

”به نام نردان پاک و مهربان“



پایان نامه کارشناسی ارشد

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق-گرایش کنترل

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

# کنترل غیر خطی سیستم رباتیک جوش قوس الکتریکی گاز- فلز

استاد راهنما

جناب آقای دکتر فاتح

ارائه دهنده

شهاب شهرابی فراهانی

تیر ماه ۱۳۸۷





پایان نامه کارشناسی ارشد

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق-گرایش کنترل  
دانشکده مهندسی برق و رباتیک

# کنترل غیر خطی سیستم رباتیک جوش قوس الکتریکی گاز- فلز

استاد راهنما

جناب آقای دکتر فاتح

ارائه دهنده

شهاب شهرابی فراهانی

تیر ماه ۱۳۸۷

تقديم

به پدر و مادر عزیزم

## تشکر و قدردانی

از زحمات و راهنمایی هایی ارزنده و دلسوزانه جناب آقای دکتر فاتح که در تمامی دوران تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد به ویژه در انجام این پایان نامه تشکر و قدر دانی می شود.

## چکیده

این پایان نامه به کنترل غیر خطی سیستم رباتیک جوشکاری گاز- فلز می پردازد. در این کلاس کنترلی، فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی (ماشین جوشکاری) و موقعیت انبر جوش هر یک به صورت مجزا کنترل می شوند. پس از معرفی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به مدلسازی سینماتیکی و دینامیکی و کنترل غیر خطی ربات اسکارا برای جوشکاری در فضای کار می پردازیم. علاوه بر آن، نیازمندیهای سیستم کنترل جوشکاری رباتیک به ویژه بحث حسگرها و سیستم های ردیابی شکاف معرفی می شوند. حالات تکین در طی مسیر و کنترل ربات بررسی می شوند و مسیر های مناسب طراحی می شود. روشهای مختلف کنترل ربات در فضای کار ارائه و با یکدیگر مقایسه می شوند. کنترل غیر خطی ربات بر مبنای خطی سازی فیدبکی با هدف ردگیری دقیق موقعیت و سرعت انبر جوشکاری برای دست یابی به کیفیت مطلوب جوش ارائه می گردد. به پیامد های عدم قطعیت ها در اجرای خطی سازی فیدبکی پرداخته و روش مقابله با آنها را مطرح می نماییم. جنبه نوآوری این پایان نامه طراحی سیستم کنترل ربات جوشکار در فضای کار با حضور عدم قطعیت است که بطور مستقل از کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی انجام می شود. به کلیه عدم قطعیت های ساختاری، غیر ساختاری و همچنین اغتشاشات خارجی توجه می شود و روشهای کنترل غیر خطی از جمله خطی سازی فیدبکی، مود لغزشی و کنترل فازی در هر دو فضای مفصلی و دکارتی به منظور کنترل انبر جوشکاری بکار برده می شوند و با معیار خطای ردگیری با هم مقایسه می گردند. در پایان شبیه سازی روش های کنترلی ارائه شده بر روی ربات اسکارا عملکرد سیستم کنترل را تأیید می نماید.

**کلمات کلیدی:** ربات جوشکار، ربات اسکارا، کنترل خطی سازی فیدبکی، کنترل فازی، کنتری مقاوم، کنترل مود لغزشی و ردیابی مسیر حسگر.

## فهرست مطالب

|    |  |
|----|--|
| ۱  | فصل اول  |
| ۱  | ۱- مقدمه   |
| ۱  | ۱-۱- اهداف مورد نظر                                    |
| ۳  | ۲-۱- مروری مختصر بر کارهای انجام شده قبلی              |
| ۶  | ۳-۱- طرح کلی پایان نامه                                |
| ۷  | فصل دوم  |
| ۷  | ۲- مقدمه ای بر ربات های جوشکار                         |
| ۸  | ۱-۲- ربات های جوشکار                                   |
| ۹  | ۲-۲- فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی گاز- فلز              |
| ۱۵ | فصل سوم  |
| ۱۵ | ۳- ربات اسکارا   |
| ۱۵ | ۱-۳- مدلسازی سینماتیکی                                 |
| ۱۸ | ۲-۳- سینماتیک در ربات اسکارا                           |
| ۱۸ | ۱-۲-۳- سینماتیک مستقیم                                 |
| ۲۰ | ۲-۲-۳- سینماتیک وارون                                  |
| ۲۲ | ۳-۳- سینماتیک سرعت در ربات اسکارا (ژاکوبین بازوی ماهر) |
| ۲۲ | ۱-۳-۳- تکین ها   |
| ۲۳ | ۲-۳-۳- محاسبه تکین ها                                  |
| ۲۳ | ۴-۳- مدلسازی دینامیکی                                  |
| ۲۸ | فصل چهارم  |
| ۲۸ | ۴- طراحی مسیر  |
| ۲۹ | ۱-۴- مسیر های سهموی با قسمت سرعت ثابت                  |
| ۳۱ | ۲-۴- مسیر های با کمترین زمان                           |
| ۳۲ | ۳-۴- مسیر های دکارتی                                   |
| ۳۳ | ۱-۳-۴- مشکلات هندسی مسیر های دکارتی                    |
| ۳۴ | ۲-۳-۴- طراحی مسیر دکارتی نمونه                         |

|    |   |
|----|---|
| ۳۸ | ۵- حسگرهای مورد استفاده در ردیابی شکاف            |
| ۴۰ | ۵-۱- TAST   |
| ۴۴ | ۵-۲- AVC  |
| ۴۵ | ۵-۳- سیستمهای لیزری                               |
| ۴۷ | ۵-۴- حسگرهای نوری                                 |
| ۴۹ | ۵-۵- حسگرهای القایی                               |
| ۵۱ | ۵-۶- حسگرهای مافوق صوت                            |
| ۵۶ | ۵-۷- مشاهده گرهای تصویری                          |
| ۵۷ | ۵-۸- مقایسه بر روی انواع روشهای موجود اندازه گیری |

