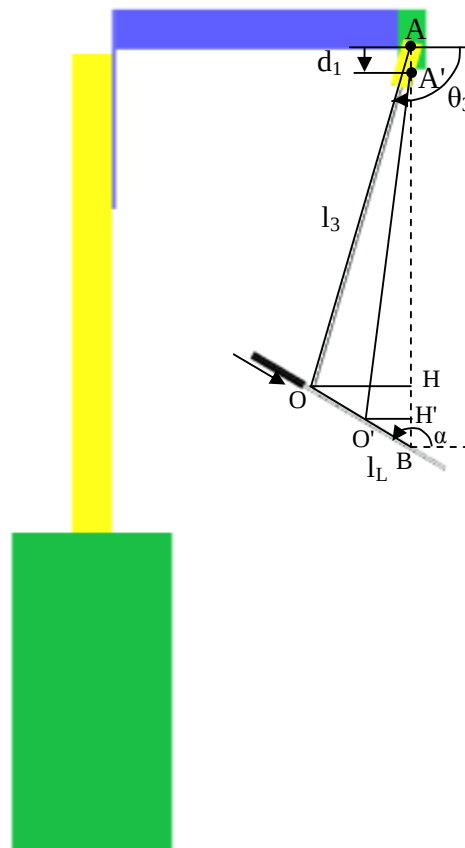
به دلیل ماهیت فیزیکی و ساختار متناسب با کاربرد لاپاروسکوپ این ربات، برخلاف اغلب ربات‌های صنعتی، تولید مسیر کروی در این ربات بسیار ساده‌تر از تولید مسیرهای مستقیم الخط می‌باشد. این یکی از ویژگی‌های منحصر بفرد مکانیزم انتخابی بوده که در انتخاب نوع مکانیزم بسیار تاثیر داشته‌است.

در این ربات برخلاف روش معمول در تولید مسیر ربات‌های صنعتی برای انجام یک حرکت نیازی به تعریف نقاط میانی نمی‌باشد. بلکه تنها با استفاده از روابط هندسی حاکم بین رابط‌ها می‌توان هر سه مسیر نامبرده را به راحتی و بدون نیاز به محاسبات سینماتیک وارون و تعیین متغیرهای مفصلی، ایجاد کرد و هزینه‌ی محاسبات را تا حد بسیار زیادی کاهش داد. علاوه بر این در مسیرهای کروی چنانچه از نقاط میانی استفاده شود علاوه بر اعمال محاسبات بسیار زیاد در حل مداوم سینماتیک وارون، مجری نهایی دقیقاً سطح کره را نیموده و فقط نقاط میانی را به هم وصل می‌کند. حال آنکه در مکانیزم انتخاب شده با استفاده از روش هندسی این مشکلات برطرف شده است. در ادامه چگونگی تولید سه مسیر مورد

نیاز بررسی شده است.

۱-۲-۶. حرکت شعاعی بزرگنمایی مثبت / منفی

برای انجام بزرگنمایی مثبت یا منفی ربات بایستی بتواند لاپاروسکوپ را دقیقاً در امتداد خود حرکت دهد. یعنی در مرحله‌ی اول با استفاده از متغیرهای مفصلی و سینماتیک مستقیم، ربات باید امتداد لاپاروسکوپ و محل ورود به شکم را تشخیص داده و سپس مجری نهایی خود را در امتداد لاپاروسکوپ یا همان امتداد واصل بین مجری نهایی و محل ورود به شکم حرکت دهد. در این حالت بایستی زاویه‌ی لاپاروسکوپ با افق ثابت بماند. در این حرکت محورهای یک و سه باید طبق روابطی به طور همزمان عمل کنند. شکل (۶-۱) روند تغییرات موقعیت رابطها و متغیرهای مفصلی را طی حرکت بزرگنمایی مثبت نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱. تغییرات رابطها و متغیرهای مفصلی در هنگام بزرگنمایی مثبت

با توجه به شکل (۶-۱) روابط زیر قابل بیان است. شایان ذکر است در حین این حرکت α همواره مقدار ثابتی

دارد. داریم:

$$O'H' = l_L \sin(\alpha - \pi/2) = l_3 \sin(-\theta_3 - \pi/2) \quad (۶-۱)$$

در این رابطه l_L طول لاپاروسکوپ خارج از شکم در هر لحظه می باشد. به این ترتیب θ_3 از رابطه ی زیر قابل بیان است.

$$\theta_3 = -\text{Arccoc}\left(\frac{l_L}{l_3} \cos \alpha\right) \quad (۶-۲)$$

همچنین به منظور محاسبه ی موقعیت محور یک داریم:

$$A'B = l_L \sin \alpha - l_3 \sin \theta_3 \quad (۶-۳)$$

به این ترتیب موقعیت محور یک در هر لحظه از رابطه (۶-۴) قابل محاسبه است.

$$d_1 = A'B - AB = (l_L \sin \alpha - l_3 \sin \theta_3) - (l_{L_0} \sin \alpha - l_3 \sin \theta_{3_0}) \quad (۶-۴)$$

در این رابطه l_{L_0} طول لاپاروسکوپ خارج از شکم در شروع حرکت است که با استفاده از رابطه (۶-۶) قابل محاسبه است. θ_{3_0} نیز موقعیت محور سه در شروع حرکت است.

روند انجام این حرکت به این صورت خواهد بود که با صدور فرمان بزرگنمایی (در این فرمان درواقع l_L ورودی می باشد که طبق آنچه در ادامه خواهد آمد با تابعی برحسب زمان به سیستم تولید مسیر وارد می شود) ابتدا ربات متغیرهای مفصلی را خوانده و به وسیله ی روابط سینماتیک مستقیم ارائه شده در بخش های قبلی موقعیت و جهت گیری لاپاروسکوپ و محل ورود به شکم را تشخیص می دهد. با توجه به شکل (۶-۱) زاویه ی لاپاروسکوپ با افق از رابطه (۶-۵) قابل محاسبه است.

$$\alpha = \theta_3 + \theta_4 + \pi \quad (۶-۵)$$

به این ترتیب با داشتن α می توان طول لاپاروسکوپ خارج از شکم در لحظه ی شروع را محاسبه کرد. داریم:

$$l_{L_0} = \frac{l_3 \cos \theta_{3_0}}{\cos \alpha} \quad (۶-۶)$$

به این ترتیب با داشتن l_L به عنوان ورودی همه چیز برای استفاده از روابط (۶-۲) و (۶-۴) و هدایت مجری نهایی ربات در امتداد لاپاروسکوپ آماده است. این فرایند طی برنامه ای که در نرم افزار MATLAB نوشته شده، به طور کامل شبیه سازی شده و نتایج درستی ارائه کرده است. در این برنامه ابتدا متغیرهای مفصلی به عنوان ورودی به برنامه داده می شود (مثل وقتی که سیستم کنترل ربات مقدار حسگرهای مفاصل را می خواند) سپس برنامه با استفاده از روابط

سینماتیک مستقیم موقعیت محور سه و محل ورود به شکم و مجری نهایی ربات را نشان داده و بعد از پرسیدن مقدار مطلوب برای بزرگنمایی مثبت یا منفی (بر حسب مقدار ورود لاپاروسکوپ به داخل شکم) با استفاده از روابط ارائه شده در این بخش، موقعیت هر یک از مفاصل را بر حسب زمان محاسبه کرده و نمودارهای هر یک را رسم کرده و با استفاده از روابط سینماتیک مستقیم محل مجری نهایی ربات بر حسب زمان را محاسبه کرده و با رسم محل مجری نهایی و روند حرکات محورهای یک تا چهار و رابط سه در فضا با گذشت زمان، مسیر پیموده شده توسط مجری نهایی را نشان می‌دهد. همچنین نمودارهای موقعیت، سرعت و شتاب مجری نهایی در پیمایش مسیر موردنظر نیز ترسیم می‌شود.

همچنین مکانیزم ربات به طور کامل در نرم افزار vNASTRAN شبیه سازی حرکتی شده و با دادن روابط (۶-۲) و (۶-۴) به عنوان ورودی برای مفاصل مربوطه، روند تولید مسیر در محیط مجازی شبیه سازی شده و نتیجه‌ی حاصل از این روابط در حرکت مجری نهایی بررسی شده است. نمودارهای به دست آمده از این شبیه سازی در بخش نتایج ارائه شده‌اند. یک ورودی مناسب برای I_L یا همان طول لاپاروسکوپ خارج از شکم، به عنوان مثال می‌تواند حالتی باشد که با مشخص بودن مقدار اولیه‌ی I_L از روی سینماتیک مستقیم و مقدار بزرگنمایی مطلوب، مقدار نهایی I_L به دست آمده و ربات لاپاروسکوپ را با سرعت صفر شروع به حرکت داده و با سرعت صفر متوقف کند. با داشتن این چهار قید و با در نظر گرفتن سرعت متوسط 10 mm/s برای حرکت لاپاروسکوپ، I_L به صورت یک چند جمله‌ای یکتای درجه‌ی سه طبق آنچه در رابطه (۴-۹۷) آورده شده و با روش ارائه شده در فصل ۷ مرجع [56] قابل ارائه است:

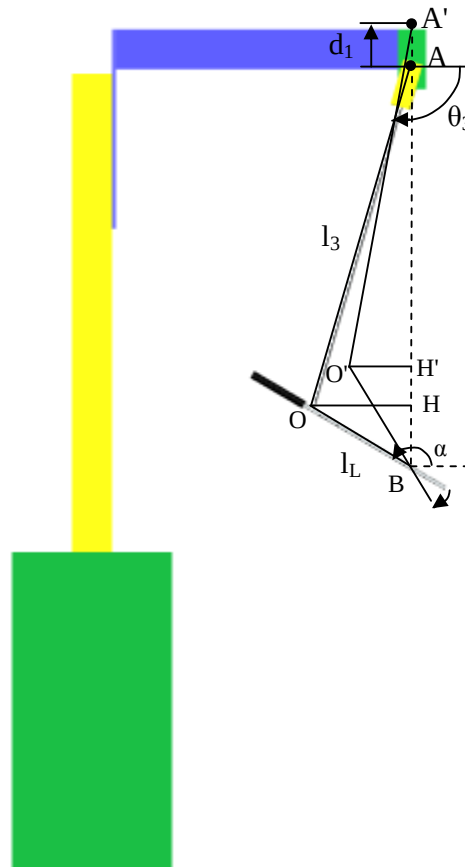
$$I = I_{L0} + 3/tf.^2*dl*t.^2 - 2/tf.^3*dl*t.^3 \quad (۶-۷)$$

در این رابطه (I_{L0}) طول لاپاروسکوپ خارج از شکم و (dl) طول بازه‌ی حرکت خطی لاپاروسکوپ به منظور رسیدن به بزرگنمایی مطلوب بوده و (tf) نیز مدت زمان این حرکت می‌باشد، که از تقسیم (dl) بر (v) یا همان سرعت متوسط حرکت، قابل محاسبه است. کل این عملیات در برنامه‌ای که در محیط MATLAB نوشته شده لحاظ شده‌اند. این برنامه تحت عنوان شبیه سازی حرکت بزرگنمایی مثبت/ منفی در بخش ضمائم ارائه شده است.

۲-۲-۶. حرکت چرخشی سر لاپاروسکوپ به بالا/ پایین

در حرکت سر لاپاروسکوپ به بالا/ پایین نیز بایستی مثل حرکت قبل محل ورود به شکم و طول وارد شده به شکم تشخیص داده شود و با ثابت ماندن مقدار داخل شده‌ی لاپاروسکوپ به شکم، مجری نهایی ربات روی یک مسیر دایره‌ای در صفحه‌ی قائم و به مرکز محل ورود به شکم و شعاعی معادل طول لاپاروسکوپ خارج مانده از شکم، در

جهت عکس (پایین / بالا) حرکت کند. در این حرکت نیز محورهای یک و سه بایستی طبق روابط خاصی به طور همزمان حرکت کنند. در شکل (۶-۲) روند تغییرات موقعیت رابطها و متغیرهای مفصلی طی حرکت سر لاپاروسکوپ به پایین نشان داده شده است.



شکل ۶-۲. تغییرات رابطها و متغیرهای مفصلی در هنگام حرکت سر لاپاروسکوپ به پایین

با توجه به شکل (۶-۲) روابط زیر قابل بیان است. شایان ذکر است در حین این حرکت l_L یا همان طول لاپاروسکوپ خارج مانده از شکم همواره مقدار ثابتی دارد. داریم:

$$O'H' = l_L \sin(\alpha - \pi/2) = l_3 \sin(-\theta_3 - \pi/2) \quad (۶-۸)$$

به این ترتیب θ_3 از رابطه‌ی زیر قابل بیان است.

$$\theta_3 = -\text{Arccoc}\left(\frac{l_L}{l_3} \cos \alpha\right) \quad (۶-۹)$$

همچنین به منظور محاسبه‌ی موقعیت محور یک داریم:

$$A'B = l_L \sin \alpha - l_3 \sin \theta_3 \quad (۱۰-۶)$$

به این ترتیب موقعیت محور یک در هر لحظه از رابطه (۹۴-۶) قابل محاسبه است.

$$d_1 = A'B - AB = (l_L \sin \alpha - l_3 \sin \theta_3) - (l_L \sin \alpha_0 - l_3 \sin \theta_{3_0}) \quad (۱۱-۶)$$

در این رابطه α_0 زاویه‌ی لاپاروسکوپ با افق در شروع حرکت و l_L طول لاپاروسکوپ خارج مانده از شکم در کل حرکت است که به ترتیب با استفاده از روابط (۱۲-۶) و (۱۳-۶) قابل محاسبه‌اند. θ_{3_0} نیز موقعیت محور سه در شروع حرکت است.

روند انجام این حرکت به این صورت خواهد بود که با صدور فرمان حرکت به بالا/پایین (در این فرمان درواقع α ورودی می‌باشد که طبق آنچه در ادامه خواهد آمد با تابعی برحسب زمان به سیستم تولید مسیر وارد می‌شود) ابتدا ربات متغیرهای مفصلی را خوانده و به وسیله‌ی روابط سینماتیک مستقیم ارائه شده در بخش‌های قبلی موقعیت و جهت گیری لاپاروسکوپ و محل ورود به شکم را تشخیص می‌دهد. با توجه به شکل (۶-۲) در شروع حرکت زاویه‌ی لاپاروسکوپ با افق از رابطه (۱۲-۶) قابل محاسبه است.

$$\alpha_0 = \theta_{3_0} + \theta_{4_0} + \pi \quad (۱۲-۶)$$

حال با داشتن مقدار اولیه‌ی α ، می‌توان طبق آنچه در ادامه خواهد آمد α را با سرعت و شتاب زاویه‌ای مورد نظر به عنوان ورودی به سیستم کنترل داد و با استفاده از روابط (۹۹-۴) و (۱۰۱-۴) مجری نهایی را به طور مطلوب حول نقطه‌ی ورود به شکم در صفحه‌ی قائم حرکت داده و باعث حرکت سر لاپاروسکوپ به بالا و پایین در روی محیط کره‌ای به مرکز نقطه‌ی ورود به شکم شد. طول لاپاروسکوپ خارج مانده از شکم در کل حرکت ثابت بوده و با توجه به شکل (۶-۲) از رابطه‌ی (۱۳-۶) قابل محاسبه است.

$$l_L = \frac{l_3 \cos \theta_3}{\cos \alpha} \quad (۱۳-۶)$$

این فرایند طی برنامه‌ای که در نرم افزار MATLAB نوشته شده، به طور کامل شبیه سازی شده و نتایج درستی ارائه کرده‌است. در این برنامه ابتدا متغیرهای مفصلی به عنوان ورودی به برنامه داده می‌شود (مثل وقتی که سیستم کنترل ربات مقدار حسگرهای مفاصل را می‌خواند) سپس برنامه با استفاده از روابط سینماتیک مستقیم موقعیت محور سه و محل ورود به شکم و مجری نهایی ربات را نشان داده و بعد از پرسیدن مقدار مطلوب برای حرکت به بالا/پایین (بر حسب مقدار چرخش زاویه‌ای لاپاروسکوپ) با استفاده از روابط ارائه شده در این بخش، موقعیت هر یک از مفاصل را بر حسب زمان محاسبه کرده و نمودارهای هر یک را رسم کرده و با استفاده از روابط سینماتیک مستقیم محل مجری نهایی ربات بر

حسب زمان را محاسبه کرده و با رسم محل مجری نهایی و روند حرکات محورهای یک تا چهار و رابط سه در فضا با گذشت زمان، مسیر پیموده شده توسط مجری نهایی را نشان می‌دهد. همچنین نمودارهای موقعیت، سرعت و شتاب مجری نهایی در پیمایش مسیر موردنظر نیز ترسیم می‌شود.

همچنین مکانیزم ربات به طور کامل در نرم افزار vNASTRAN شبیه سازی حرکتی شده و با دادن روابط (۶-۹) و (۶-۱۱) به عنوان ورودی برای مفاصل مربوطه، روند تولید مسیر در محیط مجازی شبیه سازی شده و نتیجه‌ی حاصل از این روابط در حرکت مجری نهایی بررسی شده است. نمودارهای به دست آمده از این شبیه سازی در بخش نتایج ارائه شده‌اند.

یک ورودی مناسب برای α یا همان زاویه‌ی لاپاروسکوپ با افق، به عنوان مثال می‌تواند حالتی باشد که با مشخص بودن مقدار اولیه‌ی α از روی سینماتیک مستقیم و مقدار چرخش مطلوب، مقدار نهایی α به دست آمده و ربات لاپاروسکوپ را با سرعت زاویه‌ای صفر شروع به حرکت داده و با سرعت صفر متوقف کند. با داشتن این چهار قید و با در نظر گرفتن سرعت خطی متوسط 10 mm/s برای حرکت سر لاپاروسکوپ که معادل با سرعت زاویه‌ای متوسط متناسب با طول لاپاروسکوپ وارد شده به شکم می‌باشد، α به صورت یک چند جمله‌ای یکتای درجه‌ی سه طبق آنچه در رابطه (۶-۱۴) آورده شده و با روش ارائه شده در فصل ۷ مرجع [56] قابل ارائه است:

$$\alpha = \alpha_0 + 3/tf \cdot t^2 - 2/tf^3 \cdot t^3 \quad (6-14)$$

در این رابطه (α_0) زاویه‌ی اولیه‌ی لاپاروسکوپ با افق و ($d\alpha$) مقدار چرخش زاویه‌ی لاپاروسکوپ به منظور رسیدن به ارتفاع مطلوب بوده و (tf) نیز مدت زمان این حرکت می‌باشد، که از تقسیم ($d\alpha$) بر (ω) یا همان سرعت زاویه‌ای متوسط متناسب با طول لاپاروسکوپ وارد شده به شکم، قابل محاسبه است. کل این عملیات در برنامه‌ای که در محیط MATLAB نوشته شده لحاظ شده‌اند. این برنامه تحت عنوان شبیه‌سازی حرکت سر لاپاروسکوپ به بالا/پایین در بخش ضمائم ارائه شده است.

۳-۲-۶. حرکت چرخشی سر لاپاروسکوپ به چپ/راست

در حرکت سر لاپاروسکوپ به چپ/راست نیز بایستی مجری نهایی ربات روی محیط دایره‌ای در صفحه‌ی افقی و به مرکز محل تقاطع خط واصل بین محل ورود به شکم و مبدا دستگاه مختصات دو و صفحه‌ی افقی گذرنده از محل مجری نهایی و به شعاع معادل فاصله‌ی مجری نهایی از همان خط حرکت کند. به منظور ایجاد چنین حرکتی کافیسست

محور دو به تنهایی و به اندازه‌ی دلخواه دوران نماید. برای اینکه سر لاپاروسکوپ در هر حالتی از موقعیت ربات همواره با سرعت متوسط یکسانی حرکت نماید بایستی سرعت زاویه‌ای محور دو متناسب با طول لاپاروسکوپ داخل شده به شکم محاسبه شود. با داشتن طول لاپاروسکوپ (l) و طول لاپاروسکوپ خارج از شکم (l_L) که از رابطه‌ی (۶-۱۳) قابل محاسبه است، می‌توان شعاع چرخش سر لاپاروسکوپ حول محور دو را طبق رابطه (۶-۱۵) محاسبه کرد.

$$R = (l - l_L) \cos(\pi - \alpha) \quad (۶-۱۵)$$

به این ترتیب با در نظر گرفتن سرعت خطی متوسط 10 mm/s برای سر لاپاروسکوپ، سرعت زاویه‌ای متناسب با طول وارد شده به شکم از رابطه‌ی (۶-۱۶) قابل محاسبه است.

$$\omega = 10 / R \quad (۶-۱۶)$$

با داشتن مقدار چرخش مطلوب ($d\theta$) و ω می‌توان زمان مورد نیاز برای حرکت (t_f) را محاسبه کرده و مثل حالات قبل، با روش ارائه شده در فصل ۷ مرجع [56]، رابطه‌ی مناسب برای چرخش محور دو را طبق آنچه در رابطه‌ی (۶-۱۷) آورده شده محاسبه کرد.

$$\theta_2 = \theta_{20} + 3/t_f \cdot \omega^2 \cdot d\theta \cdot t_f^2 - 2/t_f \cdot \omega^3 \cdot d\theta \cdot t_f^3 \quad (۶-۱۷)$$

در این رابطه θ_{20} موقعیت محور دو در شروع حرکت می باشد.

این فرایند نیز طی برنامه‌ای که در نرم افزار MATLAB نوشته شده، به طور کامل شبیه سازی شده و نتایج درستی ارائه کرده است. این برنامه تحت عنوان شبیه سازی حرکت سر لاپاروسکوپ به چپ/ راست در بخش ضmann ارائه شده است. در این برنامه ابتدا متغیرهای مفصلی به عنوان ورودی به برنامه داده می شود (مثل وقتی که سیستم کنترل ربات مقدار حسگرهای مفاصل را می خواند) سپس برنامه با استفاده از روابط سینماتیک مستقیم موقعیت محور سه و محل ورود به شکم و مجری نهایی ربات را نشان داده و بعد از پرسیدن مقدار مطلوب برای چرخش به چپ/ راست (بر حسب مقدار چرخش زاویه‌ای لاپاروسکوپ) با استفاده از روابط ارائه شده در این بخش، موقعیت هر یک از مفاصل را بر حسب زمان محاسبه کرده و نمودارهای هر یک را رسم کرده و با استفاده از روابط سینماتیک مستقیم محل مجری نهایی ربات بر حسب زمان را محاسبه کرده و با رسم محل مجری نهایی و روند حرکات محورهای یک تا چهار و رابط سه در فضا با گذشت زمان، مسیر پیموده شده توسط مجری نهایی را نشان می دهد. همچنین نمودارهای موقعیت، سرعت و شتاب محور دو در پیمایش مسیر مورد نظر نیز ترسیم می شود.

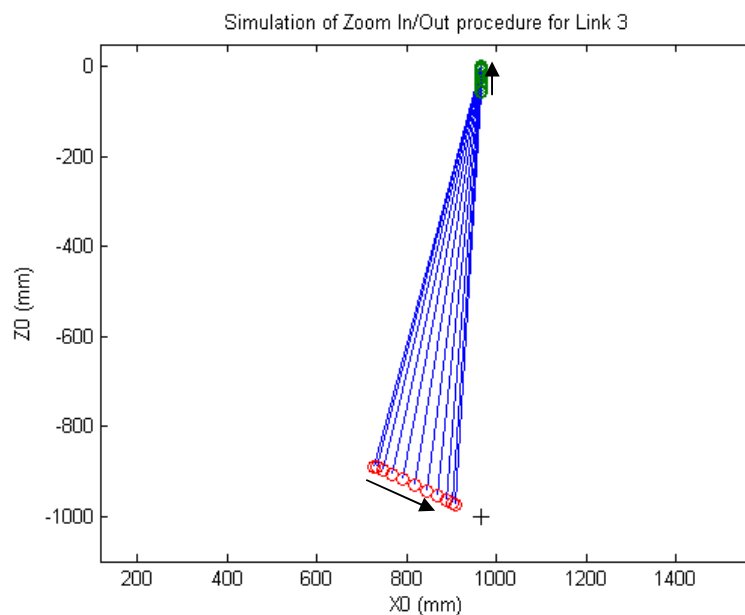
همچنین مکانیزم ربات به طور کامل در نرم افزار vNASTRAN شبیه سازی حرکتی شده و با دادن رابطه (۶-۱۷) به

عنوان ورودی برای مفصل دو، روند تولید مسیر در محیط مجازی شبیه‌سازی شده و نتیجه‌ی حاصل از این رابطه در حرکت مجری نهایی بررسی شده است. نمودارهای به‌دست آمده از این شبیه‌سازی در بخش نتایج ارائه شده‌اند.

۳-۶. نتایج شبیه‌سازی

۱-۳-۶. شبیه‌سازی حرکت شعاعی بزرگنمایی مثبت / منفی

در اینجا نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روابط به‌دست آمده در بخش تولید مسیر (روابط (۶-۱۲) و (۶-۱۴)) و تست توانایی ربات در ایجاد مسیر شعاعی به سمت نقطه‌ی ورود به شکم ارائه شده‌است. در شکل (۶-۳) یک حالت عمومی از نفوذ لاپاروسکوپ به داخل شکم در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است.



شکل ۳-۶. شبیه‌سازی نفوذ لاپاروسکوپ به داخل شکم در نرم‌افزار MATLAB: (+): محل ورود به شکم، (0) پایین: مجری نهایی (محل گیره‌ی لاپاروسکوپ)، (o) بالا: مبدا دستگاه مختصات سه، خطوط واصل: روند حرکت میله‌ی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ (رابط سه)

در این شبیه‌سازی اطلاعات داده شده به برنامه عبارتند از:

Procedure: Driving (Zoom In/Out)

Type the joints Variables and lenght of Zoom

d1(mm)=0

Theta2(Deg)=0

Theta3(Deg)=-105

Theta4(Deg)=80

length of Zoom (mm)(In+/Out-)=200

همانطور که در شکل (۳-۶) ملاحظه می‌شود، در اجرای دستور بزرگنمایی مثبت، مجری نهایی ربات، لاپاروسکوپ را

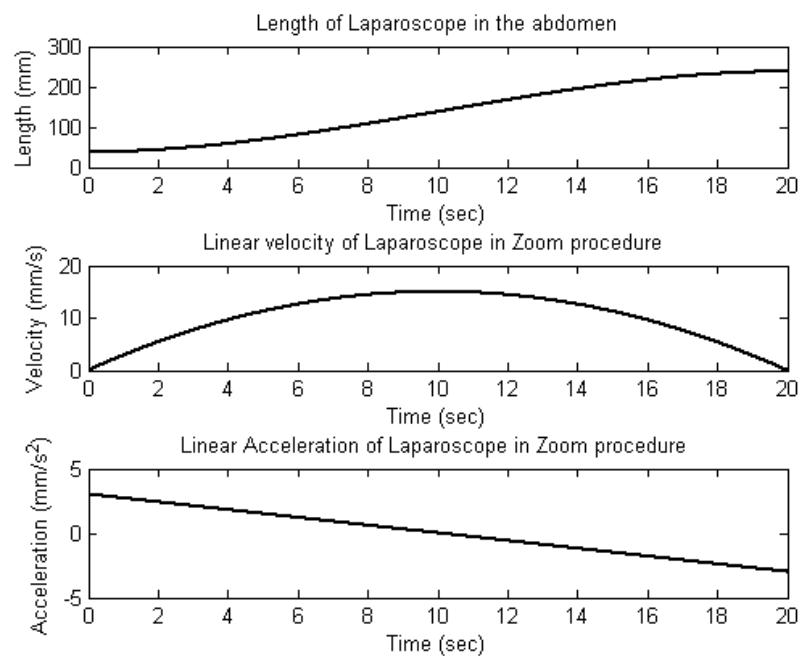
دقیقاً در امتداد خود یعنی خط واصل بین مجری نهایی و محل ورود به شکم حرکت می‌دهد. این شبیه‌سازی ضمن تایید

روابط استخراج شده برای تولید مسیر شعاعی در بخش تولید مسیر، روند حرکت رابط نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ در حین

این حرکت را نیز نشان می‌دهد.

در شکل (۴-۶) طول لاپاروسکوپ وارد شده به شکم همراه با سرعت و شتاب خطی ورود، بر حسب زمان نشان داده

شده است.



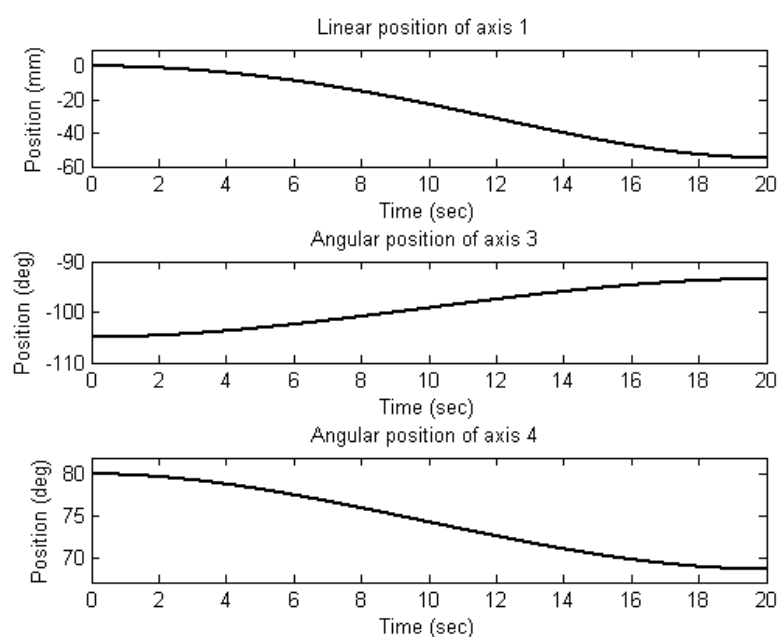
شکل ۴-۶. طول لاپاروسکوپ وارد شده به شکم همراه با سرعت و شتاب خطی ورود، بر حسب زمان

همانطور که در شکل (۴-۶) ملاحظه می‌شود، لاپاروسکوپ با سرعت صفر و شتاب 3 mm/s^2 شروع به حرکت کرده

و با رسیدن به سرعت 15 mm/s شتاب منفی پیدا کرده و در نهایت با سرعت صفر متوقف شده‌است. همانطور که در

بخش قبلی ذکر شد الگوریتم تولید مسیر به گونه‌ای بوده که سر لاپاروسکوپ با سرعت متوسط 10 mm/s حرکت کند. همانطور که در شکل (۴-۶) ملاحظه می‌شود لاپاروسکوپ در مدت زمان بیست ثانیه به اندازه ی دویست میلیمتر به داخل شکم نفوذ کرده‌است.

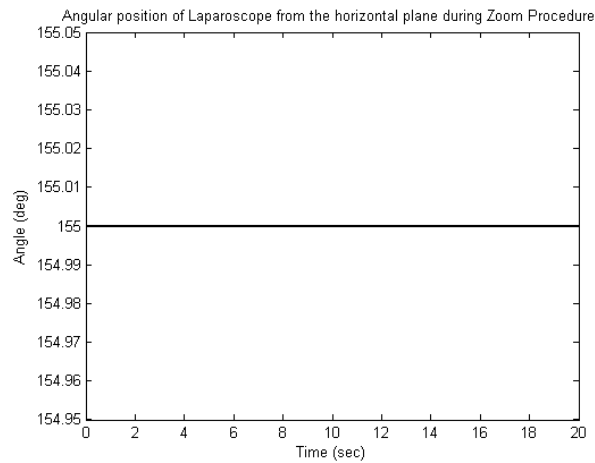
از آنجا که در حرکت شعاعی یا بزرگنمایی محورهای ۱، ۳ و ۴ دارای حرکت هستند در شکل (۵-۶) موقعیت این محورها بر حسب زمان در طول یک حرکت شعاعی به طول 200 mm نشان داده شده‌است.



شکل ۵-۶. موقعیت محورهای ۱، ۳ و ۴ بر حسب زمان در طول یک حرکت شعاعی به طول 200 mm

همانطور که در شکل (۵-۶) ملاحظه می‌شود، در طول این حرکت کلیه‌ی محورها از سرعت صفر شروع به حرکت کرده و با سرعت صفر متوقف می‌شوند.

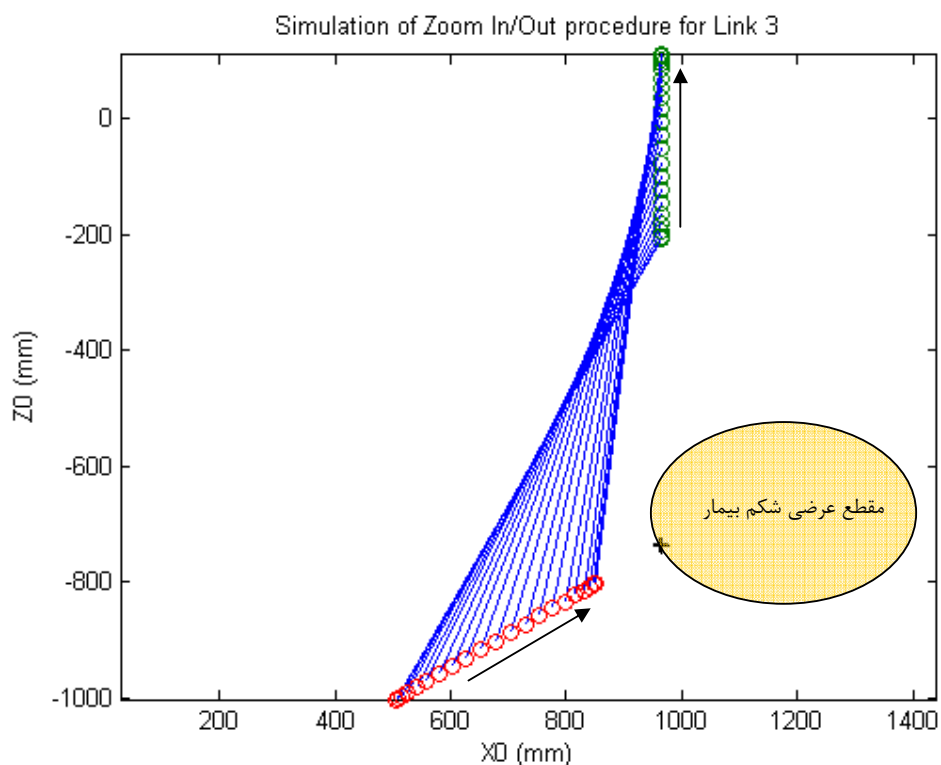
به منظور اثبات حرکت خطی لاپاروسکوپ و اینکه در طول حرکت راستای لاپاروسکوپ تغییر نمی‌کند، در شکل (۶-۶) زاویه‌ی لاپاروسکوپ با افق در طول زمان حرکت بر حسب زمان رسم شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود این زاویه با گذشت زمان مقدار ثابتی داشته است.



شکل ۶-۶ . زاویه‌ی لاپاروسکوپ با افق در هنگام حرکت بزرگنمایی مثبت ثابت مانده است

به منظور نشان دادن توانایی ربات در انجام عمل‌های پیشرفته و عمل‌هایی که جراح در آنها مجبور است از کناره‌ی شکم بیمار، لاپاروسکوپ را داخل کند، در شکل (۶-۷) یک مورد شبیه‌سازی برای نفوذ لاپاروسکوپ از سمت چپ و پایین به بدن بیمار نشان داده شده‌است.

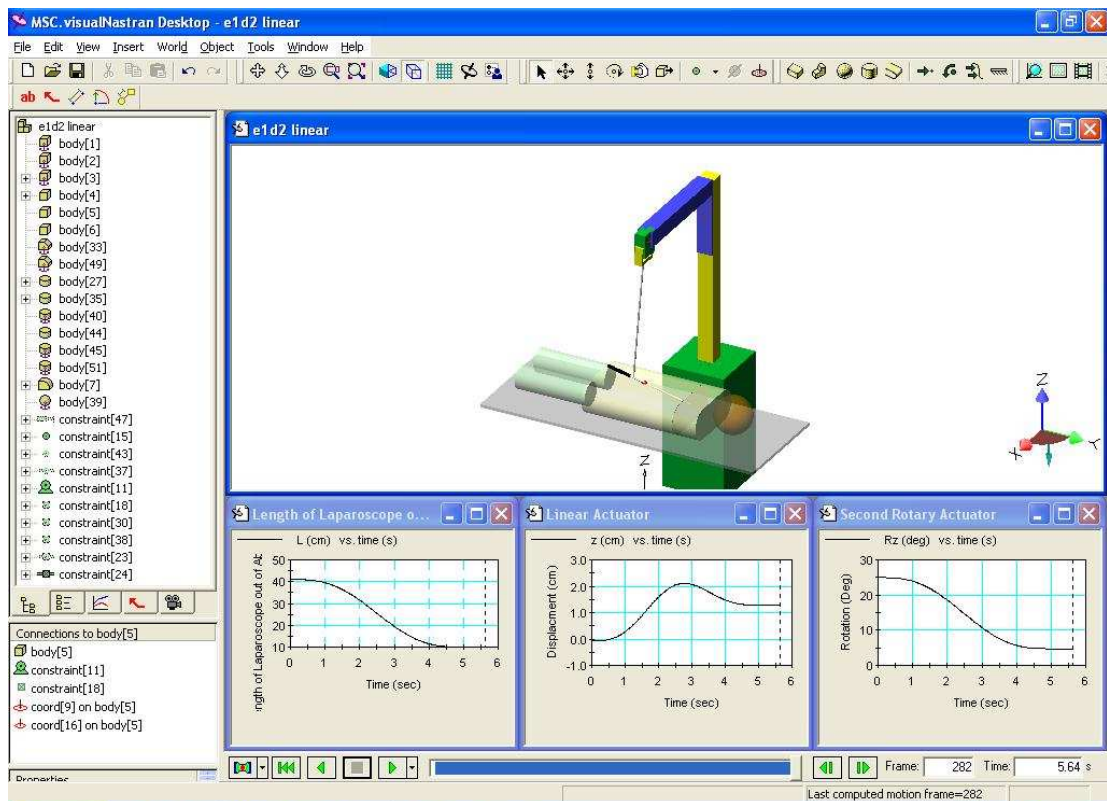
همانطور که در شکل (۶-۷) ملاحظه می‌شود در انجام حرکت نفوذ به عمق ربات از فضای حرکتی بسیار مناسبی استفاده کرده و برخوردی با بدن بیمار نخواهد داشت.



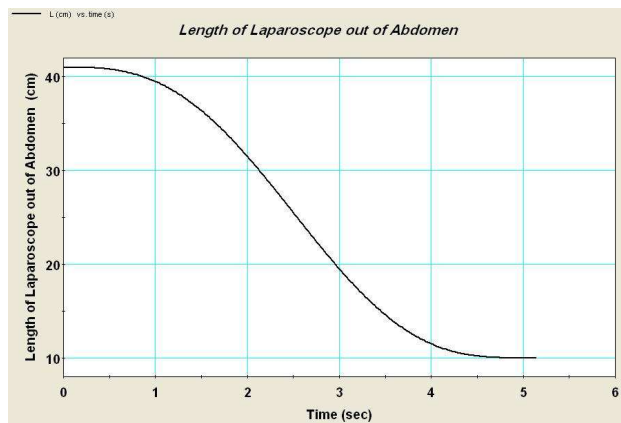
شکل ۶-۷. شبیه سازی نفوذ لاپاروسکوپ از سمت چپ و پایین به بدن بیمار در نرم افزار MATLAB (+): محل ورود به شکم، (o) پایین: مجری نهایی (محل گیره‌ی لاپاروسکوپ)، (o) بالا: مبدا دستگاه مختصات سه، خطوط واصل: روند حرکت میله‌ی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ (رابط سه)

حرکت بزرگنمایی مثبت/ منفی ربات در نرم افزار vNASTRAN نیز به طور کامل شبیه سازی شده و توانایی ربات در انجام این حرکت با استفاده از روابط به دست آمده در بخش قبل به اثبات رسیده است. به عنوان مثال یک مورد شبیه سازی در حالتی که لاپاروسکوپ در سطحی نزدیک به بدن بیمار قرار دارد و ربات آن را در امتداد خود به داخل شکم می راند در شکل (۶-۸) نشان داده شده است.

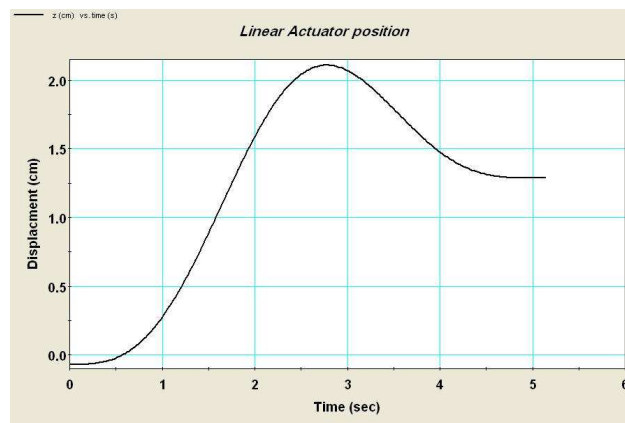
برخی از نمودارهای حاصل از این شبیه سازی از جمله تغییرات طول خارج از شکم لاپاروسکوپ (شکل ۶-۹)، موقعیت محور خطی شماره‌ی یک (شکل ۶-۱۰) و موقعیت دومین محور دورانی (محور سه) (شکل ۶-۱۱) بر حسب زمان ارائه شده اند.



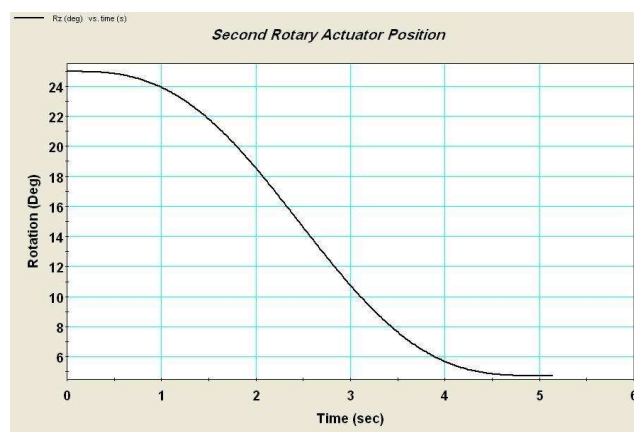
شکل ۶-۸. شبیه سازی حرکت بزرگنمایی مثبت/ منفی در محیط vNASTRAN



شکل ۶-۹. طول لاپاروسکوپ خارج از شکم با گذشت زمان، حین حرکت بزرگنمایی



شکل ۶-۱۰. موقعیت محور خطی شماره‌ی یک با گذشت زمان، حین حرکت بزرگنمایی در نزدیکی سطح بدن



شکل ۶-۱۱. موقعیت دومین محور دورانی (محور سه) با گذشت زمان، حین حرکت بزرگنمایی در نزدیکی سطح بدن

همانطور که از شکل‌های (۶-۸) تا (۶-۱۱) مشخص است، شبیه سازی در نرم افزار vNASTRAN نیز نتایج مناسبی به همراه داشته‌است. در این شبیه سازی، حرکت خطی لاپاروسکوپ به صورت یک فیلم گرافیکی نشان داده می‌شود. این فیلم در لوح فشرده همراه پایان نامه ارائه شده است. در این فیلم حرکت خطی لاپاروسکوپ به داخل شکم به وضوح تایید می‌شود.