|    |   |
|----|---|
| ۶۳ | ۶- کنترل ربات بر مبنای خطی سازی فیدبکی                |
| ۶۳ | ۶-۱- روشهای کنترل ربات در فضای دکارتی                 |
| ۶۵ | ۶-۲- خطی سازی فیدبکی                                  |
| ۶۶ | ۶-۱-۲- خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی                     |
| ۶۷ | ۶-۲-۲- خطی سازی فیدبکی فضای دکارتی                    |
| ۶۹ | ۶-۳- بررسی عدم قطعیت های موجود در سیستم کنترل ربات    |
| ۶۹ | ۶-۱-۳- عدم قطعیت ناشی از مدل کردن ربات                |
| ۷۱ | ۶-۲-۳- اغتشاش ناشی از عدم قطعیت در سینماتیک و ژاکوبین |

|    |   |
|----|---|
| ۷۳ | ۷- شبیه سازی سیستم کنترل ربات   |
| ۷۳ | ۷-۱- خطی سازی فضای مفصلی، کنترل خطی فضای مفصلی با ورودی دکارتی                    |
| ۷۵ | ۷-۲- طراحی کنترل مقاوم  |
| ۷۹ | ۷-۳- دفع اغتشاش توسط تصحیح کننده فازی   |
| ۸۵ | ۷-۴- خطی سازی فیدبکی فضای دکارتی و کنترل خطی در فضای دکارتی                       |
| ۸۷ | ۷-۵- خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی و کنترل خطی در فضای دکارتی                        |
| ۸۹ | ۷-۶- کنترل فازی فضای دکارتی با خطی سازی فیدبکی                                    |
| ۹۱ | ۷-۷- کنترل فازی در فضای مفصلی و استفاده از $J^{-1}$ و $J^T$ برای تبدیل فضای کنترل |
| ۹۵ | ۷-۸- کنترل فازی در فضای دکارتی  |
| ۹۷ | ۷-۹- مقایسه روشهای کنترل فازی   |



۹۸

فصل هشتم

---

۹۸

۸- نتیجه گیری

۹۹

پیوست

---

۱۰۱

منابع و مراجع

---

فصل دوم

- ۸ شکل (۱-۲) ربات جوشکار
- ۱۰ شکل (۲-۲) متعلقات فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی گاز- فلز
- ۱۱ شکل (۳-۲) فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی
- ۱۴ شکل (۴-۲) بلوک دیاگرام کنترلی و نقش ربات در کنترل فرآیند جوشکاری

فصل سوم

- ۱۵ شکل (۱-۳) ربات اسکارا
- ۱۷ شکل (۲-۳) پارامترهای دناویت هارتنبرگ
- ۱۸ شکل (۳-۳) دستگاه بندی دناویت هارتنبرگ ربات اسکارا

فصل چهارم

- ۳۰ شکل (۱-۴) منحنی مسیرهای سهموی، (الف) منحنی موقعیت، (ب) منحنی سرعت، (ج) منحنی شتاب
- ۳۲ شکل (۲-۴) منحنی مسیهای با کمترین زمان، (الف) منحنی موقعیت، (ب) منحنی سرعت، (ج) منحنی شتاب
- ۳۳ شکل (۳-۴) نقاط بینابینی غیر قابل دسترس
- ۳۴ شکل (۴-۴) مسیرمنحنی نیم دایره ای در فضای دکارتی
- ۳۶ شکل (۵-۴) منحنی حرکت برای مسیر نیم دایره ای، (الف) بر روی محور  $x$ ، (ب) بر روی محور  $y$ ، (ج) بر روی محور  $Z$
- ۳۷ شکل (۶-۴) منحنی موقعیت برای مسیر نیم دایره، (الف)  $\theta_1$ ، (ب)  $\theta_2$ ، (ج)  $\theta_3$
- ۳۷ شکل (۷-۴) انواع سطح قابل جوشکاری برای ربات اسکارا، (الف) گوشه ای، (ب) مسطح، (ج) دایره ای

فصل پنجم

- ۳۸ نمودار (۱-۵) انواع حسگرها یی که در ساختمان ربات به کار می رود
- ۴۲ شکل (۲-۵) مانیتور جریان نسبت به طول قوس، (الف) هنگامی که انبر جوش از مسیر خود خارج شده، (ب) هنگامی که انبر جوش در مسیر درست حرکت می کند
- ۴۳ شکل (۳-۵) چهار ناحیه ای که در یک دور چرخش انبر جوش به وجود می آید
- ۴۴ شکل (۴-۵) منحنی ولتاژ قوس نسبت به طول قوس
- ۴۶ شکل (۵-۵) نور بازگشتی از سطح شفاف فلز
- ۵۷ شکل (۶-۵) تصویر گرفته شده از استخر جوش

|    |   |
|----|---|
| ۶۴ | شکل (۱-۶) روش کنترل فضای مفصلی با ورودی مسیر دکارتی |
| ۶۴ | شکل (۲-۶) مفهوم روش کنترل مبتنی بر مختصات دکارتی    |
| ۶۵ | شکل (۳-۶) روش کنترل دکارتی با ژاکوبین وارون         |
| ۶۵ | شکل (۴-۶) روش کنترل دکارتی ژاکوبی ترانهاده          |
| ۶۷ | شکل (۵-۶) خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی                |
| ۶۹ | شکل (۶-۶) خطی سازی در فضای دکارتی                   |