۲-۳-۶. شبیه سازی حرکت چرخشی سر لاپاروسکوپ به بالا/ پایین

در این بخش نتایج شبیه سازی حرکت ربات در حرکت دادن سر لاپاروسکوپ به بالا/ پایین در یک مختصات

کروی ارائه می‌شود. در این شبیه سازی که در نرم افزار MATLAB انجام شده، برنامه بعد از گرفتن مقادیر متغیرهای مفصلی و مقدار حرکت زاویه‌ای لاپاروسکوپ حول نقطه‌ی ورود به شکم، چگونگی حرکت رابط سه یا همان میله‌ی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ و مبداء های دستگاه‌های مختصات سه و چهار را ترسیم می‌کند. همچنین سایر پارامترهای مسیر شامل مکان، سرعت و شتاب زاویه‌ای لاپاروسکوپ در طول بازه‌ی حرکتی و موقعیت مفاصل مختلف بر حسب زمان و همچنین طول لاپاروسکوپ داخل شده به شکم در حین حرکت بالا/ پایین (باید ثابت بماند) قابل استخراج هستند. در ادامه نتایج شبیه سازی توانایی ربات در انجام یک دستور دید به بالا به اندازه‌ی ۲۰۰ درجه در یک عمل پیشرفته که لاپاروسکوپ از کناره‌ی شکم به شکم بیمار وارد می‌شود، ارائه شده است. پارامترهای ورودی به برنامه‌ی شبیه ساز در این مورد عبارتند از:

Procedure: Driving (Up/Down)

Type the joints Variables and Up or Down angular movement

d1(mm)=-87

Theta2(Deg)=0

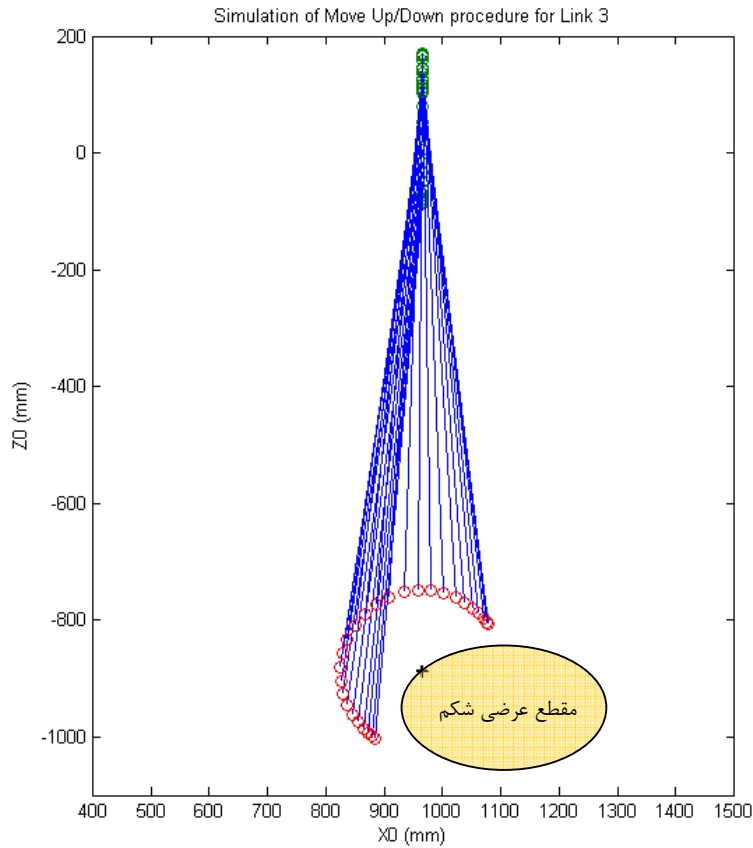
Theta3(Deg)=-95

Theta4(Deg)=150

Angular movement (Deg) (Up+/Down-)=-200

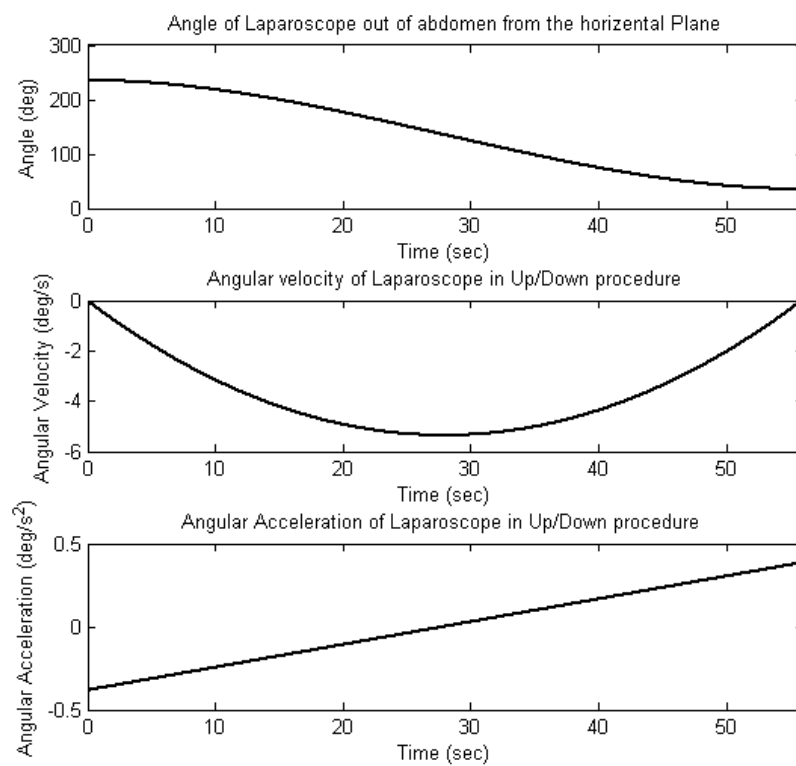
در شکل (۶-۱۲) روند حرکت رابط سه در چرخاندن مجری نهایی حول نقطه‌ی ورود به شکم (+) نشان داده شده‌است. بدیهی است در این حالت لاپاروسکوپ که به صورت شعاع واصل بین محل ورود به شکم و انتهای رابط سه می‌باشد، حول نقطه‌ی ورود به شکم می‌چرخد.

همانطور که در شکل (۶-۱۲) ملاحظه می‌شود، ربات برای انجام حرکت یاد شده از فضای بسیار مناسبی استفاده کرده و فضای روی شکم بیمار را اشغال نمی‌کند. به این ترتیب امکان برخورد ربات با سایر ابزارهای روی شکم بیمار بسیار کم می‌باشد.



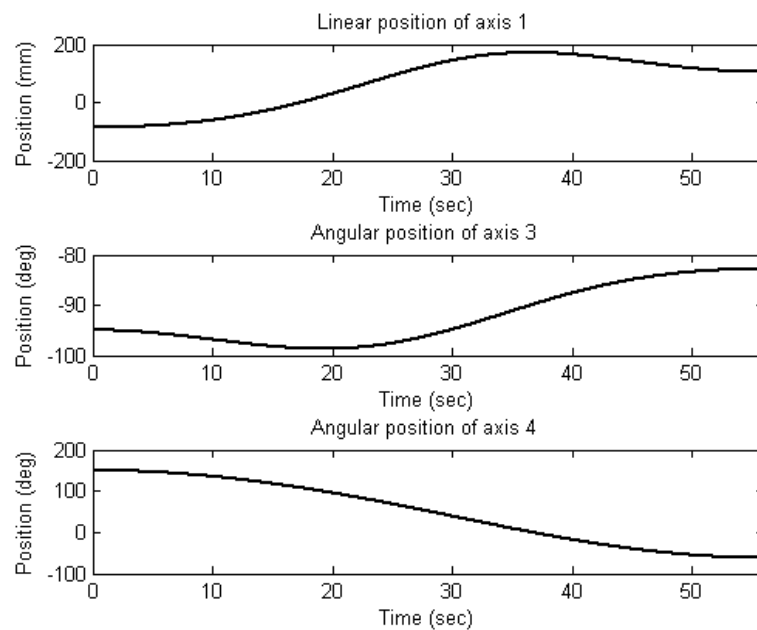
شکل ۶-۱۲. شبیه سازی چرخش لاپاروسکوپ هنگام ورود از سمت چپ و بالا به بدن بیمار در نرم افزار MATLAB: (+) محل ورود به شکم، (o) پایین: مجری نهایی (محل گیره ی لاپاروسکوپ)، (o) بالا: مبدا دستگاه مختصات سه، خطوط واصل: روند حرکت میله ی نگهدارنده ی لاپاروسکوپ (رابط سه)

در شکل (۶-۱۳) زاویه، سرعت و شتاب زاویه ای لاپاروسکوپ نسبت به صفحه ی افقی برحسب زمان نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۶-۱۳) ملاحظه می شود، لاپاروسکوپ با سرعت زاویه ای صفر و شتاب زاویه ای حدود -5.3 deg/s شروع به حرکت کرده و با رسیدن به سرعت زاویه ای حدود 0.4 deg/s^2 به حرکت متوقف شده است. همانطور که در بخش قبلی ذکر شد الگوریتم تولید مسیر به گونه ای بوده که سر نهایت با سرعت صفر متوقف شده است. بنابراین در این الگوریتم سرعت زاویه ای متناسب با طول داخل لاپاروسکوپ با سرعت متوسط 10 mm/s حرکت کند. بنابراین در این الگوریتم سرعت زاویه ای متناسب با طول داخل شده ی لاپاروسکوپ به داخل شکم تعیین می شود.



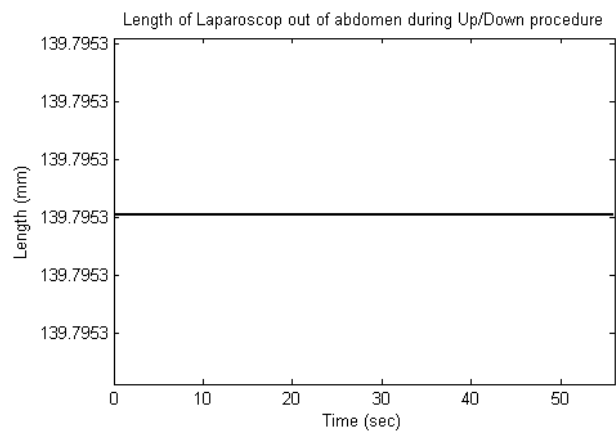
شکل ۶-۱۳. زاویه، سرعت و شتاب زاویه‌ای لاپاروسکوپ نسبت به صفحه‌ی افقی برحسب زمان در حرکت چرخشی لاپاروسکوپ به بالا

از آنجا که در حرکت چرخش به بالا/ پایین، محورهای ۱، ۳ و ۴ دارای حرکت هستند در شکل (۶-۱۴) موقعیت این محورها بر حسب زمان در طول یک حرکت چرخشی به اندازه‌ی 200 deg نشان داده شده‌است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، در طول این حرکت کلیه‌ی محورها از سرعت صفر شروع به حرکت کرده و با سرعت صفر متوقف می‌شوند.



شکل ۶-۱۴. موقعیت محورهای ۱، ۳ و ۴ بر حسب زمان در هنگام حرکت چرخشی بالا/ پایین لاپاروسکوپ به اندازه 200 deg

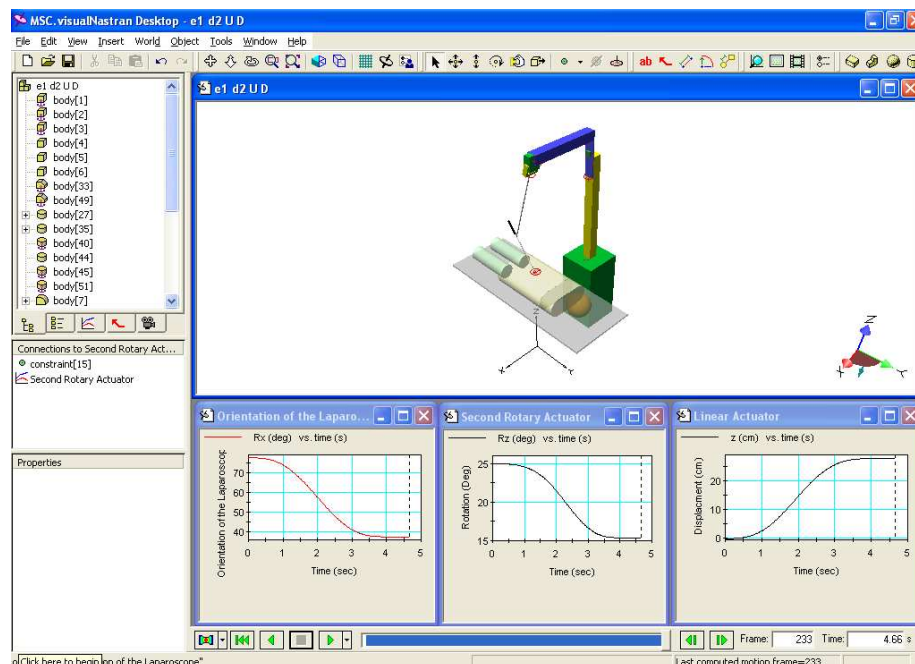
به منظور اثبات حرکت چرخشی خالص لاپاروسکوپ و اینکه در هنگام حرکت چرخشی طول لاپاروسکوپ داخل شده به شکم تغییر نمی‌کند، در شکل (۶-۱۵) طول لاپاروسکوپ خارج مانده از شکم در طول زمان حرکت بر حسب زمان رسم شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود این طول با گذشت زمان مقدار ثابتی داشته است.



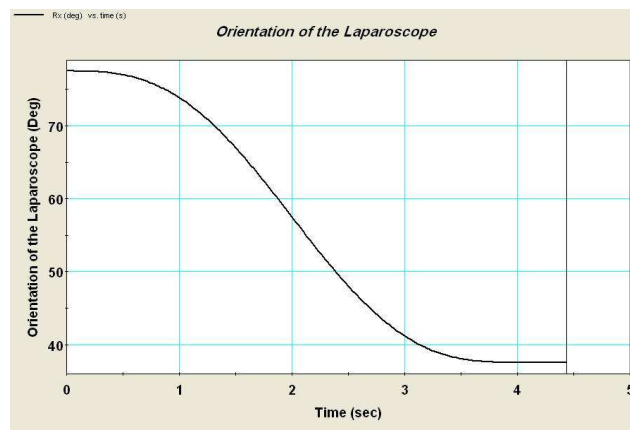
شکل ۶-۱۵. طول لاپاروسکوپ خارج مانده از شکم در حین حرکت چرخشی بالا/ پایین بر حسب زمان

حرکت چرخشی بالا/ پایین ربات در نرم افزار vNASTRAN نیز به طور کامل شبیه سازی شده و توانایی ربات در انجام این حرکت با استفاده از روابط به دست آمده در بخش قبل به اثبات رسیده است. به عنوان مثال یک مورد شبیه سازی در حالتی که ربات لاپاروسکوپ را از نزدیکی سطح بدن بیمار به اندازه 40° به سمت بالا می چرخاند در شکل (۶-۱۶) نشان داده شده است.

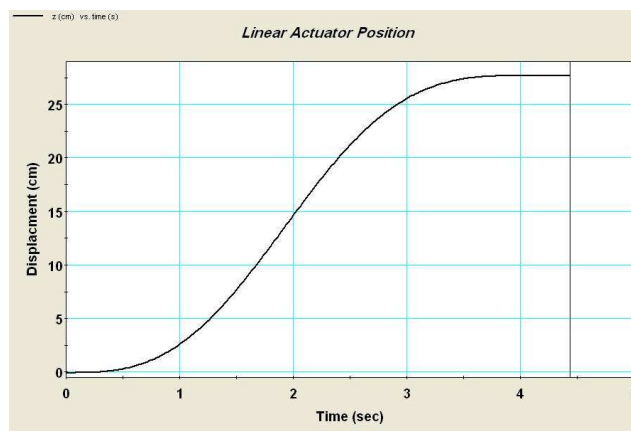
برخی از نمودارهای حاصل از این شبیه سازی از جمله تغییرات زاویه ی لاپاروسکوپ با افق (شکل ۶-۱۷)، موقعیت محور خطی شماره ی یک (شکل ۶-۱۸) و موقعیت دومین محور دورانی (محور سه) (شکل ۶-۱۹) بر حسب زمان ارائه شده اند.



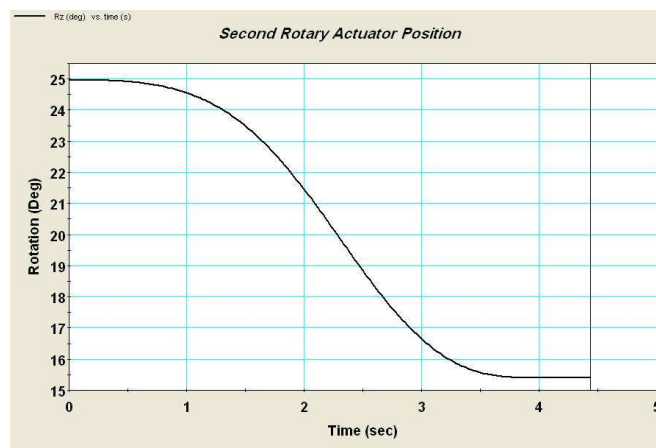
شکل ۶-۱۶. شبیه سازی حرکت چرخشی بالا/ پایین در محیط vNASTRAN



شکل ۶-۱۷. زاویه‌ی لاپاروسکوپ خارج از شکم نسبت به افق با گذشت زمان، حین حرکت چرخشی پایین



شکل ۶-۱۸. موقعیت محور خطی شماره‌ی یک با گذشت زمان، حین حرکت چرخشی سر لاپاروسکوپ به پایین



شکل ۶-۱۹. موقعیت دومین محور دورانی (محور سه) با گذشت زمان، حین حرکت چرخشی سر لاپاروسکوپ به پایین

همانطور که از شکل‌های (۶-۱۶) تا (۶-۱۹) مشخص است، شبیه سازی در نرم افزار vNASTRAN نیز نتایج مناسبی به همراه داشته‌است. در این شبیه سازی، حرکت چرخشی لاپاروسکوپ به صورت یک فیلم گرافیکی نشان داده می‌شود. این فیلم در لوح فشرده همراه پایان نامه ارائه شده است. در این فیلم حرکت چرخشی لاپاروسکوپ حول نقطه‌ی ورود به شکم به وضوح تایید می‌شود.

۳-۳-۶. شبیه سازی حرکت چرخشی سر لاپاروسکوپ به چپ/ راست

در این بخش نتایج شبیه سازی حرکت ربات در حرکت دادن سر لاپاروسکوپ به چپ/ راست در یک مختصات کروی ارائه می‌شود. در این شبیه سازی که در نرم افزار MATLAB انجام شده، برنامه بعد از گرفتن مقادیر متغیرهای مفصلی و مقدار حرکت زاویه‌ای لاپاروسکوپ حول نقطه‌ی ورود به شکم، چگونگی حرکت رابط سه یا همان میله‌ی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ و مبداء های دستگاه‌های مختصات سه و چهار را ترسیم می‌کند. همچنین سایر پارامترهای مسیر شامل مکان، سرعت و شتاب زاویه‌ای لاپاروسکوپ در طول بازه‌ی حرکتی که در این حرکت با مکان، سرعت و شتاب زاویه‌ای محور دو برابر است و موقعیت مفاصل مختلف بر حسب زمان و همچنین طول لاپاروسکوپ داخل شده به شکم در حین حرکت چپ/ راست (باید ثابت بماند) قابل استخراج هستند.

در ادامه نتایج شبیه سازی توانایی ربات در انجام یک دستور چرخش به چپ به اندازه‌ی ۱۸۰ درجه در یک عمل معمولی که لاپاروسکوپ از روی سطح شکم به شکم بیمار وارد می‌شود، ارائه شده است. پارامترهای ورودی به برنامه‌ی شبیه ساز در این مورد عبارتند از:

Procedure: Driving (Left/Right)

Type the joints Variables and Left or Right angular movement

d1(mm)=23

Theta2(Deg)=35

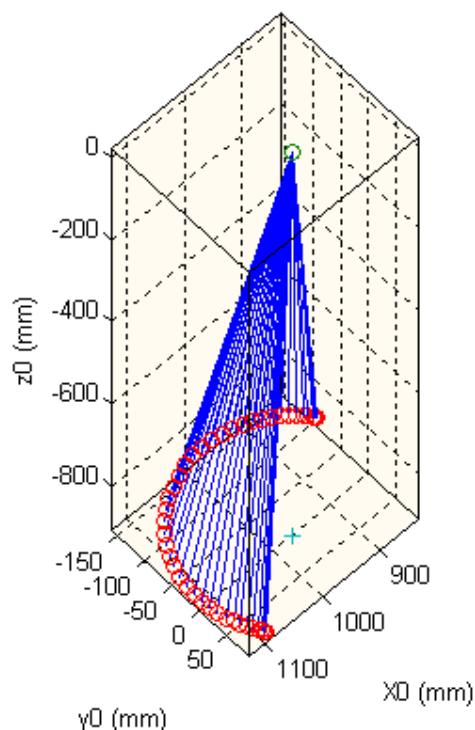
Theta3(Deg)=-100

Theta4(Deg)=91

Angular movement (Deg) (Left+/Right-)=180

در شکل (۶-۲۰) روند حرکت رابط سه در چرخاندن مجری نهایی حول نقطه‌ی ورود به شکم (+) نشان داده شده‌است. بدیهی است در این حالت لاپاروسکوپ که به صورت شعاع واصل بین محل ورود به شکم و انتهای رابط سه می‌باشد، حول نقطه‌ی ورود به شکم می‌چرخد.

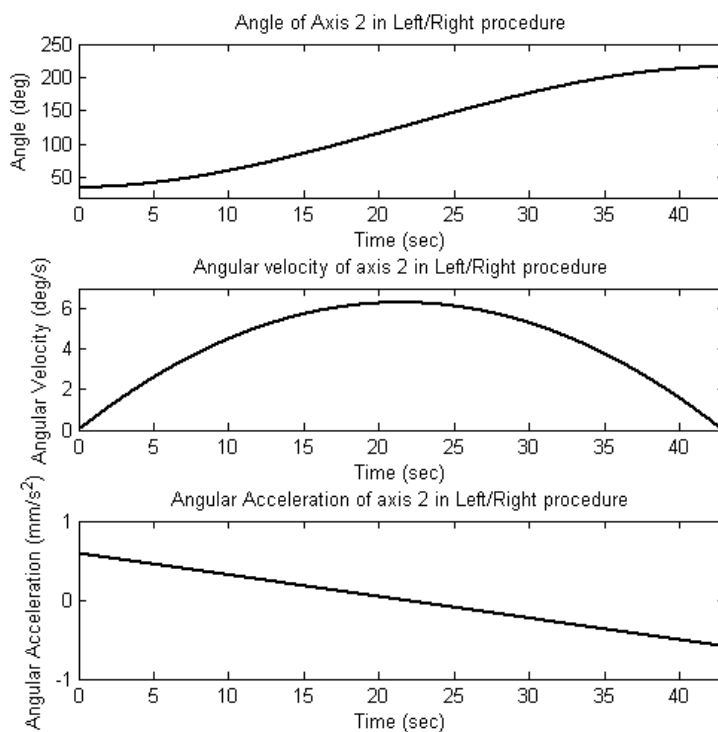
Simulation of Move Left/Right procedure for Link 3



شکل ۶-۲۰. شبیه سازی چرخش لاپاروسکوپ به سمت چپ هنگام ورود از روی سطح شکم بیمار در نرم افزار MATLAB: (+): محل ورود به شکم، (o) پایین: مجری نهایی (محل گیره‌ی لاپاروسکوپ)، (o) بالا: مبدا دستگاه مختصات سه، خطوط واصل: روند حرکت میله‌ی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ (رابط سه)

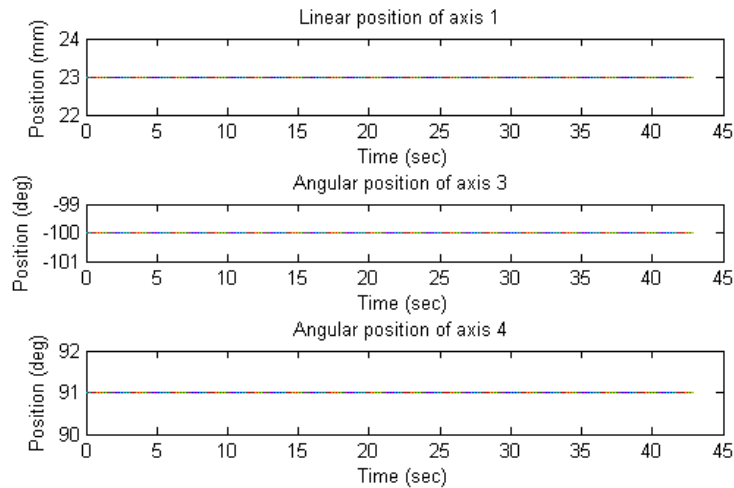
در شکل (۶-۲۱) زاویه، سرعت و شتاب زاویه‌ای محور دو که با زاویه، سرعت و شتاب زاویه‌ای لاپاروسکوپ حول محور قائم برابر است، برحسب زمان نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۶-۲۱) ملاحظه می‌شود، لاپاروسکوپ با سرعت زاویه‌ای صفر و شتاب زاویه‌ای حدود 0.6 deg/s^2 شروع به حرکت کرده و با رسیدن به سرعت زاویه‌ای حدود 6 deg/s شتاب منفی پیدا کرده و در نهایت با سرعت صفر متوقف شده‌است. همانطور که در بخش قبلی ذکر شد

الگوریتم تولید مسیر به گونه‌ای بوده که سر لاپاروسکوپ با سرعت متوسط 10 mm/s حرکت کند. بنابراین در این الگوریتم سرعت زاویه‌ای متناسب با طول داخل شده‌ی لاپاروسکوپ به داخل شکم تعیین می‌شود.



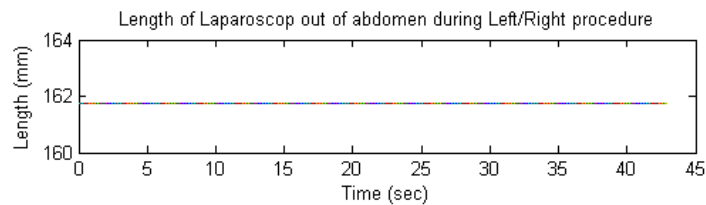
شکل ۶-۲۱. زاویه، سرعت و شتاب زاویه‌ای محور دو و لاپاروسکوپ حول محور قائم بر حسب زمان در حرکت چرخشی لاپاروسکوپ به چپ

از آنجا که در حرکت چرخش به چپ/راست، فقط محور دو حرکت داشته و محورهای ۱، ۳ و ۴ دارای حرکت نیستند در شکل (۶-۲۲) موقعیت این محورها بر حسب زمان در طول یک حرکت چرخشی ثابت مانده است.



شکل ۶-۲۲. موقعیت محورهای ۱، ۳ و ۴ برحسب زمان در هنگام یک حرکت چرخشی چپ/راست لاپاروسکوپ تغییر نمی‌کند

به منظور اثبات حرکت چرخشی خالص لاپاروسکوپ و اینکه در هنگام حرکت چرخشی طول لاپاروسکوپ داخل شده به شکم تغییر نمی‌کند، در شکل (۶-۲۳) طول لاپاروسکوپ خارج مانده از شکم در طول زمان حرکت بر حسب زمان رسم شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود این طول با گذشت زمان مقدار ثابتی داشته است.



شکل ۶-۲۳. طول لاپاروسکوپ خارج مانده از شکم در حین حرکت چرخشی چپ/راست بر حسب زمان

از آنجا که این حرکت بسیار ساده بوده، و در هنگام رسیدن دستور چپ/راست فقط محور دو به چرخش درمی‌آید، از ارائه‌ی نتایج شبیه سازی در نرم‌افزار vNASTRAN صرف‌نظر شده‌است.

۶-۴. بحث و نتیجه گیری

همانطور که در این بخش ملاحظه شد، روند تولید مسیر در مکانیزم انتخاب شده برای ربات بسیار ساده و کارآمد بوده و علاوه بر عدم نیاز به محاسبات پیچیده، منجر به پیمایش مسیرهایی کاملاً خطی یا کاملاً دایره‌ای خواهد شد. به بیان دیگر با استفاده از روش هندسی در تولید مسیر پیمایش نقاط بینابینی متداول در الگوریتم‌های تولید مسیر مد نظر قرار نگرفته و مسیر دقیقاً به طور مطلوب پیموده خواهد شد. علاوه بر این امکان اعمال شرایط مختلف از نظر سرعت و شتاب مسیر کاملاً میسر است و بر خلاف الگوریتم‌های مرسوم که روند پیمایش مسیر بین نقاط بینابینی را در نظر نمی‌گیرد، در این روش روند پیمایش مسیر به طور کامل تحت کنترل بوده و به عنوان ورودی در الگوریتم تولید مسیر قرار می‌گیرد.

نتایج حاصل از شبیه سازی پیمایش مسیر در نرم افزارهای MATLAB و vNASTRAN نیز با نشان دادن ثابت ماندن راستای لاپاروسکوپ در حرکات شعاعی و همچنین ثابت ماندن طول لاپاروسکوپ وارد شده به شکم در حرکات چرخشی حول نقطه ی ورود به شکم، صحت روابط به دست آمده در این بخش را تضمین می‌نمایند.

به این ترتیب با توجه به کاربرد خاص این ربات در جراحی لاپاروسکوپی که پیمایش مسیرهای کروی و شعاعی دقیق مورد نظر است، الگوریتم انتخاب شده برای تولید مسیر به دلیل توانایی کامل در پیمایش مسیرهای کروی و شعاعی دقیق، بسیار مناسب تشخیص داده می‌شود.

انتخاب اجزاء و طراحی تفصیلی

۷-۱. مقدمه

از آنجا که در این پروژه هدف طراحی و در نهایت ساخت رباتی با استفاده از قطعات پیش ساخته و مدولار بوده است، در این مرحله به انتخاب اجزاء و عملگرهای اصلی پرداخته و در ادامه نقشه‌های کلیه قطعات ربات شامل قطعات مدولار، رابطها و اجزاء بدنه‌ی ربات در بخش ضمائم ارائه می شود.

۷-۲. روش ساخت

از آنجا که کاربرد این ربات در بخش جراحی بوده و بایستی از ایمنی بالایی برخوردار باشد، سعی شده است به منظور ساخت ربات از قطعات مدولار با کیفیت و ایمنی بسیار بالا استفاده شود. با وجود قیمت بالای قطعات مدولار استفاده از آنها محاسنی چون امکان ساده‌ی اصلاح یا تغییر ربات طراحی شده و اطمینان از عملکرد مطلوب را به همراه دارد. به ویژه امکان ساخت سریع و ساده‌ی ربات از دیگر مزایای استفاده از قطعات مدولار می باشد. به این ترتیب پس از بررسی محصولات شرکت‌های مختلف مناسب‌ترین محصول با توجه به طراحی انجام شده انتخاب شده‌است.

۷-۳. نتیجه

قطعات مدولار ربات از محصولات شرکت امتک رباتیکس^۱ کشور آلمان انتخاب شده‌اند به گونه‌ای که محصولات انتخاب شده به خوبی با طراحی انجام شده هماهنگی داشته و نیازهای طراحی را برآورده می‌نمایند. این قطعات دارای ویژگی‌های منحصر به فرد و بسیار مطلوبی به ویژه برای پروژه‌های تحقیقاتی می‌باشند و شمار بسیاری از موسسات تحقیقاتی دنیا از این قطعات به منظور ساخت نمونه‌های تحقیقاتی ربات‌های مختلف استفاده کرده‌اند.

¹ amtec robotics

۱-۳-۷. عملگر خطی

این مدول که PLS090 نام دارد و همراه با موتور PSM090 استفاده می‌شود قادر است حرکت خطی با ریزنگری $5 \mu\text{m}/\text{Inc}$ و تکرارپذیری موقعیت $\pm 0.01 \text{ mm}$ را به خوبی انجام داده و در طراحی انجام شده به عنوان عملگر خطی ایفای نقش نماید. این مدول در شکل (۷-۱) نشان داده شده‌است. مشخصات فنی این مدول در بخش ضمایم ارائه شده است.



شکل ۷-۱. مدول خطی انتخاب شده از محصولات شرکت امتک مجهز به سروو موتور و بال اسکرو

۲-۳-۷. عملگر دورانی دو درجه آزادی

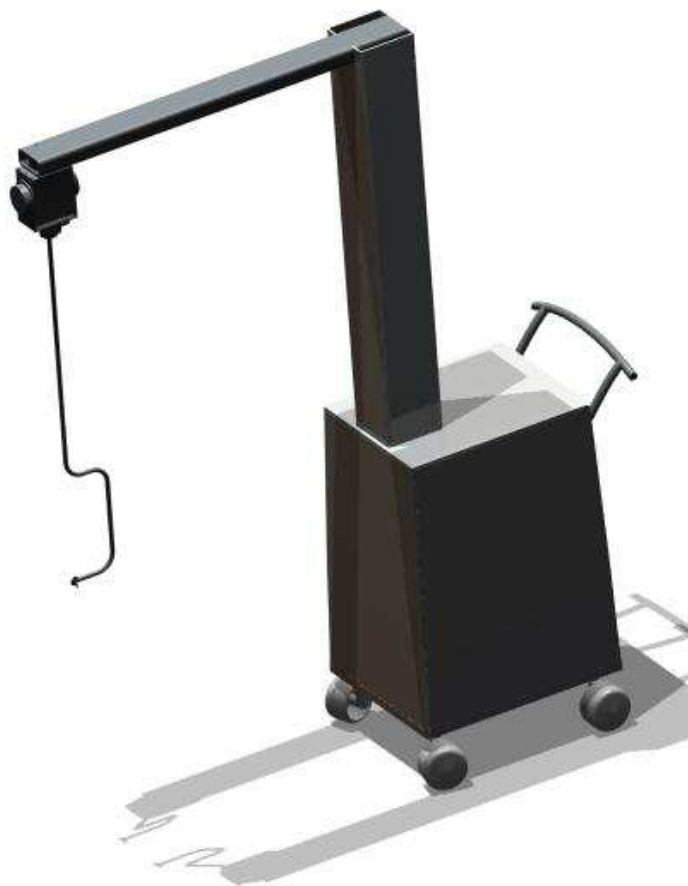
این مدول که PW070 نام دارد دارای دو درجه آزادی دورانی عمود بر هم می‌باشد و قادر است با ریزنگری 561 $\text{Inc}/^\circ$ در محور تیلت و $672 \text{ Inc}/^\circ$ در محور پن و با قابلیت تکرارپذیری موقعیت $\pm 0.02^\circ$ حرکات دورانی را انجام دهد. این مدول در شکل (۷-۲) نشان داده شده‌است. مشخصات فنی این مدول در بخش ضمایم ارائه شده‌است.



شکل ۷-۲. مدول دورانی دو درجه آزادی انتخاب شده از محصولات شرکت امتک مجهز به دو سروو موتور و انکودر جداگانه

۷-۴. طراحی تفصیلی

با توجه به ابعاد کلی در نظر گرفته شده برای ربات در فصل چهارم، طراحی ساختمان ربات از پایه تا گیره‌ی نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ در نرم افزار Solid Works انجام شده است. قطعات حساس به طور حدودی تحت بارگذاری قرار گرفته و برای هر قطعه ضریب ایمنی متناسب با کاربرد و نقش آن در نظر گرفته شده است. شمایل نهایی ربات طراحی شده در این پروژه در شکل (۷-۳) و نقشه‌های مربوط به قطعات و اجزای مختلف در بخش ضمایم ارائه شده است.



شکل ۷-۳. ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی

فصل هشتم

نتایج، نوآوری‌ها و برنامه‌های آتی

۸-۱. نتایج

نتیجه‌ی نهایی این پایان نامه طراحی یک ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی می‌باشد که قادر است تنها با استفاده از سه عملکرد کلیه‌ی حرکات موردنیاز در عمل نگهداری و حرکت لاپاروسکوپ را انجام داده و در جراحی لاپاروسکوپی به عنوان فرد نگهدارنده‌ی لاپاروسکوپ ایفای نقش نماید.

۸-۲. نوآوری‌ها

با بررسی دقیق نیازهای کاربری در جراحی لاپاروسکوپی از طریق شرکت در اطاق عمل و بحث و بررسی با جراحان متخصص لاپاروسکوپی، طراحی مکانیزمی فقط با سه درجه آزادی فعال که بتواند کلیه‌ی نیازهای کاربری را تامین نماید، از جمله نوآوری‌های اصلی این پایان نامه می‌باشد. همچنین با توجه به نمونه‌ی تجاری رباتی با این کاربرد یعنی ربات ایساپ و مشکلات موجود در این ربات که منجر به انحلال کمپانی سازنده‌ی آن شده است، در ربات طراحی شده طی این پایان نامه مشکل اصلی ربات ایساپ یعنی چرخش زاویه‌ی قائم دید و نیاز به اصلاح توسط جراح برطرف شده است. علاوه براین مکانیزم ربات با توجه به نیاز خاص جراحی لاپاروسکوپی طراحی شده و برخلاف ربات ایساپ هیچ یک از بازوهای ربات سطح روی بدن بیمار را اشغال نکرده و برخوردی با سایر ابزارها ندارند.

با توجه به نیاز کاربری منوط به ایجاد حرکات شعاعی کروی در لاپاروسکوپ، مکانیزم ربات به گونه‌ای طراحی شده که حرکات شعاعی کروی کامل را به سادگی و با دقت و کیفیت مطلوب انجام داده و ایجاد چنین حرکاتی نیاز به محاسبات زیادی ندارد.

از جمله مزایا و نوآوری‌های مکانیزم طراحی شده برای ربات نسبت به سایر مکانیزم‌های موجود طبق آنچه در فصل

چهارم آورده شده می‌توان ب طور خلاصه به موارد زیر اشاره کرد:

۱. استفاده از حداقل تعداد درجات آزادی فعال (سه درجه)
 ۲. عدم نیاز به اصلاح زاویه‌ی قائم دید
 ۳. عدم وجود عملگر فعال در انتهای میچ و در نتیجه ظریف بودن این ناحیه
 ۴. امکان قرارگیری میچ ربات در فضای محدود بین ابزارها
 ۵. امکان حرکت لاپاروسکوپ به زیر دست جراح
 ۶. عدم محدودیت در بازه‌ی حرکتی لاپاروسکوپ
 ۷. پوشش کل فضای کاری موردنیاز برای هر نوع عمل لاپاروسکوپی
 ۸. عدم اشغال فضا روی بدن بیمار
 ۹. عدم برخورد رابطها با سایر ابزار جراحی
 ۱۰. طراحی و انتخاب فضای کاری رابطها در فضایی غیر مشترک با فضای کاری جراح و سایر ابزارها
 ۱۱. عدم ایجاد مانع روی بدن بیمار
 ۱۲. عدم نیاز به تنظیم نقطه‌ی ثابت حرکت در راستای قائم
 ۱۳. انطباق خودکار با حرکات بدن بیمار در راستای قائم
 ۱۴. استفاده از حداقل تعداد رابطهای متحرک و حرکات محدود و ظریف آنها
 ۱۵. سادگی امکان ایجاد حرکات روی مسیرهای کروی و شعاعی حول نقطه‌ی ورود به شکم
 ۱۶. امکان ساخت مدولار
 ۱۷. امکان ساخت ساده ربطها با حداقل هزینه‌ی ممکن
- از جمله موارد نامطلوب برای کاربر در استفاده از این ربات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
۱. نیاز به انطباق اولیه‌ی نقطه‌ی ثابت حرکت در صفحه‌ی افق بر محل ورود به شکم، قبل از شروع عمل
 ۲. عدم انطباق خودکار با حرکات بدن بیمار در صفحه‌ی افق
- شایان ذکر است از آنجا که معمولاً بدن بیمار در راستای افق حرکت چندانی ندارد، مشکل دوم اهمیت زیادی ندارد.

۸-۳. برنامه‌های آتی

هدف اصلی از طراحی این ربات، ساخت نمونه‌ی واقعی و ورود آن به اطاق عمل پس از انجام تست‌های فنی و کلینیکی می باشد. در این راستا مدول‌های انتخاب شده از شرکت امتک خریداری شده و گام بعدی ساخت سازه‌ی ربات طراحی شده می باشد. در ادامه سیستم کنترل ربات طراحی خواهد شد. این ربات بایستی تحت فرمان مستقیم جراح کنترل شود و به عنوان دست سوم جراح، طبق فرمان جراح شش حرکت (بزرگنمایی مثبت و منفی، حرکت به بالا و پایین و حرکت به چپ و راست) را در سر لاپاروسکوپ ایجاد نماید. نحوه‌ی کنترل ربات با استفاده از اهرم زیر پای جراح خواهد بود.

انجام تست‌های فنی و کلینیکی و در نهایت ورود ربات به اطاق عمل از برنامه‌های آتی این پروژه می باشد.

-
- [1] N. J. Soper, "Laparoscopic General Surgery, Past, Presents, and Future", Surgery, Vol. 113, No. 1, pp. 1-3, 1993.
- [2] F. Tendick, R. Jennings, G. Tharp, and L. Stark, "Sensing and manipulation problems in endoscopic surgery: experiment, analysis and observation," Presence, vol. 2, no. 1, pp. 66-81, winter 1993.
- [3] V. Gupta, N. Reddy and P. Batur, "Force in Surgical Tools: Comparison Between Laparoscopic and Surgical Forces", Proceedings of 1996 IEEE Engineering in Medicine & Biology Conference, Paper Number 668, Cambridge, 1996.
- [4] G. H. Ballantyne, "Atlas of Laparoscopic Surgery", Saunders, 2000.
- [5] Don B. Chaffin, G. B. J. Andersson, B. J. Martin, "Occupational Biomechanics", John Wiley & Sons, 1999.
- [6] FDA Consumer magazine, May-June, 2002.
- [۷] ر. ماتوسک، "طراحی مهندسی"، ترجمه ع. امیرفضلی، آ. متقی پور، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ۱۳۷۵.
- [8] Eldridge, B., K. Gruben, D. LaRose, J. Funda, S. Gomory, J. Karidis, G. McVicker, R. Taylor, and J. Anderson, "A Remote Center of Motion Robotic Arm for Computer Assisted Surgery". Robotica, 14(1 (Jan-Feb)): p. 103-109, 1996.
- [9] Neisius, B., P. Dautzenberg, and R. Trapp., "Robotic Manipulator for Endoscopic Handling of Surgical Effectors and Cameras", in Proc. Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. 1994. Pittsburgh.
- [10] Taylor, R.H., et al., "A Model-Based Optimal Planning and Execution System with Active Sensing and Passive Manipulation for Augmentation of Human Precision in Computer-Integrated Surgery", in Proc. 1991 Int. Symposium on Experimental Robotics. 1991. Toulouse, France: Springer-Verlag.
- [11] Sackier, J.M. and Y. Wang, "Robotically Assisted Laparoscopic Surgery: from Concept to Development, in Computer-Integrated Surgery", R. Taylor, *et al.*, Editors. 1996, MIT Press: Cambridge, Mass. p. 577-580.
- [12] Hurteau, R., et al., "Laparoscopic Surgery Assisted by a Robotic Camerman: Concept and Experimental Results", in IEEE Conference on Robotics and Automation. 1994. San Diego.
- [13] Funda, J., et al., "Comparison of two mainpulator designs for laparoscopic surgery", in 1994 SPIE Int's Symposium on Optical Tools for Manufacturing and Advanced Automation. 1994. Boston: October.
- [14] Stoianovici, D., et al. An efficient needle injection technique and radiological guidance method for percutaneous procedures. in First Joint Conference: CRVMed II & MRCAS III, March. 1997. Grenoble, France.