|    |   |
|----|---|
| ۷۴ | شکل (۱-۷) خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی و کنترل خطی در فضای مفصلی با فرمان دکارتی  |
| ۷۵ | شکل (۲-۷) رفتار سیستم با وجود عدم قطعیت، (الف) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ب) ولتاژ موتورها، (ج) خطای ردیابی متغیرهای دکارتی   |
| ۷۸ | شکل (۳-۷) خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی، کنترل مقاوم در فضای مفصلی با ورودی مسیر دکارتی  |
| ۷۹ | شکل (۴-۷) با وجود عدم قطعیت و به کارگیری کنترلر مود لغزش (الف) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ب) ولتاژ موتورها، (ج) خطای ردگیری متغیرهای مفصلی، (د) خطای ردگیری متغیرهای دکارتی   |
| ۸۱ | شکل (۵-۷) بلوک دیاگرام سیستم کنترل با استفاده از هماهنگ کننده فازی  |
| ۸۲ | شکل (۶-۷) سطح مشخصه سه بعدی ورودی نسبت به خروجی   |
| ۸۲ | شکل (۷-۷) توابع تعلق، (الف) ورودی، (ب) خروجی  |
| ۸۳ | شکل (۸-۷) بدون وجود عدم قطعیت (الف) خطای ردگیری، (ب) ولتاژ موتورها  |
| ۸۴ | شکل (۹-۷) با وجود عدم قطعیت و حضور هماهنگ کننده فازی (الف) ولتاژ موتورها، (ب) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ج) نرم خطای ردیابی   |
| ۸۵ | شکل (۱۰-۷) خطی سازی فیدبکی فضای دکارتی، کنترلر فازی در فضای دکارتی  |
| ۸۵ | شکل (۱۱-۷) عملکرد کنترلر بدون حضور عدم قطعیت، (الف) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ب) خطای ردیابی   |
| ۸۶ | شکل (۱۲-۷) عملکرد سیستم کنترل با وجود عدم قطعیت، (الف) ولتاژ موتورها، (ب) خطای ردیابی   |
| ۸۷ | شکل (۱۳-۷) خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی، کنترلر فازی در فضای دکارتی   |
| ۸۸ | شکل (۱۴-۷) عملکرد کنترلر بدون حضور عدم قطعیت، (الف) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ب) خطای ردیابی   |
| ۸۸ | شکل (۱۵-۷) عملکرد سیستم کنترل با وجود عدم قطعیت، (الف) ولتاژ موتورها، (ب) خطای ردیابی   |
| ۸۹ | شکل (۱۶-۷) سطح مشخصه سه بعدی ورودی نسبت به خروجی  |
| ۹۰ | شکل (۱۷-۷) توابع تعلق، (الف) ورودی، (ب) خروجی   |
| ۹۰ | شکل (۱۸-۷) خطی سازی فیدبکی فضا مفصلی، کنترلر فازی در فضای دکارتی  |
| ۹۱ | شکل (۱۹-۷) با وجود عدم قطعیت (الف) ولتاژ موتورها، (ب) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ج) نرم خطای ردیابی با حضور کنترلر، $K_{pi} = 1000$ ، $K_{di} = 20$ ، $K_{vi} = 50$ ، (د) نرم |

خطای ردیابی با  $K_{vi} = 50$ ،  $K_{di} = 200$ ،  $K_{pi} = 1500$

- ۹۱ شکل (۷-۲۰) کنترلر فازی در فضای مفصلی و استفاده از  $J^{-1}$  برای تبدیل فضای کنترل
- ۹۲ شکل (۷-۲۱) کنترلر فازی در فضای مفصلی و استفاده از  $J^T$  برای تبدیل فضای کنترل
- ۹۳ شکل (۷-۲۲) با وجود عدم قطعیت (الف) ولتاژ موتورها، (ب) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ج) نرم خطای ردیابی با حضور کنترلر  $J^{-1}$  فازی
- ۹۴ شکل (۷-۲۳) با وجود عدم قطعیت (الف) ولتاژ موتورها، (ب) نرم خطای ردیابی با حضور کنترلر  $J^T$  فازی، (ج) مقایسه نرم خطا در استفاده از  $J^T$  و  $J^{-1}$
- ۹۵ شکل (۷-۲۴) کنترل ربات با استفاده از کنترلر فازی
- ۹۶ شکل (۷-۲۵) با وجود عدم قطعیت (الف) ولتاژ موتورها، (ب) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ج) نرم خطای ردیابی با حضور کنترلر فازی مستقیم
- ۹۷ شکل (۷-۱۷) مقایسه بین چهار روش کنترل فضای دکارتی به کمک فازی

---

فصل سوم

جدول (۱-۳) پارامترهای دناویت هارتنبرگ در ربات اسکارا ۱۹

---

فصل پنجم

جدول (۱-۵) انتخاب بهترین حسگر بسته به شرایط ۴۱

جدول (۲-۵) اغتشاشات به وجود آمده در طی جوشکاری ۵۹

جدول (۳-۵) ستون سمت چپ متغیرهای که باید کنترل شوند در دو گروه متغیرهای اساسی و متغیرهای

قابل اندازه گیری مرتبط با آنها می باشد و ستون سمت راست شیوه های کنترل پیشنهادی برای کنترل آنها آورده شده است ۶۰

جدول (۴-۵) مقایسه بین متغیرهای قابل اندازه گیری در حسگر لیزری و تصویری ۶۱

جدول (۵-۵) مقایسه دو نوع از حسگرهای لیزری ۶۲

---

فصل هفتم

جدول (۱-۷) قوانین فازی ۸۲

جدول (۲-۷) قوانین فازی ۸۹

# فصل اول

## مقدمه

سیستم های جوشکاری رباتیک نقش مهمی در صنعت امروز بازی می کنند. اینگونه سیستم ها در مقایسه با سیستم های جوشکاری دستی مزایای فراوانی دارند. مسئله اصلی در جوشکاری دستی ثابت نگاه داشتن فاصله انبر جوش و سرعت حرکت آن می باشد که این موضوع به راحتی در جوشکاری رباتیک قابل حل می باشد. علاوه بر این به علت حجم بالای تولید، استفاده از جوشکاری رباتیک هزینه ها را کاهش می دهد. همچنین رباتها می توانند در محیط های سخت جوشکاری به علت گرما و نیز گازهای منتشر شده از عمل قوس الکتریکی، به راحتی کار کنند. برای خودکار کردن فرآیند جوشکاری، همان ماشین های جوشکاری مورد استفاده در جوشکاری دستی می تواند به کار برده شود و همچنین ربات ها می توانند به جای فرد جوشکار وضعیت کنترل انبر جوش را به عهده بگیرند و یک سیستم جوشکاری خودکار را ایجاد کنند. بنابراین مسئله کنترل کیفیت جوش در وهله اول به کنترل موقعیت ربات مورد استفاده در فضای کاری آن که انبر جوش را حمل می کند و همچنین ردگیری شکاف جوش، باز می گردد. چرا که کنترل ولتاژ قوس<sup>۱</sup> (طول قوس<sup>۲</sup>) و جریان الکتریکی (نحوه انتقال فلز و ذوب الکتروود) به عهده کنترل کننده ماشین جوشکاری است و ربات در نقش جوشکار وظیفه حرکت انبر جوش را با یک سرعت و فاصله خاص از قطعه کار در راستای شکاف مورد نظر و ردگیری شکاف، بر عهده دارد. بنابراین برای سهولت در کنترل فرآیند جوشکاری رباتیک می توان کنترل ماشین جوشکاری و ربات را جدا از هم انجام داد [۱]، اگرچه این دو، رابطه تنگاتنگی باهم در تعیین کیفیت جوش دارند.

### ۱-۱- اهداف مورد نظر

با توجه به این که انواع روشهای کنترلی به کار گرفته شده در صنعت برای ربات های جوشکار به صورت محرمانه نزد شرکتهای سازنده قرار دارد، ضرورت انجام این تحقیق و موارد مشابه را نشان می دهد در این پایان نامه جنبه های عملی و صنعتی جوشکاری رباتیک را مدنظر قرار داده و به سوی ساخت رباتهای جوشکار در کشور

---

<sup>1</sup> Arc Voltage

<sup>2</sup> Arc Length

قدم بر می داریم. فرآیند جوشکاری مورد نظر از نوع جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ<sup>۱</sup> می باشد. در موضوع کنترل ربات جوشکار شیوه های اندازه گیری متغیر های کنترلی نیز از اهمیت خاصی برخوردار می باشد که در این زمینه تحقیق می شود. کاربرد ربات جوشکار در صنعت امروز دنیا به صورت روز افزون افزایش می یابد. رباتهای جوشکار از نوع جوش نقطه ای بطور گسترده ای در صنایع خودرو سازی ایران بکار گرفته شده اند ولی استفاده از رباتهای جوشکار قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ نه تنها در ایران معمول نیستند، بلکه در دنیا نیز جدید هستند.

کنترل ربات جوشکار به صورت مجزا از سیستم جوشکاری یا به صورت توأم با آن می تواند انجام شود. در این خصوص مسائل کنترلی مختلفی نظیر ردگیری مسیر، حمل انبر جوش، هماهنگی ربات و ماشین جوشکاری و فناوری مناسب حسگرها و محرکه مطرح است. با توجه به این که روشهای کنترلی در صنعت سعی بر جداسازی کنترل سیستم جوش از کنترل ربات دارند، در این پایان نامه بر مبنای شیوه های کنترلی غیر خطی جدید به کنترل مجری نهایی ربات جوشکار در فضای کار می پردازیم که جدا از کنترل فرآیند جوشکاری اما هماهنگ با آن انجام می شود. از دید کلی، نحوه کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی اعم از رباتیک یا دستی، را می توان به دو حلقه کنترل داخلی و خارجی تجزیه کرد به گونه ای که در حلقه داخلی به کنترل طول قوس یا ولتاژ قوس و نحوه انتقال فلز به حوضچه جوش (کنترل نحوه افتادن قطره و یا ذوب الکتروود) می پردازیم و در حلقه خارجی، به کنترل پارامترهای حوضچه جوش از قبیل سرعت حرکت انبر جوش و فاصله انبر جوش تا قطعه کار و ردگیری شکاف و مشخصات هندسی حوضچه جوش توجه می شود.

به طور معمول در جوشکاری قوس الکتریکی دستی، ماشین جوشکاری به تنهایی کنترل حلقه داخلی را بر عهده دارد در حالی که کنترل حلقه خارجی را فرد جوشکار انجام می دهد. در جوشکاری خودکار مثل جوشکاری رباتیک می توان کنترل حلقه داخلی را توسط کنترل کننده ماشین جوشکاری مانند ماشین های جوشکاری دستی انجام داد و کنترل حلقه خارجی را عملاً ربات جوشکار است که به عهده دارد. بدین معنا که کنترل ربات از کنترل ماشین جوشکاری جدا باشد و کنترل کننده ربات فقط نقش کنترل سرعت حرکت و فاصله انبر جوش تا قطعه کار را بر عهده دارد. در این پایان نامه تمرکز بر روی کنترل حلقه خارجی و بهبود کیفیت اتصال های جوش از طریق کنترل مجری نهایی ربات جوشکار به صورت جدا از حلقه داخلی است و مباحث کنترل موقعیت و جهت مجری نهایی ربات جوشکار در آن مطرح می باشد و کنترل حلقه داخلی یا همان دستگاه جوشکاری مدنظر نمی باشد. هدف نهایی در این پایان نامه بهینه سازی و پیشرفت الگوریتم های کنترل غیر خطی مجری نهایی ربات جوشکار به منظور افزایش کیفیت جوشکاری می باشد.

<sup>1</sup> Gas Metal Arc Welding

## ۲-۱- مرور کارهای قبلی

جوشکاری قوس الکتریکی یکی از کاربردهای مناسب برای ربات های هوشمند است. زیرا اولاً در محیط سخت جوشکاری به علت وجود گرما و گازهای حاصل از فرآیند قوس، کیفیت تولید و همچنین میزان تولید کاهش پیدا می کند. دوماً جوشکاری قوس الکتریکی سومین شغل بزرگ دنیا در کنار مونتاژ کردن و صنعت ساخت فلز می باشد. اتوماسیون فرآیند جوشکاری ناحیه بزرگی از تحقیقات را در زمینه های رباتیک، تکنولوژی حسگر، سیستمهای کنترل و هوش مصنوعی باز می کند. بنابراین به طور حتم کارایی خوبی را به ارمغان می آورد. پیشرفت در این زمینه بر روی کنترل فرآیند جوشکاری خودکار [۲،۳،۴] در طی دو دهه اخیر بسیار چشمگیر بوده است. تحقیقات اولیه [۴،۵،۶] در اتوماتیک ساختن جوشکاری قوس الکتریکی گاز- فلز برای توسعه سیستم کنترل انجام پذیرفته است. نتایج تحقیقات اولیه نشان داد که می توان فرآیند جوشکاری را مدل کرد [۱۰،۱۱] و نیز کنترل جریان و طول قوس برای رسیدن به نقطه تنظیم مناسب با استفاده از روشهای تطبیقی [۹،۸،۷]، خطی سازی فیدبکی [۱۲،۱۳،۱۴]، کنترل مقاوم [۱۵] و کنترل فازی [۳۲] ارائه شده است.