- [15] Masamune, K., et al., "A newly developed stereotactic robot with detachable driver for neurosurgery", In Proc. 2nd Int. Symp. on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery (MRCAS). 1995. Baltimore, Md.: MRCAS '95 Symposium, C/O Center for Orthop Res, Shadyside Hospital, Pittsburgh, Pa.
- [16] Masutani, Y., et al., "Computer Aided Surgery (CAS) System for Stereotactic Neurosurgery", In Proc. Computer Vision and Robotics in Medicine (CVRMED). 1995. Nice, France: Springer.
- [17] R.H. Taylor, et al., "Human-Machine Interfaces, in Computer-Integrated Surgery", 1996, MIT Press: Cambridge, Mass. p. 201-254.
- [18] Reichenspurner, H., et al., "Use of the voice controlled and computer-assisted surgical system zeus for endoscopic coronary artery surgery bypass grafting", J. Thoracic and Cardiovascular Surgery, 1999. 118(1).
- [19] Mitsuishi, M., et al., "A Telemicrosurgery System with Colocated View and Operation Points and Rotational-force-feedback -free Master Manipulator", in Proc. 2nd Int. Symp. on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. 1995. Baltimore, Md.: MRCAS '95 Symposium, C/O Center for Orthop Res, Shadyside Hospital, Pittsburgh, Pa.
- [20] Green, P., "Telepresence Surgery", in NSF Workshop on Computer Assisted Surgery. 1993. Washington, D.C.
- [21] Green, P., et al., "Mobile Telepresence Surgery," in Proc. 2nd Int. Symp. On Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. 1995. Baltimore, Md.: MRCAS '95 Symposium, C/O Center for Orthop Res, Shadyside Hospital, Pittsburgh, Pa.
- [22] Guthart, G.S. and J.K. Salisbury. The Intuitive Telesurgery System: Overview and Application. In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2000). 2000. San Francisco.
- [23] Charles, S., R.E. Williams, and B. Hamel, "Design of a Surgeon-Machine Interface for Teleoperated Microsurgery", Proc. of the Annual Int'l Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1989: p. 11:883-884.
- [24] Salcudean, S.E., S. Ku, and G. Bell., "Performance measurement in scaled teleoperation for microsurgery", in First joint conference computer vision, virtual reality and robotics in medicine and medical robotics and computer-assisted surgery. 1997. Grenoble, France: Springer.
- [25] Ku, S. and S.E. Salcudean, "Dexterity enhancement in microsurgery using a motion-scaling system and microgripper", in IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics. 1995. Vancouver, BC, Canada: IEEE.
- [26] <http://www.intuitivesurgical.com/products/index.html>
- [27] <http://www.computermotion.com/products.htm>
- [28] <http://www.armstrong-healthcare.com/Products.htm>
- [29] <http://www.robodoc.com/eng/neuromate.html>
- [30] Taylor, R., J. Funda, D. LaRose, Y. Kim, N. Bruun, N. Swarup, C. Cutting, and M. Treat. "A Passive/Active Manipulation System for Surgical Augmentation" in First Int. Workshop on Mechatronics in Medicine, Malaga, Spain, 1992.
- [31] Funda, J., B. Eldridge, K. Gruben, S. Gomory, and R. Taylor. "Comparison of two manipulator designs for laparoscopic surgery" in 1994 SPIE Int's Symposium on Optical Tools for Manufacturing and Advanced Automation. Boston, October, 1994.

- [32] Funda, J., R. Taylor, K. Gruben, and D. LaRose. "Optimal Motion Control for Teleoperated Surgical Robots" in 1993 SPIE Intl. Symp. on Optical Tools for Manuf. & adv. Autom, Boston, 1993.
- [33] M. Jinno, T. Sunaoshi, K. Ido, K. Tomioka, "Manipulator Apparatus", US Patent Application Publication No.: US 2005/0222587 A1, Oct. 2005.
- [34] D. Pieper, B. Roth, "The Kinematics of Manipulators Under Computer Control", Proceedings of the Second International Congress on Theory of machines and Mechanisms, Vol. 2, Zakopane, Poland, pp. 159-169, 1969.
- [35] A. Faraz. S. Payandeh, "A Robotic Case Study: Optimal Design for Laparoscopic Positioning Stands", Proc. International Conference on Robotics and Automation, 1997.
- [36] M. J. H. Lum, J. Rosen, M. N. Sinanan, B. Hannaford, "Kinematic Optimization of a Spherical Mechanism for a Minimally Invasive Surgical Robot", Proceeding of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, New Orleans, LA., April 2004.
- [37] M. Jinno, "Manipulator", US Patent No. 6889116 B2, May 2005.
- [38] R. H. Taylor, Ossining, N. Y., "System and Method for Augmentation of Surgery", US Patent No. 5402801, April 1995.
- [39] S. J. Blumenkranz, D. J. Rosa, "Manipulator Positioning Linkage for Robotic Surgery", US Patent No. 6246200 B1, Jun. 2001.
- [40] F. H. Moll, D. J. Rosa, A. D. Ramans, et al., "Arm Cart for Telerobotic Surgical System", US Patent No. 6837883 B2, Jan. 2005.
- [41] S. J. Blumenkranz, "Ceiling and Floor Mounted Surgical Robot Set-Up Arms", US Patent No. 6933695 B2, Aug. 2005.
- [42] J. M. Putman, "Endoscope Stabilizer", US Patent No. 5184601, Feb. 1993.
- [43] Y. Wang, K. P. Laby, "Automated Endoscope System for Optimal Positioning", US Patent No. 5553198, Sep. 1996.
- [44] Y. Wang, K. P. Laby, "Automated Endoscope System for Optimal Positioning", US Patent No. 5657429, Aug. 1997.
- [45] Y. Wang et al., "Method and Apparatus for Performing Minimally Invasive Cardiac Procedures", US Patent No. 5855583, Jan. 1999.
- [46] Y. Wang et al., "Method and Apparatus for Performing Minimally Invasive Surgical Procedures", US Patent No. 6063095, May 2000.
- [47] Y. Wang et al., "Method and Apparatus for Performing Minimally Invasive Surgical Procedures", US Patent No. 6905460 B2, Jun. 2005.
- [48] <http://www.computermotion.com/products/index.html>
- [49] J. L. M. Vazquez, A. M. Martinez, "Hand Free Navigation System In Laparoscopy Surgical Experience", Proceeding of 12th Annual Medicine Meets Virtual Reality Conference, MMVR12, Newport Beach, California, Jan. 14-17, 2004.
- [50] V. F. Munoz, J. Gomez-De-Gabriel, J. Fernandez-Lozano, I. Garcia-Morales, R. Molina-Mesa, C. Perez-del-Pulgar, J. Seron-Barba, M. Azouaghe, " Design and control of a robotic assistant for laparoscopic surgery", 9th International Symposium on Intelligent Robotic Systems, SIRS 2001, Toulouse (France), 18-20 July 2001.

- [51] 5. C. Cao, C. MacKenzie and S. Payandeh, "Task Analysis of Laparoscopic Surgery: Determination of Requirements for Endoscopic Tool Design", Proceedings of 1996 ASME Symposium on Haptic Interface, pp. 453-461, 1996.
- [52] 6. Taylor, R.H., S. Lavalley, G. Burdea, and R. Mosges, eds. "Computer-Integrated Surgery.", Cambridge, Mass., MIT Press, 1996.
- [53] 7. A. J. Madhani. "Design of Teleoperated Surgical Instruments for Minimally Invasive Surgery", PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [54] 9. Taylor, R.H. "Robots as Surgical Assistants: Where we are, wither we are tending and how to get there" in 6th Conference Artificial Intelligenece in Medicine, Europe (AIME 97). Grenoble, France, Springer,1997.
- [55] 10. Taylor, R.H., G. Fichtinger, P. Jensen, and C. Riviere, "Medical Robotics and Computer-Integrated Surgery: Information-driven Systems for 21st Century Operating Rooms". J. Journal of Computer Assisted Surgery, 2(2): p. 47-53, 2000.
- [۵۶] ج. کریگ، "مکانیک و کنترل در رباتیک"، ترجمه ع. مقداری، ف. میرفخرایی، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۷.
- [57] K. Waldorn, "Design of Arms", in The International Encyclopedia of Robotics, R. Dorf and S. Nof, Editors, John Wiley and Sons, 1988.
- [58] T. Yoshikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms", the International Jornal of Robotic Research, Vol. 4, No. 2, MIT Press, 1985.
- [59] J. Y. S. Luh, M. W. Walker, R. P. Paul, "On- Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators", Transaction of the ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control, 1980.

نظرسنجی و ارزیابی نیاز جامعه‌ی جراحی به ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی:

سوالات عرضه شده و جوابهای داده شده در نظرسنجی اولین کنگره‌ی انجمن اندویورولوژی و یورولاپاروسکوپی

ایران در تاریخ ۲۲- ۲۴ مهرماه ۱۳۸۳ عبارتند از:

- ۱- در چه زمینه‌هایی علاقمند به همکاری با این طرح می‌باشید؟
پاسخ‌ها: ارائه ایده، تجربه، بکارگیری دستگاه در جهت بهبود قابلیت‌های آن
- ۲- تا چه حد با رباتهای جراحی و کاربردهای آنها آشنایی دارید؟
پاسخ‌ها: در حد مشاهده در اطاق عملهای خارج کشور و مقالات مربوطه
- ۳- کاربرد این دستگاه را در عملهای جراحی تا چه حد مفید ارزیابی می‌کنید؟
پاسخ‌ها: با توجه به طولانی بودن عملهای لاپاروسکوپی و خستگی کمکها و تحت تاثیر قرار گرفتن کیفیت عمل با مهارت و دقت شخص (کمک جراح)، استفاده از ربات کمک جراح می‌تواند مفید واقع شود.
- ۴- آیا شخصا علاقمند به استفاده از دستگاه در عملهای جراحی لاپاروسکوپی می‌باشید؟
پاسخ‌ها: بلی
- ۵- آیا بیمارستانی که شما با آن همکاری می‌کنید علاقمند به خریداری و بکارگیری این دستگاه می‌باشد؟
پاسخ‌ها: در صورتی که قیمت نهایی دستگاه مناسب باشد. گروهی از جراحان نیز عقیده داشتند که در صورت مناسب بودن قیمت دستگاه، جراحان نیز مایل به داشتن شخصی این دستگاه برای کامل کردن ست دستگاه‌های جراحی خود می‌باشند تا مستقل‌تر شوند.
- ۶- با توجه به بهای دستگاه‌های مشابه خارجی، چه بهایی را برای فروش دستگاه در بازار داخلی مناسب می‌دانید؟
پاسخ‌ها: گروهی از جراحان به این سوال جواب نداده و بعضی از آنها مبلغ ۲۰۰ میلیون ریال را درج کرده بودند.

اسامی جراحانی که در این نظر سنجی شرکت کرده بودند:

- | | |
|-----------------------------|------------------------------------|
| ۱- دکتر ناصر سیم فروش | ریاست انجمن اندویورولوژی ایران |
| ۲- دکتر عباس بصیری | رئیس مرکز تحقیقات بیماری های کلیوی |
| ۳- دکتر سید امیر محسن ضیائی | بیمارستان شهید لبافی نژاد- تهران |
| ۴- دکتر حمیدرضا غلامرضایی | بیمارستان شهید چمران- تهران |
| ۵- دکتر صفری نژاد | بیمارستان میلاد- تهران |
| ۶- دکتر خلیج | دانشگاه شاهد- تهران |
| ۷- دکتر حسن یاری | بیمارستان --- تهران |
| ۸- دکتر نوری زاده | بیمارستان امام خمینی- تبریز |
| ۹- دکتر رباب مقصودی | بیمارستان امام خمینی - تبریز |
| ۱۰- دکتر موسوی بهار | بیمارستان اکباتان- همدان |
| ۱۱- دکتر محمد یزدانی | بیمارستان خورشید بخش- اصفهان |
| ۱۲- دکتر مهدی حسینی | بیمارستان پیمانیه- جهرم |
| ۱۳- دکتر نجفی سمنانی | بیمارستان امام رضا- بیرجند |
| ۱۴- دکتر فائز | شرکت آب نوس طب -تهران |

آنچه که شایان توجه است، این است که نه تنها جراحان ساکن در تهران از این طرح حمایت نمودند بلکه حمایت و

استقبال شرکت کنندگان شهرستانی از جمله تبریز، اصفهان، همدان، مشهد، بیرجند و جهرم نیز قابل توجه بود.

برنامه مربوط به حل سینماتیک مستقیم در نرم افزار MATLAB:

```
clear all
clc
disp('Procedure: Forward Kinematics.')
disp('Type the joints Variables, Compute the transformation matrix T.')
l1=965;
l2=920;
d1=input('d1(mm)=');
t2=input('Theta2(Deg)=')*pi/180;
t3=input('Theta3(Deg)=')*pi/180;
t4=input('Theta4(Deg)=')*pi/180;
t34=t3+t4;
T=[cos(t2)*cos(t34) -cos(t2)*sin(t34) sin(t2) l2*cos(t2)*cos(t3)+l1; sin(t2)*cos(t34) -
sin(t2)*sin(t34) -cos(t2) l2*sin(t2)*cos(t3); sin(t34) cos(t34) 0 l2*sin(t3)+d1; 0 0 0 1]
plot(l1,0,'+',l2*cos(t2)*cos(t3)+l1,l2*sin(t3)+d1,'o')
```

برنامه مربوط به حل مساله سینماتیک وارون در نرم افزار **MATLAB**:

```
clear all
disp('Procedure Inverse Kinematics:')
disp('Type the components of the transformation matrix of wrist frame relative to base
frame:')
T(1,1)=input('r11=');r11=T(1,1);
T(1,2)=input('r12=');r12=T(1,2);
T(1,3)=input('r13=');r13=T(1,3);
T(2,1)=input('r21=');r21=T(2,1);
T(2,2)=input('r22=');r22=T(2,2);
T(2,3)=input('r23=');r23=T(2,3);
T(3,1)=input('r31=');r31=T(3,1);
T(3,2)=input('r32=');r32=T(3,2);
T(3,3)=input('r33=');r33=T(3,3);
T(1,4)=input('Px(mm)=');x=T(1,4);
T(2,4)=input('Py(mm)=');y=T(2,4);
T(3,4)=input('Pz(mm)=');z=T(3,4);
T(4,1)=0;T(4,2)=0;T(4,3)=0;
T(4,4)=1;
T
l1=965;l2=920;
t2=atan2(r13,-r23);
if t2==0 | t2==pi
    c3=(x-l1)/(l2*cos(t2));
else
    c3=y/(l2*sin(t2));
end
s3=-sqrt(1-c3^2);
t3=atan2(s3,c3);
t34=atan2(r31,r32);
t4=t34-t3;
d1=z-l2*sin(t3);
if (0<=d1<=350) & (-pi<=t2<=pi) & (-160*pi/180<=t3<=90*pi/180) &
```

```

(0<=t4<=108.8*pi/180)
    d1=d1
    Theta2=t2*180/pi
    Theta3=t3*180/pi
    Theta4=t4*180/pi
else
    disp('Out of range of joints')
end

```

فرایند بررسی صحت حل مسائل سینماتیک مستقیم و وارون در نرم افزار **MATLAB**:

Procedure: Forward Kinematics.

Type the joints Variables, Compute the transformation matrix T.

```

d1(mm)=100
Theta2(Deg)=90
Theta3(Deg)=-135
Theta4(Deg)=45

```

T =

```

0.0000    0.0000    1.0000   965.0000
0.0000    1.0000   -0.0000  -650.5382
-1.0000    0.0000     0.0000  -550.5382
     0         0         0     1.0000

```

Procedure Inverse Kinematics:

Type the components of the transformation matrix of wrist frame relative to base frame:

```

r11=0
r12=0
r13=1
r21=0
r22=1
r23=0
r31=-1
r32=0
r33=0
Px(mm)=965
Py(mm)=-650.5382
Pz(mm)=-550.5382

```

T =

```

0     0    1.0000   965.0000
0    1.0000     0.0000  -650.5382

```

```
-1.0000    0    0 -550.5382
    0    0    0    1.0000
```

d1 =

100.0001

Theta2 =

90

Theta3 =

-135.0000

Theta4 =

45.0000

شبیه سازی حرکت بزرگنمایی مثبت / منفی در نرم افزار **MATLAB**:

```
clear all
clc
disp('Procedure: Driving (Zoom In/Out)')
disp('Type the joints Variables and lenght of Zoom')
l1=965;
l2=920;
l1=300;%Lenght of Laparoscope
d1=input('d1(mm)=');
t2=input('Theta2(Deg)=')*pi/180;
t3=input('Theta3(Deg)=')*pi/180;
t4=input('Theta4(Deg)=')*pi/180;
dl=-1*input('lenght of Zoom (mm)(In+/Out-)=');
v=(abs(dl)/dl)*10; %(mm/s)
```

```

tf=dl/v;
l0=l2*cos(t3)/cos(a0)
if ll<l0
    disp('Laparoscope is out of abdomen')
else
    zi0=l0*sin(t34)+l2*sin(t3)+d1;
    figure
    for t=0:2:tf;
        h=-l2*sin(t3)+l*sin(a0);
        d1=zi0+h;
        xo4=l2*cos(t2)*cos(t3)+l1;
        yo4=l2*sin(t2)*cos(t3);
        zo4=l2*sin(t3)+d1;
        x=[l1,xo4];
        y=[d1,zo4];
        plot(x,y,'-',l1,d1,'o',xo4,zo4,'o',l1,zi,'+')
        xlabel('X0 (mm)')
        ylabel('Z0 (mm)')
        title('Simulation of Zoom In/Out procedure for Link 3')
        hold on
        axis equal
    end
    t=0:.01:tf;
    l=l0+3/tf.^2*dl*t.^2-2/tf.^3*dl*t.^3;
    lv=6/tf.^2*dl*t-6/tf.^3*dl*t.^2;
    la=6/tf.^2*dl-12/tf.^3*dl*t;
    figure
    subplot(3,1,1);
    plot(t,ll-l);
    xlabel('Time (sec)')
    ylabel('Length (mm)')
    title('Length of Laparoscope in the abdomen')
    subplot(3,1,2);
    plot(t,-lv);
    xlabel('Time (sec)')

```

```

ylabel('Velocity (mm/s)')
title('Linear velocity of Laparoscope in Zoom procedure ')
subplot(3,1,3);
plot(t,-la);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Acceleration (mm/s^2)')
title('Linear Acceleration of Laparoscope in Zoom procedure ')
t3=-acos(l/l2*cos(a0));
t4=t34-t3;
%i:Incision
h=-l2*sin(t3)+l*sin(a0);
d1=zi0+h;
zi=l*sin(t34)+l2*sin(t3)+d1;
figure
subplot(3,1,1);
plot(t,d1);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Position (mm)')
title('Linear position of axis 1 ')
subplot(3,1,2);
plot(t,t3*180/pi);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Position (deg)')
title('Angular position of axis 3 ')
subplot(3,1,3);
plot(t,t4*180/pi);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Position (deg)')
title('Angular position of axis 4 ')
figure
a0=t4+t3+pi;
plot(t,a0*180/pi)
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Angle (deg)')
title('Angular position of Laparoscope from the horizontal plane during Zoom

```

```
Procedure ')  
  end
```

شبیه سازی حرکت چرخشی بالا/ پایین در نرم افزار **MATLAB**:

```
clear all
clc
disp('Procedure: Driving (Up/Down)')
disp('Type the joints Variables and Up or Down angular movement')
l1=965;
l2=920;
l1=300;
d1=input('d1(mm)=');
t2=input('Theta2(Deg)=')*pi/180;
t3=input('Theta3(Deg)=')*pi/180;
t4=input('Theta4(Deg)=')*pi/180;
da=pi/180*input('Angular movement (Deg) (Up+/Down-)=');
zi0=l0*sin(t340)+l2*sin(t3)+d1;
if l1<l0
    disp('Laparoscope is out of abdomen')
else
    v=(abs(da)/da)*10;%(mm/s)
    w=v/(l1-l0)
    tf=da/w;
    for t=0:2:tf;
        a=a0+3/tf.^2*da*t.^2-2/tf.^3*da*t.^3;
        t3=-acos(l0/l2*cos(a));
        t34=a-pi;
        t4=t34-t3;
        %i:Incision
        h=-l2*sin(t3)+l0*sin(a);
        d1=zi0+h;
        zi=l0*sin(t34)+l2*sin(t3)+d1;
        %o4: Origin of Frame 4
        xo4=l2*cos(t2)*cos(t3)+l1;
        yo4=l2*sin(t2)*cos(t3);
        zo4=l2*sin(t3)+d1;
        x=[l1,xo4];
        y=[d1,zo4];
```

```

plot(x,y,'-',l1,d1,'o',xo4,zo4,'o',l1,zi,'+')
xlabel('X0 (mm)')
ylabel('Z0 (mm)')
title('Simulation of Move Up/Down procedure for Link 3')
hold on
axis equal
end
t=0:.01:tf;
%xi=l0*cos(t2)*cos(t34)+l2*cos(t2)*cos(t3)+l1=l1;
%yi=l0*sin(t2)*cos(t34)+l2*sin(t2)*cos(t3)=0;
%zi=l0*sin(t34)+l2*sin(t3)+d1;
%plot(l1,zi)
av=6/tf.^2*da*t-6/tf.^3*da*t.^2;
aa=6/tf.^2*da-12/tf.^3*da*t;
figure
subplot(3,1,1);
plot(t,a*180/pi);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Angle (deg)')
title('Angle of Laparoscope out of abdomen from the horizontal Plane')
subplot(3,1,2);
plot(t,av*180/pi);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Angular Velocity (deg/s)')
title('Angular velocity of Laparoscope in Up/Down procedure')
subplot(3,1,3);
plot(t,aa*180/pi);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Angular Acceleration (deg/s^2)')
title('Angular Acceleration of Laparoscope in Up/Down procedure ')
t3=-acos(l0/l2*cos(a));
t34=a-pi;
t4=t34-t3;
%i:Incision
h=-l2*sin(t3)+l0*sin(a);

```

```

d1=zi0+h;
zi=l0*sin(t34)+l2*sin(t3)+d1;
figure
subplot(3,1,1);
plot(t,d1);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Position (mm)')
title('Linear position of axis 1 ')
subplot(3,1,2);
plot(t,t3*180/pi);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Position (deg)')
title('Angular position of axis 3 ')
subplot(3,1,3);
plot(t,t4*180/pi);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Position (deg)')
title('Angular position of axis 4 ')
%o4: Origin of Frame 4
xo4=l2*cos(t2)*cos(t3)+l1;
yo4=l2*sin(t2)*cos(t3);
zo4=l2*sin(t3)+d1;
figure
plot(l1,d1,'o',xo4,zo4,l1,zi,'+')
axis equal
r=sqrt((xo4-l1).^2+(zo4-zi).^2+(yo4-0).^2);
figure
plot(t,r)
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Length (mm)')
title('Length of Laparoscop out of abdomen during Up/Down procedure')
l0 %Lenght of Laparoscope out of abdomen
end