در مقاله [۱۶] ابتدا راهکار استفاده از حسگرهای تصویری را بر روی انبر جوش مطرح کرده است، به این صورت که با اتصال حسگرهای تصویری بر روی انبر جوش به صورت هم محور می توان در زمان واقعی تصویر شکاف جوش و حوضچه جوش را پردازش کرد. این شیوه، راه را برای پیاده سازی انواع تئوری های کنترل بر روی سیستم باز می کند. در مقاله [۱۷] بعد از مرور کلی روی روش کنترل تطبیقی فرآیند جوشکاری، توسعه ربات جوشکار هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است و مراحل مختلف اتوماسیون سیستم را به بحث گذاشته که شامل کنترل حلقه بسته فرآیند و مسیریابی انبر جوشکاری توسط ربات می باشد. در مقاله [۱۸] در مورد تغییرات حرارتی در ارتباط با فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی برای تصحیح خطاهای شکاف از نوع جفت شده سطحی<sup>۱</sup> شکل مطالعه شده است. تغییرات حرارتی به صورت آزمایشگاهی با شیوه ترموگرافی مادون قرمز اندازه گیری می شود. با توجه به این که در شرایط رخ دادن خطا شیب منحنی حرارت به صورت چشمگیری تغییر می کند، این تغییرات برای مشاهده و تصحیح خطا در وضعیت انبر جوش در طی جوشکاری استفاده می شود. اصولاً شرکت ها تمایل دارند تا کنترل فرآیند جوشکاری را از کنترل ربات جدا سازند [۱]. کنترل حرکت ربات و سیستم جوشکاری بر اساس فیدبک از حوضچه جوش به طور جداگانه توسط تئوری کنترل چندمتغیره انجام می شود. از دیگر جنبه های کاری در این مقاله می توان به تحقیقاتی اشاره کرد که شامل محاسبه خارج خط<sup>۲</sup> فصل مشترک سطح شکاف برای ردگیری توسط ربات و استفاده از روش عددی اجزاء محدود<sup>۳</sup> برای مدل سازی خصوصیات حوضچه جوش است. در [۱۹] بر روی توسعه سیستم جوشکاری رباتیک به شیوه کنترل مستقیم مدل مرجع تطبیقی کار شده است. این شیوه کنترلی بر روی ربات و سیستم

<sup>1</sup> Butt

<sup>2</sup> Off-Line

<sup>3</sup> Finite-Element



جوشکاری قوس الکتریکی جداگانه استفاده شده است. مقدار مطلوب سرعت حرکت مجری نهایی ربات توسط مقادیر مطلوب ولتاژ و جریان جوشکاری محاسبه می شود.

در مقاله [۲۰] از حسگر تصویری و تکنیکهای شبکه عصبی برای اندازه گیری و کنترل بلادرنگ دینامیک های حوضچه جوش در طول جوشکاری قوس الکتریکی رباتیک استفاده شده است، چرا که تکنیکهای جاری آموزش و اجرا<sup>۱</sup> نمی توانند در زمان واقعی برای اندازه گیری و کنترل فرآیند جوشکاری رباتیک خوب عمل کنند. در این مقاله با استفاده از تکنولوژی فیلترینگ و استفاده از حسگر تصویری و پردازش تصویر، یک تصویر شفاف از حوضچه جوش در طی جوشکاری رباتیک قوس الکتریکی پالسی تهیه کرده است و پارامترهای مورد نیاز برای کنترل سیستم را از آن استخراج می کند. در فصل مربوط به حسگرها به طور مفصل در مورد انواع روشهای اندازه گیری متغیرهای مورد نیاز برای کنترل سیستم جوشکاری رباتیک بحث خواهیم کرد و تحقیقات قبلی انجام شده در این زمینه را ارائه خواهیم کرد. برای خودکار کردن فرآیند جوشکاری، ماشین جوشکاری مورد استفاده در جوشکاری دستی می تواند به کار برده شود. ربات ها می توانند به جای فرد جوشکار کنترل وضعیت انبر جوش را به عهده بگیرند و یک سیستم جوشکاری رباتیک را ایجاد کنند. برای ساده کردن مسئله کنترل ترجیح داده می شود که کنترل ماشین جوشکاری از کنترل ربات جدا شود اگرچه که این دو ارتباط تنگاتنگی با هم در جوشکاری رباتیک دارند. بنابراین کنترل ربات در فضای دکارتی موضوع اساسی در بحث جوشکاری رباتیک می باشد. در صنعت معمولاً رباتها را در فضای مفصلی کنترل می کنند.

در عمل برای ردیابی مسیر در فضای کار، رباتها مسیرهای مفصلی مرتبط با مسیر اصلی را در فضای مفصلی ردگیری میکنند که قبلاً توسط روش آموزش و اجرا به آنها داده شده است. در این حالت سیگنال های فیدبک از زوایای مفصل بازوها گرفته می شوند. بنابراین سیستم کنترل نمی تواند مستقیماً خطای موقعیت مجری نهایی در فضای کار را تشخیص دهد. به همین دلیل باید رباتهای صنعتی با کیفیت بسیار بالایی ساخته شوند تا از نظر سینماتیکی دارای تکرارپذیری و دقت بالایی باشند که این خود منجر به بالا رفتن قیمت نهایی رباتهای صنعتی از جمله رباتهای جوشکار می شود. از طرفی هنگام استفاده از ربات های ارزان ولی نامرغوب، عدم قطعیتها و خطاها افزایش می یابد. به همین دلیل باید مصالحه ای بین هزینه و ساخت رباتهای با کیفیت بالا برقرار کنیم. این کار را می توان با توسعه تئوری کنترلی رباتها انجام داد. بنابراین، پیشرفت عملکرد رباتها مستلزم توسعه کنترل کننده های آنها می باشد. بنابراین با توجه به حداکثر خطای مجاز در جوشکاری رباتیک، می توان تئوری های کنترلی را در مورد کنترل مجری نهایی ربات بهبود بخشید، حتی اگر از رباتهای با کیفیت و دقیق استفاده نشود. در این حالت نمی توانیم به یک کنترل قابل قبول دست پیدا کنیم مگر آنکه فیدبک مستقیم از موقعیت مجری نهایی در فضای کار داشته باشیم.