```

شبیه سازی حرکت چرخشی چپ / راست در نرم افزار MATLAB:

```
clear all
clc
disp('Procedure: Driving (Left/Right)')
disp('Type the joints Variables and Left or Right angular movement')
l1=965;
l2=920;
l1=300;
d1=input('d1(mm)=');
t20=input('Theta2(Deg)=')*pi/180;
t3=input('Theta3(Deg)=')*pi/180;
t4=input('Theta4(Deg)=')*pi/180;
da=pi/180*input('Angular movement (Deg) (Left+/Right-)=');
a0=t4+t3+pi;
t340=a0-pi;
l0=l2*cos(t3)/cos(a0);
zi0=l0*sin(t340)+l2*sin(t3)+d1;
if l1<l0
    disp('Laparoscope is out of abdomen')
else
    v=(abs(da)/da)*10;%(mm/s)
    w=v/((l1-l0)*cos(pi-a0))
    tf=da/w;
    for t=0:1:tf;
        t2=t20+3/tf.^2*da*t.^2-2/tf.^3*da*t.^3;
        t3=-acos(l0/l2*cos(a0));
        t34=a0-pi;
        t4=t34-t3;
        %i:Incision
        h=-l2*sin(t3)+l0*sin(a0);
        d1=zi0+h;
        zi=l0*sin(t34)+l2*sin(t3)+d1;
        %o4: Origin of Frame 4
        xo4=l2*cos(t2)*cos(t3)+l1;
        yo4=l2*sin(t2)*cos(t3);
```

```

zo4=l2*sin(t3)+d1;
x=[l1,xo4];
y=[0,yo4];
z=[d1,zo4];
plot3(x,y,z,'-',l1,0,d1,'o',xo4,yo4,zo4,'o',l1,0,zi,'+')
xlabel('X0 (mm)')
ylabel('y0 (mm)')
zlabel('z0 (mm)')
title('Simulation of Move Left/Right procedure for Link 3')
hold on
axis equal
end
t=0:.01:tf;
%xi=l0*cos(t2)*cos(t34)+l2*cos(t2)*cos(t3)+l1=l1;
%yi=l0*sin(t2)*cos(t34)+l2*sin(t2)*cos(t3)=0;
%zi=l0*sin(t34)+l2*sin(t3)+d1;
%plot(l1,zi)
t2=t20+3/tf.^2*da*t.^2-2/tf.^3*da*t.^3;
t2v=6/tf.^2*da*t-6/tf.^3*da*t.^2;
t2a=6/tf.^2*da-12/tf.^3*da*t;
figure
subplot(3,1,1);
plot(t,t2*180/pi);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Angle (deg)')
title('Angle of Axis 2 in Left/Right procedure')
subplot(3,1,2);
plot(t,t2v*180/pi);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Angular Velocity (deg/s)')
title('Angular velocity of axis 2 in Left/Right procedure')
subplot(3,1,3);
plot(t,t2a*180/pi);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Angular Acceleration (mm/s^2)')

```

```

title('Angular Acceleration of axis 2 in Left/Right procedure')
t3=-acos(l0/l2*cos(a0));
t34=a0-pi;
t4=t34-t3;
%i:Incision
h=-l2*sin(t3)+l0*sin(a0);
d1=zi0+h;
zi=l0*sin(t34)+l2*sin(t3)+d1;
figure
subplot(3,1,1);
plot(t,d1,'-');
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Position (mm)')
title('Linear position of axis 1 ')
subplot(3,1,2);
plot(t,t3*180/pi,'-');
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Position (deg)')
title('Angular position of axis 3 ')
subplot(3,1,3);
plot(t,t4*180/pi,'-');
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Position (deg)')
title('Angular position of axis 4 ')
r=sqrt((xo4-l1).^2+(zo4-zi).^2+(yo4-0).^2);
figure
plot(t,r,'-')
xlabel('Time (sec)')
ylabel('Length (mm)')
title('Length of Laparoscop out of abdomen during Left/Right procedure')
l0 %Lenght of Laparoscope out of abdomen
end

```


مقالات مستخرج از پایان نامه

طراحی ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی

علیرضا میرباقری (کارشناس ارشد)

فرزام فرهمند (دانشیار)

علی مقداری (استاد)

حسن صیادی (استادیار)

مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک

آزمایشگاه جراحی رباتیک

E-mail: mirbagheri@mehr.sharif.edu

جراحی لاپاروسکوپی یکی از مصادیق جراحی با حداقل آسیب می‌باشد که در حفره‌ی شکمی انجام می‌شود. در این روش به منظور دسترسی به ناحیه مورد نظر برای عمل جراحی در داخل شکم، از دو یا سه شکاف کوچک ابزارهای جراحی و از شکاف دیگر دوربین یا لاپاروسکوپ وارد بدن شده و از طریق تصویر ایجاد شده، عمل جراحی انجام می‌شود. در این پژوهش چند مکانیزم مختلف به منظور نگهداری و حرکت لاپاروسکوپ در جراحی لاپاروسکوپی طراحی و مورد بررسی کیفی قرار گرفته‌اند. در نهایت از بین مکانیزم‌های طراحی شده و با توجه به شرایط عینی اطاق عمل آخرین مکانیزم از نقطه نظرهای مختلفی چون دقت، تعداد درجات آزادی، عدم تداخل فضایی با سایر ابزارها و دست جراح، عدم اعمال نیروهای بزرگ به بدن بیمار، هزینه‌ی ساخت پایین، برنامه ریزی و کنترل ساده، سادگی مکانیزم، سهولت استفاده و به ویژه ملاحظات ارگونومیکی به عنوان یک مکانیزم بهینه برای ربات کمک جراح در جراحی لاپاروسکوپی در نظر گرفته شده است. در نهایت بهترین طرح مورد ارزیابی کمی قرار گرفته و پارامترهای شاخص طولی سازه‌ای و معیار مهارت ربات و فضای کاری آن مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

کلمات کلیدی: رباتیک - ربات کمک جراح - جراحی با حداقل تهاجم - جراحی لاپاروسکوپی

مقدمه

ایجاد شده در روی پوست ابزارهای جراحی و از شکاف دیگر دوربین یا اندوسکوپ وارد بدن شده و در ناحیه‌ی مورد نظر به هم می‌رسند و به جراح اجازه می‌دهند که از طریق تصویر ایجاد شده از ناحیه‌ی عمل در صفحه‌ی نمایشگر روبروی خود و با استفاده از ابزارهای خاص، عمل جراحی را انجام دهد [1]. این روش در مقایسه با روش جراحی باز که جراح را مجبور به ایجاد شکاف‌های بزرگی در نواحی سطحی بدن کرده و جراحات زیادی را به بدن بیمار وارد می‌کند دارای مزایایی از

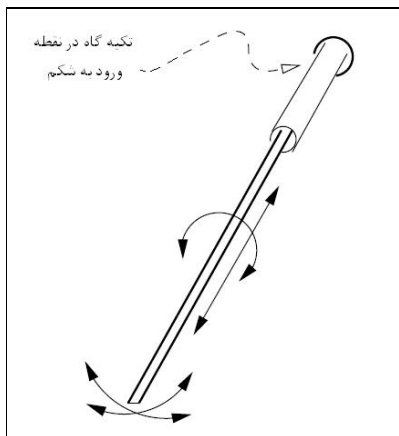
در سال‌های اخیر روش جراحی با حداقل آسیب (Minimally Invasive Surgery-MIS) یکی از جذاب‌ترین مباحث مورد علاقه جراحان و محققان در کل دنیا بوده و روز به روز در حال توسعه و پیشرفت است. در این روش جراحی به منظور دسترسی به ناحیه مورد نظر برای عمل جراحی در داخل بدن، فقط از دو یا سه شکاف کوچک در ناحیه‌ی سطحی بدن استفاده می‌شود که از یک یا دو شکاف

قبیل کاهش آسیب به بافت‌های مجاور و جراحات وارده به بیمار، کاهش خون ریزی، کاهش درد بعد از عمل، کاهش زمان بهبودی و هزینه‌های نگهداری بیمار در بیمارستان و مزایایی از این قبیل است. این روش مشکلاتی از قبیل طولانی شدن زمان عمل و عدم وجود حس هندسی و لمسی از محیط جراحی را نیز به همراه دارد [2,3] که با مهارت و تجربه‌ی جراح قابل بر طرف شدن است. روش جراحی لاپاروسکوپ‌ی، یکی از مصادیق این روش است که به جراحی‌های انجام شده در حفره‌ی شکمی اطلاق می‌شود. دوربین استفاده شده در این نوع جراحی نیز لاپاروسکوپ نام دارد که در واقع از یک لوله‌ی صلب به قطر 0.5 تا 1 سانتیمتر و طول حدود 30 cm شامل تعداد زیادی لنزهای میانی تشکیل شده و در بخش بالایی آن (خارج از بدن بیمار) به منظور ضبط تصاویر، بخش کوچکی از دوربین‌های تصویربرداری موسوم به Charge Coupled Device - CCD قرار می‌گیرد و تصویر را به صورت اطلاعات دیجیتال به کامپیوتر منتقل می‌سازد. در این نوع جراحی معمولاً از دو شکاف سطحی برای ورود ابزار جراحی و از شکاف سوم به منظور ورود لاپاروسکوپ و رسیدن به ناحیه‌ی مورد نظر استفاده می‌شود. در شروع عمل ابتدا با ایجاد شکاف کوچکی که معمولاً در نواحی اطراف ناف بیمار ایجاد می‌شود لاپاروسکوپ توسط جراح وارد شکم شده و سپس از طریق همان شکاف و راهگاه جایگذاری شده در آن گاز CO_2 با فشاری معادل ۱۰ تا ۱۵ میلیمتر جیوه وارد محفظه‌ی شکم شده و از آنجا که احشای داخلی شکم به سقف شکم چسبندگی ندارند، فضای باز و گنبدی شکلی را برای ورود سایر ابزار جراحی به داخل شکم فراهم می‌کند. بعد از این مرحله لاپاروسکوپ به دست فردی به عنوان کمک جراح داده شده و وی مسئولیت حرکت و نگهداری لاپاروسکوپ را طبق فرمان جراح به عهده می‌گیرد. در ادامه شکافهای دیگری برای ورود سایر ابزارهای جراحی نیز ایجاد می‌شود. این ابزارها عمدتاً توسط خود جراح کنترل می‌شوند و معمولاً هر دو دست جراح درگیر با ابزارهای جراحی می‌باشد. به همین دلیل در این نوع جراحی نیاز به استفاده از یک فرد کمک جراح به منظور هدایت و نگهداری لاپاروسکوپ

طبق دستورات جراح است و از آنجا که عمل نگهداری لاپاروسکوپ حرکت‌های محدود و کوچکی را به همراه دارد و در اکثر مواقع در طول عمل بایستی لاپاروسکوپ ثابت و بدون لرزش یا حرکت باشد، این فعالیت یک فعالیت استاتیک محسوب شده و نسبت به فعالیت دینامیک (مثل فعالیت خود جراح) خستگی بیشتری را به همراه دارد، به این ترتیب کمک جراح خیلی زودتر از جراح خسته شده و این خستگی عواقبی چون لرزش دست و در نتیجه خرابی تصویر، عدم هماهنگی کمک جراح با جراح اصلی و در نتیجه طولانی شدن طول عمل و عواقب بعدی آن را به همراه دارد. علاوه بر این صحبت کردن مداوم جراح با کمک جراح به منظور تصحیح محل قرار گیری و زاویه‌ی درست نمایش تصویر، باعث خستگی روانی جراح شده و ناراحتی‌هایی را برای وی به دنبال دارد. به این ترتیب با توجه به مشکلات یاد شده و نتایجی که طی مصاحبه‌های انجام شده با جراحان متخصص لاپاروسکوپ‌ی در کشور به دست آمده است و همچنین طی گزارش‌های منتشر شده در سطح دنیا [4]، استفاده از یک ربات کمک جراح که بتواند به عنوان دست سوم جراح و طبق دستورات او، وظیفه‌ی نگهداری و هدایت لاپاروسکوپ را به عهده بگیرد، می‌تواند علاوه بر حل مشکلات فوق، باعث افزایش سرعت، دقت و کیفیت عمل لاپاروسکوپ‌ی شود. به منظور قابل استفاده بودن ربات در بیمارستان‌های کشور، هزینه‌ی ساخت پایین یکی از پارامترهای اصلی در طراحی این ربات بوده است.

ملاحظات مکانیکی

این ربات بایستی بتواند طبق دستور جراح و با دقت کافی لاپاروسکوپ را در جهت دلخواه حرکت داده و در موقعیت مطلوب قرار دهد و می‌تواند با فرامین صوتی یا با حرکت سر یا پای جراح و یا با استفاده از کلیدهای تعبیه شده در زیر دستکش جراحی هدایت شود. ویژگی اصلی این ربات آن است که باید بتواند بدون ایجاد نیروهای زیاد در محل ورود لاپاروسکوپ به داخل شکم، همواره لاپاروسکوپ را در یک مختصات کروی حول نقطه‌ی ورود به شکم حرکت دهد.



شکل ۱- درجات آزادی لاپاروسکوپ بعد از ورود به شکم

دوران لاپاروسکوپ حول محور طولی خود و تصحیح دوران انجام شده در جهت عکس می‌باشند تا بتوانند راستای قائم تصویر را حفظ کنند که این خود علاوه بر تحمیل کردن یک درجه‌ی آزادی فعال اضافی و هزینه‌ی مربوطه، باعث حجیم شدن مکانیزم در ناحیه‌ی نزدیک به بدن بیمار شده و لرزش‌های زیاد تصویر را به همراه دارد [7,8].

ملاحظات ارگونومی

کاربرد ارگونومی در این پژوهش با هدف ایجاد راحتی و آرامش برای جراح و تامین ایمنی برای بیمار در نظر گرفته شده است. طی این پژوهش علاوه بر راینی‌های فراوان با جراحان متخصص لاپاروسکوپ‌ی در داخل کشور سعی شده است با شرکت در اطاق عمل جراحی‌های مختلف لاپاروسکوپ‌ی که توسط جراحان مختلفی نیز انجام می‌شده، کلیه‌ی نیازها، محدودیت‌ها و شرایط کاری عمل لاپاروسکوپ‌ی شناسایی شده و در طراحی ارگونومیک مکانیزم نهایی مدنظر قرار گیرند.

طبق بررسی‌های انجام شده از نحوه‌ی عملکرد جراحان مختلف در حین عمل جراحی لاپاروسکوپ‌ی این نتیجه حاصل شده که مکانیزم ربات باید به گونه‌ای باشد که جراح را در انتخاب محل ورود به شکم دچار محدودیت نکرده و بتواند فضای کاری مورد نیاز جراح را بدون ایجاد مزاحمتی برای سایر ابزارهای وارد شده به شکم تحت پوشش قرار دهد. از آنجا که چشم

هنگامی که لاپاروسکوپ وارد شکم می‌شود دو درجه آزادی از شش درجه آزادی خود به عنوان یک جسم صلب در فضای سه بعدی را از دست داده و از نقطه نظر سینماتیکی دارای چهار درجه‌ی آزادی می‌باشد [5] (شکل ۱). دو درجه‌ی مقید شده حرکت در صفحه‌ی شکم و چهار درجه‌ی باقیمانده یک حرکت خطی در امتداد خود لاپاروسکوپ و سه درجه‌ی دورانی حول سه محور عمود برهم که یکی از آن‌ها در امتداد خود لاپاروسکوپ قرار می‌گیرد، می‌باشند. اگرچه از نظر سینماتیکی دوران لاپاروسکوپ حول محور طولی خود امکان پذیر می‌باشد ولی از نظر کاربری این حرکت مجاز نمی‌باشد زیرا دوران لاپاروسکوپ حول محور طولی خود باعث چرخش تصویر نشان داده شده حول محور عمود بر صفحه‌ی نمایشگر شده و تصویر نادرستی از محل عمل را ارائه می‌دهد [6]. از جمله نوآوری‌ها و محاسن مکانیزم نهایی طراحی شده در این پژوهش آن است که مکانیزم ربات به گونه‌ای طراحی شده که حین حرکت و دوران لاپاروسکوپ حول محورهای مختلف به هیچ وجه باعث دوران لاپاروسکوپ حول محور طولی خود نشده و همواره راستای قائم تصویر را حفظ می‌نماید.

این در حالی است که نمونه‌ی تجاری موجود در بازار خارج از ایران یعنی ربات AESOP 3000 ساخت شرکت Computer Motion و همچنین مکانیزم‌های ابتدایی طراحی شده در این پژوهش نیز حین حرکت‌های مختلف باعث چرخش لاپاروسکوپ حول محور طولی خود شده و به منظور رفع این مشکل محتاج به یک درجه آزادی دورانی اضافی برای

برای استفاده از این مکانیزم‌ها بایستی در ابتدای عمل نقطه‌ای که حرکت‌های لاپاروسکوپ حول آن انجام می‌شود را بر نقطه‌ی ورود به شکم منطبق کرد. از جمله ویژگی‌های این مکانیزم‌ها دقت و پایداری زیاد است. محدودیت این مکانیزم‌ها نیز در عدم انطباق خود به خود با حرکاتی است که گاه جراح در حین عمل به بدن بیمار اعمال می‌کند به گونه‌ای که در صورت جابجا شدن بدن بیمار نقطه‌ی مورد نظر دوباره بایستی تطبیق داده شود.

۲- گروه ب: مکانیزم‌هایی هستند که با دارا بودن یک یا دو مفصل غیرفعال در انتهای بازوی خود، به لاپاروسکوپ اجازه می‌دهند از نقطه‌ی ورود به شکم به عنوان تکیه‌گاه استفاده کرده و به طور غیرفعال خود را با نقطه‌ی ورود به شکم تطبیق دهد. عملکرد این نوع مکانیزم‌ها شبیه به عملکرد انسان در نگهداری لاپاروسکوپ بوده و نیروهای کمی را به دیواره‌ی شکم اعمال می‌کند. از جمله ویژگی‌های این نوع مکانیزم‌ها سادگی استفاده (عدم نیاز به انطباق اولیه) و تطبیق خودکار با حرکات بدن بیمار است. دقت این نوع مکانیزم‌ها برای نگهداری و حرکات لاپاروسکوپ قابل قبول است [12] ولی چنانچه هدف حرکت ابزار جراحی باشد نمی‌توان از این نوع مکانیزم‌ها استفاده کرد. در ادامه دو نوع مکانیزم از گروه اول و دو نوع از گروه دوم که همگی در طی این پژوهش طراحی شده‌اند، معرفی شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۱- مکانیزم سری با محورهای متقاطع در نقطه‌ی مرکزی: این مکانیزم که در دسته (الف) قرار می‌گیرد از دو بخش تشکیل شده: یکی پایه اصلی که دارای سه درجه‌ی آزادی بوده و به منظور تطبیق دادن اولیه‌ی نقطه‌ی مرکزی بر نقطه‌ی ورود به شکم در شروع عمل در نظر گرفته شده است. این سه درجه عبارتند از حرکت در صفحه‌ی افقی توسط چرخهای زیر پایه‌ی ربات و دیگری حرکت در امتداد قائم برای تنظیم ارتفاع میچ ربات، این سه درجه آزادی برای موقعیت دهی اولیه‌ی میچ بوده و بعد از تنظیم اولیه تا پایان عمل ثابت می‌ماند و می‌توان آنها را به صورت غیرفعال و متحرک با نیروی دست طراحی کرد. بخش دوم که میچ ربات می‌باشد دارای چهار درجه‌ی آزادی

جراح در ناحیه‌ی بین دو دست وی قرار دارد، انتظار می‌رود تصویر ایجاد شده از محل عمل نیز از ناحیه‌ی بین دو دست جراح تصویر برداری شود تا جراح بتواند از مهارت ذهنی خود در تشخیص موقعیت فضایی احشاء بهتر و راحت‌تر استفاده کند. بنابراین محدوده‌ی کاری ربات معمولاً بین دودست جراح بوده و باید به گونه‌ای طراحی شود که در انتهای میچ خود تا حد ممکن ظریف بوده و کمترین فضا را بین دستان جراح و سایر ابزارها اشغال کند. همچنین محل قرارگیری بازوی ربات باید به گونه‌ای باشد که هیچ فضایی از محدوده‌ی حرکتی دست جراح را اشغال نکند. همچنین مکانیزم باید به گونه‌ای باشد که پیش‌بینی حرکات آن در اجرای فرامین جراح برای خود جراح امکان پذیر بوده و جراح ترسی از انجام حرکات بزرگ و غیر قابل پیش‌بینی توسط ربات نداشته باشد [9].

طراحی نوع مکانیزم

به منظور انتخاب نوع مکانیزم با توجه به ملاحظات ذکر شده در بخش‌های قبلی، به طراحی مفهومی مکانیزم‌های مختلفی که حداقل‌های لازم برای استفاده در عمل لاپاروسکوپی را داشته باشند اقدام شده است. پس از انجام طراحی مفهومی، مکانیزم‌ها در نرم افزار **vNASTRAN** مدل سازی شده و پارامترهای سینماتیکی و دینامیکی هر یک استخراج شده‌اند. همچنین نحوه‌ی حرکت هر مکانیزم در طول یک عمل مشخص شبیه سازی شده و مزایا و محدودیت‌های هر یک مشخص شده است. در ادامه با توجه به نتایج این شبیه‌سازی‌ها مشخصات مکانیزم‌های طراحی شده را مورد ارزیابی و مقایسه قرار داده و مناسب‌ترین مکانیزم انتخاب شده است.

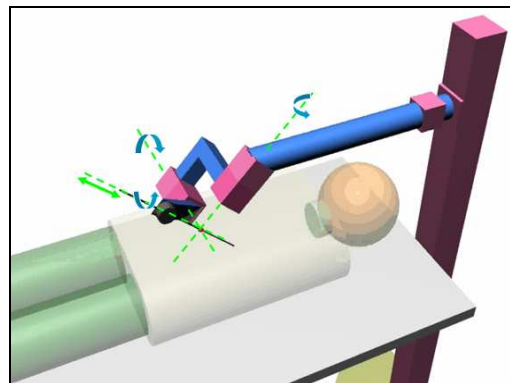
مکانیزم‌هایی را که به منظور استفاده در عمل لاپاروسکوپی طراحی شده‌اند را می‌توان در دو گروه طبقه بندی کرد [10,11]:

۱- گروه الف: مکانیزم‌هایی هستند که قادرند لاپاروسکوپ را حول یک نقطه‌ی ثابت نسبت به مختصات پایه‌ی خودشان حرکت دهند. این مکانیزم‌ها قادرند لاپاروسکوپ را حول یک نقطه‌ی مشخص چرخانده (این نقطه را به اصطلاح نقطه‌ی مرکزی می‌نامیم) و در امتداد خود لاپاروسکوپ حرکت دهند.