<sup>1</sup> Teach and playback

علی رغم تلاش های فراوان که در کنترل ربات ها در فضای مفصلی مانند روش مود لغزشی در [۲۱]، روش شبکه عصبی در [۲۵]، جبران ساز خطی مقاوم در [۲۶]، کنترل تطبیقی بر مبنای مدل در [۷۴] و ساختار متغیر در [۷۷] انجام شده است این دستاوردها نمی توانند کنترل کامل و دقیقی در فضای کار داشته باشند. روشهای مرسوم کنترل ربات در فضای کار با وجود عدم قطعیت در سینماتیک و دینامیک رباتها قبلاً ارائه شده اند [۲۳،۲۴،۷۳]. هدف اصلی در این دستاوردها بر پایه تخمین و به روز کردن قانونهای کنترلی به وسیله الگوریتم های تطبیقی و به کمک حسگرهای تصویری می باشد که با وجود عدم قطعیت های پارامتری به خوبی کار می کنند، هرچند این قوانین کنترل تطبیقی در مواجهه با عدم قطعیت های غیر ساختاری ضعیف عمل می کنند. همچنین روشهای متکی بر پایداری لیاپانوف درگیر مسائلی در ارتباط با مشتق پذیر بودن تابع منتخب لیاپانوف می باشد. علاوه بر آن چون در این روشها اصولاً دینامیک محرک ها در نظر گرفته نمی شود ممکن است که سیگنالهای کنترلی از محدوده کاری آنها تجاوز کرده و اصطلاحاً آنها را به اشباع برسد. فیدبکهای موقعیت و جهت از مجری نهایی و حتی ژاکوبین بازوی ماهر را می توان به صورت تصویری تهیه کرد [۲۳]. سرو کنترل کننده هایی که بر پایه حسگرهای تصویری کار می کنند نیز مورد بررسی قرار گرفته اند مانند کارهایی که در مقاله های [۷۶] و [۷۲] بر روی ربات های صنعتی انجام شده است. این نکته قابل توجه است که محرکهای بازوی ربات ها موتورها هستند که در فضای مفصلی کنترل می شوند در حالی که مجری نهایی در فضای دکارتی، کار انجام می دهد. بنابراین نیاز است تا فضای کنترلی از دکارتی به مفصلی منتقل شود [۲۷]. این تبدیل توسط ژاکوبین بازوها بر پایه مدل سینماتیکی ربات انجام می شود که غیر دقیق بودن این تبدیل فضا می تواند منجر به ناکارآمدی عملکرد نهایی سیستم کنترل ربات در فضای کار شود. هرچند که کارایی یک سیستم کنترل وابسته به باند عدم قطعیت های موجود در سیستم می باشد، اما می توان برای جبران این باند عدم قطعیت در تبدیل فضا از شیوه های جدید مانند کنترل کننده های فازی بهره برد که در [۲۸] این موضوع به عنوان شیوه ای نو در کنترل ربات اسکارا در فضای کار ارائه شده است.

سیستم های کنترل فازی به عنوان یکی از شیوه های کنترل غیر خطی و همچنین به عنوان کنترل کننده های مستقل از مدل در مقابله با عدم قطعیت های غیر ساختاری و ساختاری و دفع اغتشاشات خارجی چه بر روی ربات ها و چه بر روی دیگر سیستم ها به صورت مقاوم عمل می کنند [۲۹،۷۹،۸۰]. از تئوری فازی در بعضی موارد به همراه شبکه های عصبی [۳۰،۸۱] برای کنترل ربات در فضای مفصلی استفاده شده است و بحث پایداری این کنترل کننده ها مورد بررسی قرار گرفته است. کنترل ربات در فضای دکارتی به کمک تئوری فازی یکی از عرصه های فعال تحقیقاتی است. بسیاری از دستاوردهای کنترل ربات برای حذف عوامل غیر خطی در دینامیک ربات از خطی سازی فیدبکی استفاده کرده اند. این کار به علت عدم قطعیت های موجود در مدل باعث ایجاد خطا می شود که لازم است مشکل عدم قطعیت را حل نمود [۳۳].

**۱-۳- طرح کلی پایان نامه**

**فصل دوم:** پس از بیان پیشینه ای از رباتهای جوشکار، به بررسی سیستم جوشکاری می پردازیم و نحوه کنترل ربات جوشکار را بیان می کنیم.

**فصل سوم:** پس از بیان سینماتیک و دینامیک ربات اسکارا، به بررسی سینماتیک سرعت پرداخته و نقاط تکین را برای ربات اسکارا بدست می آوریم.

**فصل چهارم:** به بررسی انواع مسیرهای مطلوب جوشکاری می پردازیم و چند مسیر نمونه را طراحی می کنیم.

**فصل پنجم:** به بررسی مقالات منتشر شده در راستای اندازه گیری پارامترهای جوش می پردازیم و در این زمینه انواع حسگرهایی که توانایی به کار گیری در جوشکاری رباتیک را دارند معرفی می کنیم آنها را از نظر کارایی و دقت با یکدیگر مقایسه می کنیم.

**فصل ششم:** به بررسی روشهای کنترل ربات بر مبنای خطی سازی فیدبکی در فضای دکارتی و بیان مزایا و معایب آنها با استناد به نتایج شبیه سازی می پردازیم.

**فصل هفتم:** با استفاده از قابلیت‌های فازی ابتدا به رفع مشکل یکی از روشهای کنترل پر کاربرد صنعتی می پردازیم سپس انواع روشهای کنترل فازی ربات جوشکار در فضای دکارتی را بیان می کنیم و در آخر پس از بیان مزایا و معایب، نتایج شبیه سازی روشهای پیاده سازی شده را از نظر ماکزیمم نرم خطا با هم مقایسه می کنیم.

**فصل هشتم:** یک نتیجه گیری کلی را با توجه به کارها و بررسی های انجام شده ارائه می دهیم.

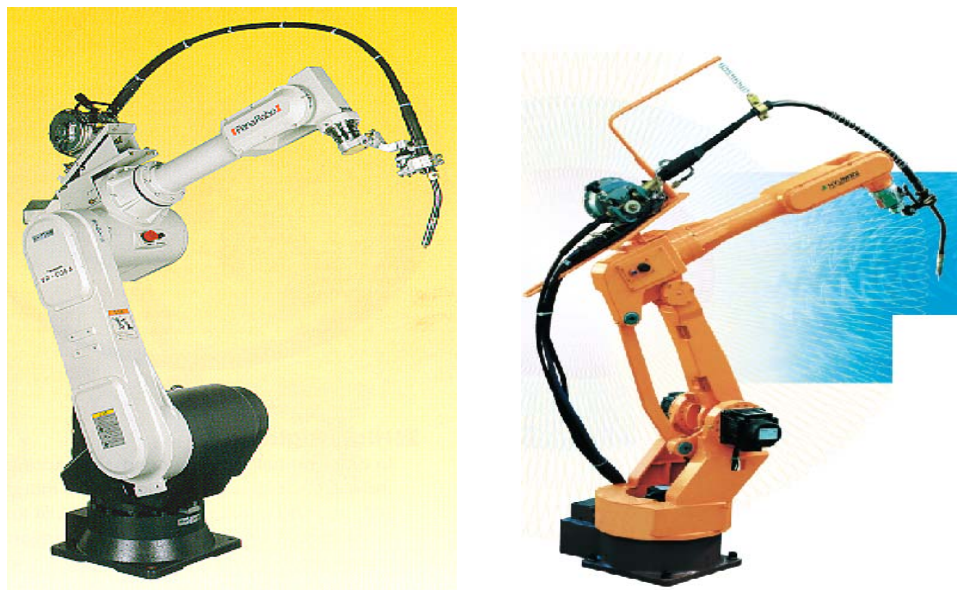
**پیوست:** مدل دینامیکی یک ربات اسکارای صنعتی به نام Bosch-SR60 به همراه پارامترهای آن آورده شده است.

# فصل دوم

## مقدمه ای بر ربات های جوشکار

فرآیندهایی از قبیل جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ<sup>۱</sup> که اغلب اتوماتیک شده اند، لزوماً یادآور ربات جوشکار نیستند زیرا اپراتور انسانی اغلب قطعات را برای جوشکاری آماده می کند. جوشکاری رباتیک معمولاً برای جوشکاری نقطه ای و قوس الکتریکی در کاربرد های با تولید بالا از قبیل صنایع خودرو سازی به کار برده می شود. اگرچه ربات ها در طی دهه ۱۹۶۰ در صنعت آمریکا معرفی شدند ولی جوش کاری رباتیک یکی از کاربرد های نسبتاً جدید در رباتیک می باشد. استفاده از ربات ها در جوشکاری تا دهه ۱۹۸۰ آغاز نشد [۸۵]، اما همراه با صنعت خودرو سازی استفاده از ربات ها در سطح وسیعی برای جوشکاری نقطه ای آغاز شد. بعد از آن زمان تعداد ربات های استفاده شده در صنعت و کاربرد آنها در سطح وسیعی رشد پیدا کرد. کری و هلزر اظهار کردند که تا سال ۲۰۰۵ بیش از ۱۲۰۰۰۰ ربات در صنعت آمریکای شمالی استفاده می شود که تقریباً نیمی از آنها ربات جوشکار می باشد. اصولاً رشد این صنعت به خاطر قیمت بالای تجهیزات آن محدود می شود اما در صنایع با نرخ تولید بالا ضرورت استفاده از آنها توجیه می شود. جوشکاری قوس الکتریکی رباتیک اخیراً با سرعت زیادی شروع به رشد کرده است، اما پیش از این تقریباً ۲۰٪ از کاربرد های ربات های صنعتی را به خود اختصاص داده بودند. اجزاء عمده ربات های جوش قوس الکتریکی شامل بازوی ماهر یا همان واحد مکانیکی و کنترل کننده آن که به عنوان مغز ربات عمل می کند، می باشند. طراحی این سیستم ها می تواند به چندین گونه متداول طبقه بندی شوند از قبیل ربات اسکارا، PUMA560 و ربات مختصات دکارتی که از سیستم های مختصاتی مختلفی برای هدایت کردن بازوهای ماشین استفاده می کنند. در شکل (۱-۲) نمونه یک ربات جوشکار صنعتی آورده شده است.

<sup>1</sup> Gas metal arc welding (GMAW)



شکل (۱-۲) ربات جوشکار

## ۱-۲- ربات های جوشکار

جوشکاری فرآیندی است که برای کنترل کیفیت آن نیاز به فرد جوشکار ماهر می باشد که باز هم خالی از خطا نخواهد بود. بخصوص در مواردی که قرار به جوشکاری در تعداد دفعات زیاد باشد، جوشکاری رباتیک می تواند گزینه بسیار مناسبی باشد چرا که برای انجام کارهای تکراری ساخته شده است و اگر به خوبی کنترل شود می تواند جوشکاری را با کیفیت مطلوب انجام دهد. در یک فرآیند جوشکاری که شامل وظایف تکراری روی قطعات مشابه می باشد، استفاده از ربات می تواند گزینه مناسبی برای اتوماسیون فرآیند باشد. ربات ها برای انجام کارهای تکراری یا قطعات یکسانی که در بیش از یک محور باید جوش داده شوند یا در جاهایی که دسترسی به قطعه مشکل است، مناسب می باشند. از جمله بزرگترین مزیت های برجسته جوشکاری رباتیک، دقت و بازده آن می باشد. جوشکاری رباتیک قابلیت تکرار پذیری جوشکاری را بهبود می بخشد. وقتی ربات یک بار به طور صحیح برنامه ریزی شود، جوش های یکسانی را به طور دقیق در هر زمان روی قطعات کار با ابعاد و مشخصات یکسان تحویل خواهد داد. خودکار کردن حرکات انبر جوش پتانسیل خطا را کاهش می دهد که به معنای کاهش ضایعات و کار مجدد می باشد.