۲- مکانیزم دو متوازی الاضلاعی: این مکانیزم نیز که در

دسته (الف) قرار می‌گیرد از دو بخش تشکیل شده: مکانیزم کارترین سه درجه آزادی خطی موقعیت دهی اولیه‌ی نقطه‌ی مرکزی که دقیقاً شبیه مکانیزم پایه‌ی مکانیزم قبلی می‌باشد و بخش دوم که با داشتن چهار درجه‌ی آزادی (سه دورانی و یک خطی) در واقع میچ ربات را تشکیل داده و وظیفه‌ی دوران لاپاروسکوپ حول نقطه‌ی مرکزی و حرکت لاپاروسکوپ در امتداد خودش را بر عهده دارد. نحوه‌ی اهرم بندی مکانیزم میچ این ربات به گونه‌ای است که قادر است بدون آنکه هیچ مفصلی در محل نقطه‌ی ورود لاپاروسکوپ به داخل شکم داشته باشد، از فاصله‌ی دور لاپاروسکوپ را دقیقاً حول نقطه‌ی مرکزی چرخانده و محل این نقطه را تغییر ندهد. در این مکانیزم بدیع در واقع دو مکانیزم متوازی الاضلاعی به صورت سری به هم متصل شده و در نتیجه کل مکانیزم مانند یک متوازی الاضلاع حرکت می‌کند ولی با این تفاوت که در انتهای این مکانیزم یعنی در نقطه‌ی مرکزی هیچ مفصلی وجود نداشته و این نقطه توسط این اهرم بندی خاص ثابت می‌ماند. دوران کل این مکانیزم توسط موتورهایی که روی پایه‌ی ربات نصب شده‌اند انجام شده و موتورهای اصلی این ربات در فضا معلق نمی‌شوند که این خود یک ویژگی منحصر بفرد نسبت به مکانیزم اول می‌باشد. بر اثر دوران اولین موتور نصب شده روی پایه‌ی ربات کل صفحه‌ی اهرم بندی حول محور گذرنده از نقطه‌ی مرکزی چرخیده و بر اثر دوران موتور بعدی که در واقع به صورت سری و در راستای عمود بر محور موتور اول، بر روی شافت موتور اول نصب شده، مکانیزم در صفحه‌ی خود مانند یک متوازی الاضلاع حرکت می‌کند. یک درجه آزادی دورانی به منظور دوران لاپاروسکوپ حول محور طولی خودش و یک درجه‌ی خطی نیز برای حرکت لاپاروسکوپ در امتداد خودش به انتهای مکانیزم افزوده شده است. در شکل (۳) مکانیزم میچ این ربات نشان داده شده است (مکانیزم پایه در این شکل نشان داده نشده). از جمله مشکلات این مکانیزم نیاز به دقت بالا در ساخت اهرم بندی یاد شده و امکان قفل شدگی مکانیزم در صورت عدم رعایت تolerانس‌ها می‌باشد. همچنین آنجا که اغلب شرایط کاری این ربات در نزدیکی مرز فضای

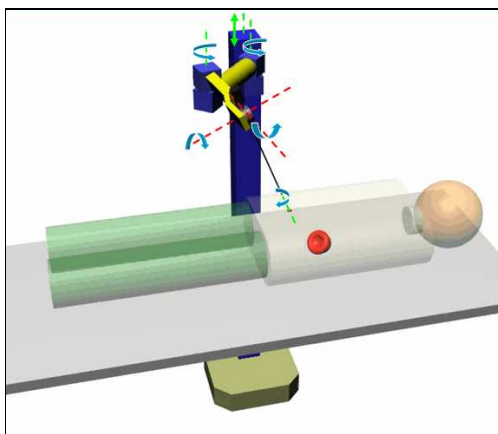
فعال بوده و وظیفه‌ی جهت دهی و حرکت لاپاروسکوپ در امتداد خود را بر عهده دارد. به این ترتیب که با داشتن سه مفصل دورانی عمود بر هم و متقاطع در محل نقطه‌ی مرکزی قادر است لاپاروسکوپ را حول این نقطه دوران داده و با استفاده از یک مفصل خطی در امتداد لاپاروسکوپ، آن را در امتداد خود حرکت دهد (شکل ۲). نکته‌ی قابل توجه در طراحی این مکانیزم آن است که برخلاف ربات‌های صنعتی موجود، مکانیزم این ربات و نحوه‌ی قرارگیری رابطه‌ها به گونه‌ای است که محل تلاقی محورهای دورانی میچ ربات در نقطه‌ای به دور از محل قرارگیری هریک از سه مفصل است و این امر باعث شده که این مکانیزم به دلیل نداشتن هیچ عضو یا مفصلی در محل نقطه مرکزی در عمل لاپاروسکوپی



شکل ۲- مکانیزم سری با مفصل‌های متقاطع در نقطه‌ی مرکزی

قابل استفاده باشد. از جمله ویژگی‌های این مکانیزم دقت و پایداری زیاد می‌باشد و از آنجا که هر چهار محور حرکتی آن در یک نقطه متقاطع‌اند، طبق روش پایپر [13] سینماتیک وارون این ربات دارای حل بسته است. از جمله مشکلات این مکانیزم نسبت به سایر مکانیزم‌های طراحی شده در این پژوهش تعداد درجات آزادی بالا و در نتیجه بالا بودن هزینه‌ی ساخت و احتیاج به انطباق اولیه در هر سه راستای حرکتی (تنظیم ارتفاع) می‌باشد. همچنین در این ربات امکان برخورد با سایر ابزار جراحی زیاد بوده و چون در سطح بدن بیمار حرکت می‌کند دچار محدودیت فضایی می‌باشد. علاوه بر این این ربات نمی‌تواند خود را با حرکات بدن بیمار تنظیم کند.

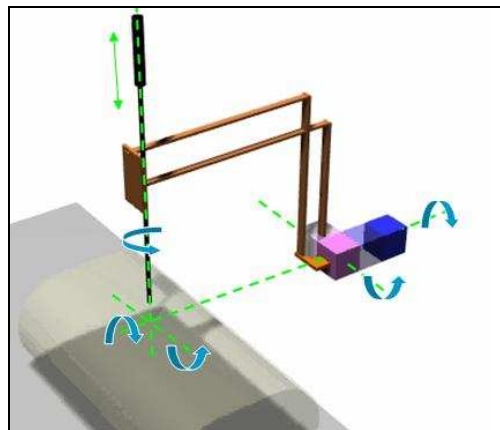
می‌چرخاند. به منظور تعیین موقعیت انتهای لاپاروسکوپ، موقعیت زاویه‌ای مفاصل غیر فعال بایستی اندازه‌گیری شوند. ویژگی اصلی این ربات سهولت استفاده و عدم نیاز به انطباق اولیه در شروع عمل است. همچنین از آنجا که سه محور انتهایی این ربات در یک نقطه متقاطع‌اند، طبق روش پاپیر [14] برای حل بسته در مساله‌ی سینماتیک وارون است. تعداد درجات آزادی و هزینه‌ی ساخت بالا، عملکرد در سطح بدن بیمار و ترس از برخورد با سایر ابزار جراحی از جمله مشکلات این ربات می‌باشد.



شکل ۴- مکانیزم اسکارا همراه یا مفاصل غیر فعال

۴- مکانیزم کروی - استوانه‌ای ایستاده: این مکانیزم نیز با دارا بودن یک مفصل غیر فعال در ناحیه‌ی انتهایی بازوی خود در دسته‌ی (ب) قرار می‌گیرد. از آنجا که بعد از ورود لاپاروسکوپ به داخل شکم فقط سه درجه آزادی مجاز برای حرکت لاپاروسکوپ وجود دارد، بهینه‌ترین مکانیزم از نظر تعداد درجات آزادی و هزینه‌ی ساخت، مکانیزمی است که تنها سه درجه آزادی فعال داشته باشد. این مکانیزم علاوه بر یک درجه آزادی فعال که برای رسیدن به ارگونومی مناسب و عدم ایجاد تداخل فضایی برای ربات در نظر گرفته شده، تنها سه درجه آزادی فعال (یک خطی و دو دورانی) دارد. نحوه‌ی قرارگیری محورهای دورانی فعال و غیر فعال در این ربات به گونه‌ای است که حین دادن حرکات مورد نیاز به لاپاروسکوپ، به هیچ وجه لاپاروسکوپ را حول محور دورانی خود نمی‌چرخاند و

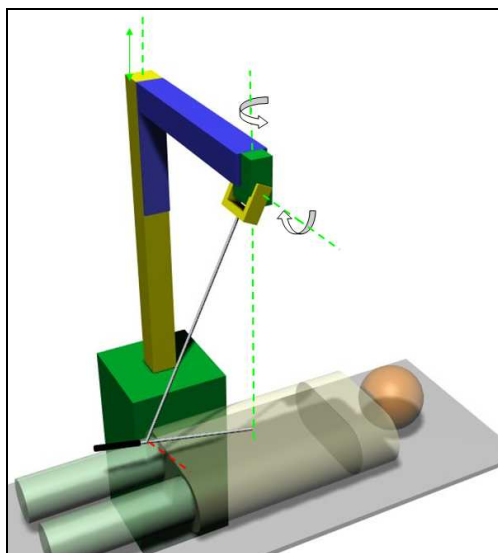
کاری و نزدیک به نقاط تکیه است، معمولاً نیروهای زیادی برای حرکت دادن مکانیزم در نزدیکی مرزفضای کاری لازم است. تعداد درجات آزادی بالا، هزینه‌ی ساخت بالا، نیاز به انطباق اولیه در هر سه راستای حرکتی، امکان برخورد با سایر ابزار جراحی و عدم انطباق خودکار با حرکات بدن بیمار از جمله مشکلات این مکانیزم بدیع می‌باشد.



شکل ۳- مکانیزم دو متوازی الاضلاعی

۳- مکانیزم اسکارا همراه با مفاصل غیر فعال: این مکانیزم که در دسته‌ی (ب) قرار می‌گیرد با داشتن دو مفصل غیر فعال در قسمت انتهایی میچ خود به لاپاروسکوپ اجازه می‌دهد از نقطه‌ی ورود به شکم به عنوان تکیه‌گاه استفاده کرده و موقعیت خود را با نقطه‌ی ورود به شکم وفق دهد. در این نوع مکانیزم بر خلاف دو مکانیزم قبلی نمی‌توان سیستم موقعیت دهی و سیستم جهت دهی را از هم تفکیک کرد. این مکانیزم از چهار درجه‌ی آزادی فعال و دو درجه‌ی آزادی غیرفعال تشکیل شده است. اولین درجه‌ی آزادی، یک درجه‌ی آزادی خطی در امتداد قائم است که یک بازوی افقی با دو درجه آزادی فعال دورانی بر روی آن نصب شده‌است (همانند بازوی اسکارا محورهای دوران در امتداد قائم‌اند). دو درجه آزادی بعدی نیز غیر فعال بوده و بر هم عمودند و در نقطه‌ی اتصال لاپاروسکوپ به میچ ربات یکدیگر را قطع می‌کنند، این دو محور در شکل (۴) به صورت دو خط متقاطع در محل گیره‌ی ربات دیده می‌شوند. یک درجه آزادی فعال نیز لاپاروسکوپ را حول خود

ایستاده با کسب ۳۵ امتیاز از ماکزیمم ۴۰ امتیاز مورد نظر به عنوان مناسب‌ترین مکانیزم در نظر گرفته شده‌است.



شکل ۵- مکانیزم کروی - استوانه‌ای ایستاده

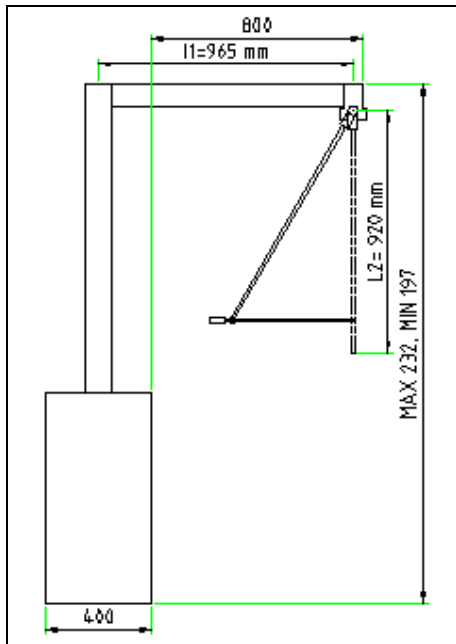
جدول ۱- معیارها و امتیازات اختصاص داده شده به هر مکانیزم

مکانیزم معیارها	مکانیزم اول	مکانیزم دوم	مکانیزم سوم	مکانیزم چهارم
دقت	۵	۴	۲	۳
تطابق خودکار با حرکات بدن	۳	۳	۵	۴
عدم لرزش تصویر به دلیل چرخش لاپاروسکوپ	۴	۴	۴	۵
سادگی، کم بودن تعداد درجات آزادی و هزینه ساخت	۳	۲	۱	۵

این از جمله ویژگی‌های منحصر بفرد این ربات است که بر خلاف سه مکانیزم قبلی ربات را از نیاز به یک درجه آزادی اضافی برای چرخش لاپاروسکوپ حول خودش و خشی کردن چرخش ایجاد شده حول لاپاروسکوپ مستثنی می‌کند. پایه‌ی این ربات بر روی ارباهای نصب شده که قبل از شروع عمل امکان حرکت در صفحه‌ی افق را برای ربات فراهم می‌کند. عملکرد ربات به گونه‌ای است که قادر است لاپاروسکوپ را حول یک محور دورانی قائم (که نسبت به پایه‌ی ربات ثابت است) بچرخاند. در شروع عمل بایستی امتداد این محور را که توسط یک باریکه‌ی نوری لیزری مشخص می‌شود، بر نقطه‌ی ورود به شکم انطباق داد. این مکانیزم بر خلاف مکانیزم‌های دسته‌ی اول نیاز به تنظیم ارتفاع ندارد. اولین درجه آزادی فعال در این مکانیزم خطی بوده و قادر است بازوی رباتیکی را در امتداد قائم حرکت دهد. دو درجه آزادی فعال بعدی دورانی هستند اولی در امتداد قائم (گذرنده از محل ورود لاپاروسکوپ به داخل شکم) و دومی عمود بر آن و در صفحه‌ی افق قرار دارد. مفصل بعدی که در انتهای بازوی ربات است و لاپاروسکوپ را در بر گرفته یک مفصل دورانی غیر فعال است که با محور قبلی موازی می‌باشد (شکل ۵). از آنجا که این مکانیزم لاپاروسکوپ را از بالا نگهداری می‌کند، هیچ فضایی را روی سطح بدن بیمار اشغال نکرده و ترس جراح را از برخورد با سایر ابزار جراحی بر طرف می‌کند. علاوه بر این مکانیزم یاد شده هیچ محدودیتی در انتخاب محل نقاط ورود به شکم برای جراح ایجاد نکرده و قادر است هر نقطه‌ای از بدن بیمار را تحت پوشش قرار داده و در ضمن محدودیتی برای حرکت دست جراح ایجاد نکند.

بعد از بررسی عملکرد این چهار مکانیزم و مشخص شدن مزایا و معایب هر یک به مقایسه‌ی این مکانیزم‌ها پرداخته و همانطور که در جدول (۱) ملاحظه می‌شود با در نظر گرفتن معیارهای ذکر شده در این جدول به هر مکانیزم به ازای هر معیار امتیازی از حداقل یک تا حداکثر پنج اختصاص داده شده و در نهایت با جمع امتیازات کسب شده توسط هر مکانیزم، امتیاز برآیند هر ربات مشخص شده و به این ترتیب مکانیزم کروی - استوانه‌ای

ربات ۹۶۵mm در نظر گرفته شده است. بالاترین ارتفاع ربات در هنگامی است که لاپاروسکوپ را در امتداد قائم و خارج از بدن بیمار



شکل ۶- ابعاد مکانیزم کروی- استوانه‌ای ایستاده

نگهداری کرده، به این ترتیب بازه‌ی حرکتی محور خطی معادل ۳۵ Cm قابل محاسبه است.

حل معادلات سینماتیکی

به منظور استخراج معادلات سینماتیکی مستقیم و حل معادلات وارون، دستگاه‌های مختصات هر رابط طبق قرارداد اتصال چهارچوب به رابط‌ها در نظر گرفته شده‌اند و پارامترهای دناویت- هارتنبرگ برای هر رابط استخراج شده است. این پارامترها در جدول (۲) ارائه شده‌اند. با استفاده از این پارامترها و استفاده‌ی متوالی از ماتریس تبدیل کلی T_i^{i-1} [15]، می‌توان ماتریس تبدیل کلی T_4^0 که موقعیت و جهت گیری دستگاه مختصات متصل به آخرین رابط را نشان می‌دهد، به‌دست آورد. این ماتریس که به عنوان پایه‌ی اصلی در محاسبات سینماتیک مستقیم ربات در نظر گرفته می‌شود، در رابطه‌ی (۱) ارائه شده است.

۴	۳	۵	۵	اعمال نیروی کم در محل ورود به شکم
۵	۴	۳	۲	فضای کاری مناسب
۴	۴	۳	۲	رعایت ارگونومی جراحی
۵	۴	۳	۲	عدم برخورد با سایر ابزارها
۳۵	۲۷	۲۷	۲۶	جمع امتیازات

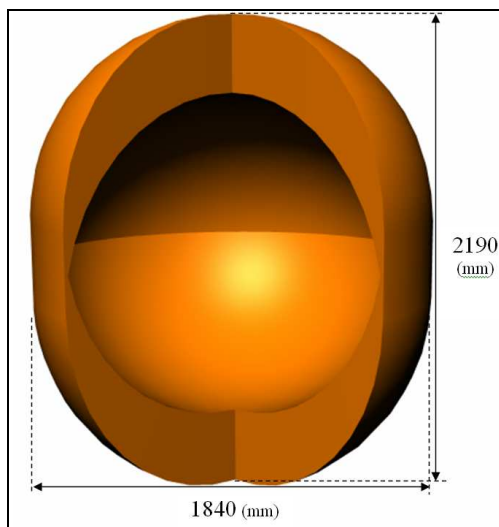
طراحی ابعاد مکانیزم

ابعاد این ربات به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که از نظر ارگونومی با شرایط عملی محیط عمل، جراح و بیمار هماهنگی داشته باشد. به منظور جلوگیری از ایجاد مانع برای دید جراح، حداقل ارتفاع بخش تحتانی سر ربات (کلگی دو درجه آزادی)، ۱۸۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده. به این ترتیب با توجه به ابعاد مدول دو درجه آزادی انتخاب شده، حداقل ارتفاع کاری ربات به منظور پوشش فضای کاری مورد نیاز، ۱۹۷ Cm و حداکثر آن ۲۳۲ Cm می‌باشد. از آنجا که حین عمل جراحی لاپاروسکوپی، تحت جراحی در حداقل ارتفاع خود یعنی ۲۰ Cm تنظیم می‌شود، با در نظر گرفتن حداقل ارتفاع ۲۰ Cm برای شکم بیمار، نقطه‌ی ورود به شکم در ارتفاع ۱۰۰ Cm قرار می‌گیرد. پایین‌ترین حالت کاری سر ربات موقعی است که لاپاروسکوپ را به صورت افقی گرفته و قصد ورود به شکم را دارد. با در نظر گرفتن طول ۳۰ Cm برای لاپاروسکوپ و حداقل ارتفاع ۱۸۰ Cm برای بخش تحتانی کلگی ربات، طول میله‌ی انتهایی ربات ۸۵ Cm می‌باشد (شکل ۶).

به منظور اینکه ربات بتواند با فاصله‌ی مناسبی از تخت بیمار عمل نگهداری لاپاروسکوپ را انجام دهد. طول رابط افقی

جدول ۲- پارامترهای دناویت- هارتنبرگ برای مکانیزم
کروی- استوانه‌ای ایستاده

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	v_i
۱	۰	۰	d_1	۰
۲	۰	L_1	۰	v_2
۳	۹۰	۰	۰	v_3
۴	۰	L_2	۰	v_4



شکل ۷- فضای کاری مکانیزم کروی- استوانه‌ای ایستاده
(برش خورده)

معیارهای کمی مشخصات فضای کاری

معیار شاخص طولی سازه‌ای: به منظور بررسی کمی این پارامتر، ابتدا مجموع طولی بازوی مکانیکی ماهر [15] را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$L = \sum_{i=1}^N (a_{i-1} + d_i) = 350 + 965 + 920 = 2235 \text{ (mm)} \quad (4)$$

در مرجع [16] شاخص طولی سازه‌ای، Q_L برابر با نسبت مجموع طولی بازو به ریشه‌ی سوم حجم فضای کاری تعریف شده است، با این ترتیب با اندازه‌گیری حجم فضای کاری که معادل $W = 1850108287.7 \text{ (mm}^3\text{)}$ به دست آمده است، می‌توان شاخص طولی سازه‌ای این ربات را طبق رابطه‌ی (۵) محاسبه کرد:

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} C_2 C_{34} & S_2 S_{34} & S_2 & L_2 C_2 C_3 + L_1 \\ S_2 C_{34} & -S_2 S_{34} & -C_2 & L_2 S_2 C_3 \\ S_{34} & C_{34} & 0 & L_2 S_3 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

با مساوی قراردادن این ماتریس با ماتریس کلی توصیف آخرین رابط ربات با درایه‌های r_{ij} می‌توان به معادلات سینماتیک وارون دست یافت. از آنجا که مکانیزم ربات بسیار ساده بوده و زاویه‌ی پیش رباطها همگی صفر یا نود درجه می‌باشند، حل معادلات سینماتیک معکوس بسیار ساده است. در این محاسبات با توجه به فضای کاری مورد نیاز ربات محدوده‌ی کاری زوایای مفصلی طبق روابط (۲) در نظر گرفته شده‌اند.

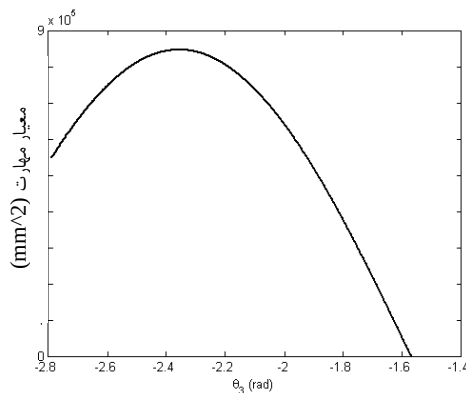
$$\begin{aligned} 0 \leq d_1 &\leq 350 \text{ mm} \\ -180 \leq \theta_2 &\leq 180 \\ -160 \leq \theta_3 &\leq -90 \\ 0 \leq \theta_4 &\leq 108 \end{aligned} \quad (2)$$

به این ترتیب با توجه به محدوده‌ی زوایای مفصلی مورد نیاز، حل معادلات سینماتیک وارون طبق آنچه در روابط (۳) آورده شده قابل ارائه‌اند:

$$\begin{aligned} \theta_2 &= A \tan 2(r_{13}, -r_{23}) \\ \text{if } \theta_2 &\neq 0 \text{ or } \pi \\ C_3 &= r_{24} / L_2 S_2 \\ \text{else } C_3 &= (r_{14} - L_1) / (L_2 C_2) \\ S_3 &= -\sqrt{1 - C_3^2} \\ \theta_3 &= A \tan 2(S_3, C_3) \\ \theta_{34} &= A \tan 2(r_{31}, r_{32}) \\ \theta_4 &= \theta_{34} - \theta_3 \\ d_1 &= r_{34} - L_2 S_3 \end{aligned} \quad (3)$$

با توجه به ابعاد در نظر گرفته شده برای طول رباطها، فضای کاری ربات بدون در نظر گرفتن محدودیت برای زوایای مفصلی طبق آنچه در شکل (۷) نشان داده شده است قابل ترسیم است.

معیار مهارت کاری می‌باشد [15] در واقع در یک طرح خوب بایستی معیار مهارت تا حد ممکن از مقدار صفر فاصله گرفته یا به عبارت دیگر در فضای مورد نظر از نقاط تکین خود به دور باشد. تنها نقطه‌ی تکین این مکانیزم در محدوده‌ی ذکر شده در روابط (۲) به ازای $\theta_3 = -90^\circ$ اتفاق می‌افتد و در این حالت ربات یک درجه آزادی حرکت خطی خود یعنی اثر ν_2 را از دست می‌دهد.



شکل ۸- مقادیر معیار مهارت در فضای کاری مکانیزم کروی - استوانه‌ای ایستاده

بحث و نتیجه گیری

پس از بررسی چهار مکانیزم طراحی شده در این پژوهش و مدلسازی دینامیکی هریک در نرم افزار VNASTRAN مزایا و معایب هر یک طبق آنچه گذشت استخراج شده و در نهایت با در نظر گرفتن معیارهای ذکر شده در جدول (۱)، مکانیزم چهارم با کسب بیشترین امتیاز به عنوان مناسب‌ترین مکانیزم انتخاب شد. مزایای اصلی این مکانیزم به طور خلاصه عبارتند از: حداقل تعداد درجات آزادی ممکن (فقط سه درجه‌ی فعال) برای ایجاد حرکات موردنظر و در نتیجه هزینه‌ی ساخت پایین، عدم برخورد با سایر ابزارها و دست جراح، رعایت ارگونومی جراحی و سادگی ارتباط با جراح، سادگی حرکات، عدم حضور بازو در سطح بدن بیمار و از همه مهمتر عدم ایجاد چرخش حول محور طولی لاپاروسکوپ و در نتیجه عدم لرزش تصویر می‌باشد.

$$Q_L = L / \sqrt[3]{W} = 1.82 \quad (5)$$

از آنجا که طرح خوب طرحی است که در آن بازو دارای مجموع طولی کوچک و در عین حال حجم فضای کاری بزرگ باشد [15]، مقدار Q_L کوچک معیاری از بهینه بودن طرح است. مقدار Q_L ربات طراحی شده در این پژوهش نسبت به سایر ربات‌ها از جمله بازوهای مکانیکی دکارتی که مقدار مینیمم Q_L آن‌ها سه می‌باشد [15]، بسیار مناسب است. **معیار مهارت:** این معیار که در واقع معیاری از توانایی ربات در ایجاد حرکات یکنواخت در کلیه‌ی راستاها در فضای کاری خودش است و توانایی ربات را در عملکرد مناسب در کلیه‌ی جهات به نمایش می‌گذارد در مرجع [17] برای بازویی که درجه‌ی آزادی زاید نداشته باشد به صورت زیر تعریف شده:

$$\omega = |\det(J(\theta))| \quad (6)$$

در این رابطه $J(\nu)$ ماتریس ژاکوبین ربات می‌باشد. از آنجا که در این ربات فقط سه مفصل ابتدایی فعال هستند، در اندازه گیری معیار مهارت فقط عملکرد این سه مفصل را در نظر گرفته و با مشتق گیری از مقادیر موقعیت مرجع دستگاه مختصات چهارم نسبت به سه متغیر مفصلی اول، با هدف محاسبه‌ی معیار مهارت، ماتریس ژاکوبی را به صورت زیر به دست می‌آوریم:

$${}^0J(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & -L_2 S_2 C_3 & -L_2 C_2 S_3 \\ 0 & L_2 C_2 C_3 & -L_2 S_2 S_3 \\ 1 & 0 & L_2 C_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

با این ترتیب معیار مهارت ربات طراحی شده در این پژوهش به صورت زیر قابل استخراج است:

$$\omega = |\det(J(\theta))| = |2L_2^2 S_3 C_3| \quad (8)$$

مقادیر معیار مهارت این ربات بر حسب مقادیر متغیر ν_3 در محدوده‌ی ذکر شده در روابط (۲) یعنی فضای کاری ربات قابل استخراج و ترسیم در یک نمودار دو بعدی می‌باشد. این نمودار در شکل (۸) نشان داده شده است. هر بازوی مکانیکی خوب دارای نواحی بزرگی از فضای کاری با مقادیر بزرگ

- Conference, Paper Number 668, Cambridge, 1996.
4. Taylor, R.H. "Robots as Surgical Assistants: Where we are, wither we are tending and how to get there" in 6th Conference Artificial Intelligenece in Medicine, Europe (AIME 97). Grenoble, France, Springer, 1997.
 5. J. Madhani. "Design of Teleoperated Surgical Instruments for Minimally Invasive Surgery", PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1998.
 6. Cao, C. MacKenzie and S. Payandeh, "Task Analysis of Laparoscopic Surgery: Determination of Requirements for Endoscopic Tool Design", Proceedings of 1996 ASME Symposium on Haptic Interface, pp. 453-461, 1996.
 7. Taylor, R.H., S. Lavallee, G. Burdea, and R. Mosges, eds. "Computer-Integrated Surgery.", Cambridge, Mass., MIT Press, 1996.
 8. Eldridge, B., K. Gruben, D. LaRose, J. Funda, S. Gomory, J. Karidis, G. McVicker, R. Taylor, and J. Anderson, "A Remote Center of Motion Robotic Arm for Computer Assisted Surgery". *Robotica*, 14(1 (Jan-Feb)): p. 103-109, 1996.
 9. Taylor, R.H., G. Fichtinger, P. Jensen, and C. Riviere, "Medical Robotics and Computer-Integrated Surgery: Information-driven Systems for 21st Century Operating Rooms". *J. Journal of Computer Assisted Surgery*, 2(2): p. 47-53, 2000.
 10. Taylor, R., J. Funda, D. LaRose, Y. Kim, N. Bruun, N. Swarup, C. Cutting, and M. Treat. "A Passive/Active Manipulation System for Surgical Augmentation" in First Int. Workshop on Mechatronics in Medicine. 1992. Malaga, Spain.
 11. Funda, J., B. Eldridge, K. Gruben, S. Gomory, and R. Taylor. "Comparison of two manipulator designs for laparoscopic surgery" in

بعد از بررسی مساله‌ی سینماتیک مستقیم و وارون این ربات و محاسبه‌ی معیارهای کمی مشخصات کاری از جمله شاخص طولی سازه‌ای و معیار مهارت، به این نتیجه می‌رسیم که مکانیزم طراحی شده دارای شاخص‌های کمی بسیار مناسبی بوده و از این نظر هم بهینه می‌باشد. شاخص طولی سازه‌ای این ربات که معادل $Q_L=1.82$ به دست آمده مقدار مناسبی داشته و معیار مهارت نیز که از رابطه‌ی (۸) قابل استخراج است و مقادیر آن در شکل (۸) نشان داده شده به غیر از یک نقطه ($\psi_3=-90^\circ$) که در حین عمل اتفاق نمی‌افتد، در کل فضای کاری مقادیر بسیار بزرگی دارد و این از نظر عملکرد ربات نقطه‌ی قوت بزرگی است.

تشکر و قدردانی

از آنجا که این پروژه در راستای طرح همکاری دانشگاه صنعتی شریف و مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی و در راستای راه اندازی یک آزمایشگاه جراحی رباتیک در این مرکز انجام شده، از کلیه‌ی مسوولین مربوطه و همچنین گروه جراحی لاپاروسکوپی بیمارستان امام خمینی آقایان دکتر طولابی، دکتر کریمیان و دکتر کشوری که در انجام این پژوهش ما را یاری رساندند و از راهنمایی‌های ارزنده‌ی خود فروگذار نکردند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نماییم.

مراجع

1. N. J. Soper, "Laparoscopic General Surgery, Past, Presents, and Future", *Surgery*, Vol. 113, No. 1, pp. 1-3, 1993.
2. F. Tendick, R. Jennings, G. Tharp, and L. Stark, "Sensing and manipulation problems in endoscopic surgery: experiment, analysis and observation," *Presence*, vol. 2, no. 1, pp. 66-81, winter 1993.
3. V. Gupta, N. Reddy and P. Batur, "Force in Surgical Tools: Comparison Between Laparoscopic and Surgical Forces", *Proceedings of 1996 IEEE Engineering in Medicine & Biology*

14. D. Pieper, "The Kinematics of Manipulators Under Computer Control", Unpublished PhD Thesis, Stanford University, 1968.
۱۵. ج. کریگ، "مکانیک و کنترل در رباتیک"، ترجمه ع. مقداری، ف. میرفخرایی، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۷.
16. K. Waldorn, "Design of Arms", in The International Encyclopedia of Robotics, R. Dorf and S. Nof, Editors, John Wiley and Sons, 1988.
17. T. Yoshikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms", The International Journal of Robotic Research, Vol. 4, No. 2, MIT Press, 1985.
- 1994 SPIE Int's Symposium on Optical Tools for Manufacturing and Advanced Automation. Boston: October, 1994.
12. Funda, J., R. Taylor, K. Gruben, and D. LaRose. "Optimal Motion Control for Teleoperated Surgical Robots" in 1993 SPIE Intl. Symp. on Optical Tools for Manuf. & adv. Autom, Boston, 1993.
13. D. Pieper, B. Roth, "The Kinematics of Manipulators Under Computer Control", Proceedings of the Second International Congress on Theory of machines and Mechanisms, Vol. 2, Zakopane, Poland, pp. 159-169, 1969.

NanoBio2006-18024

Design of a Robotic Cameraman with Three Actuators for Laparoscopic Surgery

A. Mirbagheri, F. Farahmand, A. Meghdari, H. Sayyaadi, L. Savoj, E. Mirbagheri

**Research Center for Science and Technology in Medicine &
Sharif University of Technology, Mech. Eng. Dept.**

Robotic Surgery Lab

Email: mirbaghery@mech.sharif.edu

Laparoscopic surgery is a specific branch of minimally invasive surgery (MIS) that is performed on the abdomen and endoscopic tools are passed through the incision points and trocars on the abdominal wall, so they can reach the surgical site [1]. Robotic systems have been proved to be very useful as a cameraman in laparoscopic surgery; they are more stable with no fatigue and inattention and reduce the supernumerary

staff required, provide excellent geometrical accuracy and improved personal control for the surgeon over the procedure, etc. The available robots for handling and control of laparoscopic lens include at least 4 actuators to fulfill the surgeon's requirements [2]. The purpose of the present study was to develop a novel design for the laparoscope robotic arm in which while the systems move

ability is maintained its active degrees of freedom are reduced.

Methods and Materials

The design constraints and variables of the system were studied in detail. A major kinematic constraint arises from the fact that the abdominal wall should be considered as a pivoting point for the laparoscope; the arm is only allowed to provide spherical movements for laparoscope, i.e., 2 rotations perpendicular to the lens axis around the incision point and an axial translation into the abdomen [3]. Moreover, while the lens of the laparoscope might be able to rotate along its longitudinal axis, the rotation of the camera should be fixed in order to save the view orientation [4]. Two different approaches for design of the robot were studied. In the first approach goniometers, chain drives, parallel 6-bar linkages, etc. are used to decouple the instrument motions about an isocenter defined at the entry portal. In the second approach the robot's wrist has one or two un-actuated, but encoded, rotary axes proximal to the laparoscope holder and relies on passive compliance to ensure that the movement of laparoscope satisfies the entry portal constraint [5-6]. In this research for each approach two novel mechanisms were introduced. The first isocenter mechanisms (serial-spherical) included 3 rotary and 1 linear actuators with concentric axes at the incision point. The second isocenter mechanism (double parallelogram) included 3 rotary and 1 linear actuators with a double parallelogram linkage configuration. The first passive wrist mechanism (SCARA shape) included 3 rotary and 1 linear actuators. In fact it has a SCARA Configuration with 2 passive- encoded rotary joints at the end of the robot wrist. In the second passive wrist mechanism (cylindrical-spherical) 1 linear and 2 perpendicular rotary actuators and 1 passive- encoded rotary joint were

serially configured. These four mechanisms have been dynamically simulated in vNASTRAN Software and the advantages and disadvantages of the designs were then evaluated (Fig 1-4). Some evaluating criteria such as accuracy, compliance of laparoscope movement with patient body movement, Simplicity and low manufacturing cost, proper expert workspace, ergonomic parameters, minimum number of moving link on patient body and minimum number of joints are considered and for each criteria a score from 1 to 4 is assigned for each mechanisms and finally the score of each mechanisms is calculated by adding the score of different criteria for each mechanisms.

As the cylindrical-spherical mechanism with only 3 actuators obtained the maximum score, it is introduced more; instead of conventional robot geometry, this mechanism is designed with an articulation specifically intended for the needs of the laparoscopic surgeon.

Kinematically the robot is a 3 degree of freedom cylindrical- spherical geometry manipulator, with an additional linkage added to make its movements goniometric - that is, all

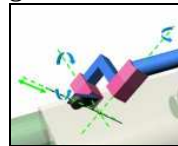


Fig.1.serial-spherical mechanism

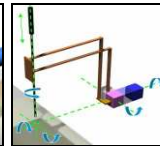


Fig.2. double parallelogram

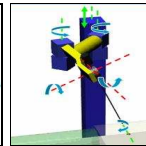
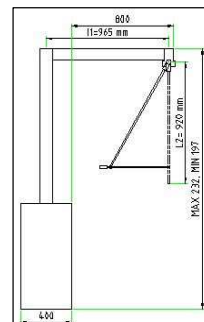


Fig.3. SCARA shape mechanism



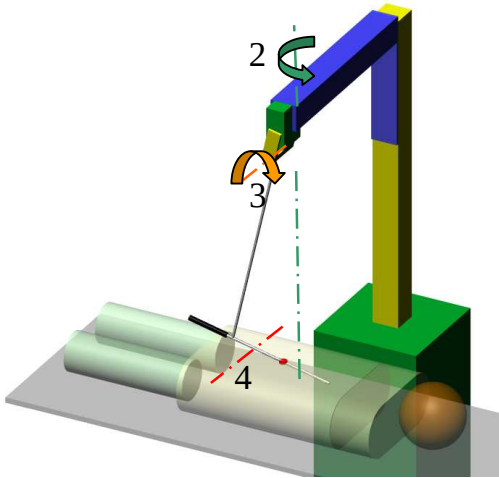


Fig. 4. Cylindrical-Spherical mechanism

passing through an isocenter point (Fig. 4). The laparoscope is attached to the robot arm by a pin joint which can rotate freely. The goniometric locus is the vertical line defined by possible intersections of axis 2 with the laparoscope axis. The working envelope of the arm is optimised when the isocenter point is situated at the patient entry point, and when the robot is first introduced into the operating theatre, axis 1 is adjusted to this height.

There are three possible movements of the end of the laparoscope (moving up/down, left/right and zooming in/out). Left/right motions are directly related to movement of the corresponding robot (2) axis. Zoom and up/down movements are achieved by synchronous motion of the robot (1) and (3) axes. The base of this mechanism is installed on a cart and can be wheeled to a convenient position next to the table, and positioned so that its isocenter point lies at the laparoscope entry port. One laser diode aiming light is used to assist with this. The wheels are then braked, and the robot is ready for use.

For kinematical solution of the robot the frames are assigned such that the Z-axis of the nth frame points outward along the

nth joint [7]. The transformation matrices between frames are based on the Denavit-Hartenberg (DH) parameter notation and summarized in Table (1) and Equations (1) and (2).

Table (1). Serial- Spherical mechanism D-H parameters

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} C_2 C_{34} & S_2 S_{34} & S_2 & L_2 C_2 C_3 + L_1 \\ S_2 C_{34} & -S_2 S_{34} & -C_2 & L_2 S_2 C_3 \\ S_{34} & C_{34} & 0 & L_2 S_3 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

The inverse kinematics solution is illustrated in equations (3):

$$\theta_2 = A \tan 2(r_{13}, -r_{23})$$

if $\theta_2 \neq 0$ or π

$$\begin{aligned} C_3 &= r_{24} / L_2 S_2 \\ \text{else } C_3 &= (r_{14} - L_1) / (L_2 C_2) \end{aligned}$$

$$S_3 = -\sqrt{1 - C_3^2}$$

$$\theta_3 = A \tan 2(S_3, C_3)$$

$$\theta_{34} = A \tan 2(r_{31}, r_{32}) \quad (3)$$

$$\theta_4 = \theta_{34} - \theta_3$$

$$d_1 = r_{34} - L_2 S_3$$

The basic notion is that at singularity, a design of a mechanism loses at least one DOF, and this happens when the determinant of Jacobian approaches zero. For cylindrical-spherical mechanism (Fig.4), the Jacobian and $\det(J)$ would be:

$${}^0J(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & -L_2 S_2 C_3 & -L_2 C_2 S_3 \\ 0 & L_2 C_2 C_3 & -L_2 S_2 S_3 \\ 1 & 0 & L_2 C_3 \end{bmatrix} \quad \det(J(\theta)) = 2L_2^2 S_3 C_3 \quad (4)$$

The manipulability measure (m) for a non-redundant mechanism is the absolute value of Jacobian's determinant [8]: $m = |\det(J)|$. Therefore by considering the equations (1) there is one singularity at $\theta_3 = -90^\circ$ and only at this configuration the manipulability would be zero.

RESULTS

It was found that the cylindrical-spherical mechanism is the best mechanism and can well fulfill the functional requirements of the system by means of only 3 actuators (instead of 4). The size synthesis and manipulability

measurement of the robot also provided satisfactory results.

CONCLUSION

The most important advantage of this mechanism is that the swivel motion of the laparoscope's camera physically is impossible and it is save the view orientation and reduces the necessary actuator to correct the view orientation. This is a major advantage considering the cost and maintenance issues of the system when employed in clinical practice. It will be appreciated that even if an axis drive were to fail, the movement of the laparoscope would still pass through the isocenter point. It is hence physically impossible, even in a fault condition, for the robot to move in a direction which would cause tearing of the patient's skin: this is an important safety consideration.

REFERENCES

1. L. W. Way, et al., Fundamentals of Laparoscopic Surgery. Churchill Livingstone, 1995.

2. F. Tendick, et al., Sensing and manipulation problems in endoscopic surgery. Presence, 2(1):66-81, 1993.

3. N. J. Soper, Laparoscopic General Surgery, Surgery, Vol. 113, No. 1, pp. 1-3, 1993.

4. K. Toulabi, Laparoscopic Surgeon, Milad Hospital, Personal communications, 2005.

5. Funda, J., et al., Comparison of two manipulator designs for laparoscopic surgery, Proc. SPIE, Boston, 1994.

6. R. H. Taylor, et al., Medical Robotics and Computer Integrated Surgery, CAS, 2(2): p. 47-53, 2000.

7. Craig. "Introduction to Robotics," 2nd ed. Addison Wesley, 1989.

8. T. Yoshikawa, Manipulability of Robotic Mechanisms, Robotic Research, Vol. 4, No. 2, MIT Press, 1985.

Design of a Robotic Assistant for Laparoscopic Surgery

Abstract: Robotic systems have been proved to be very useful in laparoscopic surgery; they are more stable with no fatigue and inattention and reduce the supernumerary staff required, provide excellent geometrical accuracy and improved personal control for the surgeon over the procedure, remove the risks of ionizing radiation, enable the data integration from multiple numerical and sensor sources, etc. The available robots for handling and control of laparoscopic lens include at least 4 actuators to fulfill the surgeon's requirements. The purpose of this project was to develop a novel design for the laparoscope robotic arm in which while the systems controllability (moving up/down, left/right and zooming in/out) is maintained its active degrees of freedom are reduced.

The design constraints and variables of the system were studied in detail. A major kinematic constraint arises from the fact that the abdominal wall should be considered as a pivoting point for the laparoscope; the arm is only allowed to provide spherical movements for laparoscope, i.e., 2 rotations around the incision point and an axial translation into the abdomen. Moreover, while the lens of the laparoscope might be able to rotate along its longitudinal axis, the rotation of the camera should be fixed in order to save the view orientation. Two different approaches for design of the robot were studied. In the first approach goniometers, chain drives, parallel 6-bar linkages, etc. are used to decouple the instrument motions about an isocenter defined at the entry portal. In the second approach the robot's wrist has one or two un-actuated, but encoded, rotary axes proximal to the laparoscope holder and relies on passive compliance to ensure that the movement of laparoscope satisfies the entry portal constraint. For each approach two novel mechanisms were introduced. The isocenter mechanisms included 3 rotary and 1 linear actuators with concentric axes at the incision point. The first passive wrist mechanism included 3 rotary and 1 linear actuators with 2 passive- encoded rotary joints at the end of the robot wrist. In the second passive wrist mechanism 1 linear and 2 rotary actuators and 1 passive- encoded rotary joint were serially configured. The advantages and disadvantages of the designs were then evaluated. It was found that the last mechanism can well fulfill the functional requirements of the system by means of only 3 actuators (instead of 4); this is a major advantage considering the cost and maintenance issues of the system when employed in clinical practice. The size synthesis and manipulability measurement of the robot also provided satisfactory results.

Key Words: Laparoscopic Surgery, Robotic Surgery, Assistant Robot, Design, Simulation



Sharif University of Technology
Mechanical Engineering Department

M.Sc. Thesis
Biomechanics Division

Design of a Robotic Assistant for Laparoscopic Surgery

Supervisors
Dr. Farzam Farahmand
Dr. Ali Meghdari

By:
Alireza Mirbagheri

May 2006