با جوش کاری رباتیک می توان خروجی کار را نیز افزایش داد. نه تنها به این خاطر که رباتها سریعتر کار می کنند بلکه این حقیقت که یک سلول رباتیک کاملاً مجهز و بهینه شده قادر است به مدت ۲۴ ساعت در ۳۶۵ روز سال بدون خرابی کار کند، آنرا بسیار کارآمد تر از یک سلول جوشکاری دستی می سازد. یکی دیگر از مزایای استفاده از سیستم جوشکاری خودکار کاهش هزینه های کارگر می باشد. جوشکاری رباتیک همچنین باعث کاهش ریسک خطراتی که اپراتور با آنها مواجه است، از قبیل گازهای خطرناک و ذرات مذاب فلز در نزدیکی قوس جوشکاری، می شود. اغلب فرآیندهای جوشکاری تولیدی می تواند در کاربرد تولیدی استفاده شود. مشهور ترین آنها فرآیند جوش

قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ آرگون می باشد که تقریباً در ۸۰٪ کاربردها استفاده می شود. به علت عدم نیاز به تمیز کردن سطح بعد از جوشکاری، این پروسه بهترین گزینه برای موارد تولید انبوه می باشد.

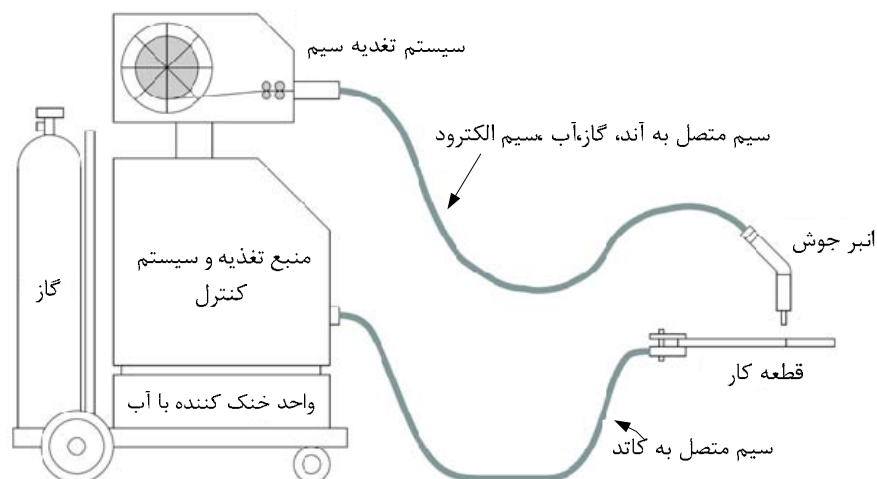
جوشکاری رباتیک به معنای انجام و کنترل جوشکاری توسط تجهیزات رباتیک می باشد. تجهیزات جوشکاری قوس الکتریکی اتوماتیک کاملاً متفاوت از تجهیزات استفاده شده در جوش قوس الکتریکی دستی طراحی می شوند. جوشکاری قوس الکتریکی اتوماتیک معمولاً دارای چرخه کاری بالایی می باشند و تجهیزات جوشکاری باید توانایی کار در آن شرایط را داشته باشند. در مجموع، اجزاء تجهیزات جوشکاری قوس الکتریکی اتوماتیک می بایستی دارای طرح ها و کنترل های لازمه باشند تا با سیستم کنترل اصلی ارتباط برقرار کنند. نوع خاصی از منبع الکتریکی برای ساخت قوس جوش نیاز می باشد. این منبع توسط ماشین جوشکاری مهیا می شود که منبع تغذیه نامیده می شود. تمام فرآیندهای جوشکاری از تفنگ جوشکاری یا انبر جوش برای انتقال جریان جوشکاری از کابل جوشکاری به الکتروود استفاده می کنند. آنها همچنین برای محافظت ناحیه جوش از هوای اطراف از گاز محافظی که از انبر جوش خارج می شود استفاده می کنند. نازل انبر جوش در نزدیکی قوس قرار دارد و می بایستی تدریجاً تمیز شود. بنابراین در سیستم های جوشکاری قوس الکتریکی رباتیک اغلب از تمیز کننده انبر جوش که معمولاً اتوماتیک می باشد برای پاک سازی ترشحات روی انبر جوش استفاده می شود. در فرآیندهای جوشکاری از سیم الکتروود پیوسته برای تغذیه الکتروود به قوس الکتریکی استفاده می کنند. این کار نیاز به واحد تغذیه سیم الکتروود دارند. ادوات جوشکاری و نگهدارنده های قطعه کار، باید به گونه ای در کنار یکدیگر قرار می گیرند تا از دقت جوشکاری توسط ربات مطمئن باشیم.

یک مشکل در جوش کاری رباتیک کابل ها و لوله های استفاده شده برای انتقال جریان و گاز و غیره می باشد که باعث کاهش ظرفیت حرکت مچ ربات می شود. راه حل این مسئله این است که به یک واحد گردان که اجازه عبور گاز محافظ، آب سرد کننده، جریان الکتریکی و سیگنال ها در واحد چرخنده جداگانه ای را می دهد، مجهز شود. این واحد گردان همچنین قابلیت برنامه ریزی Off-Line برای چرخاندن تمام کابل ها و لوله ها در طول مسیرهای تعیین شده بازوی ربات را دارد.

## ۲-۲- فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی گاز - فلز

فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ به عنوان یکی از پر کاربردترین انواع جوشکاری چه در جوشکاری دستی و چه در جوشکاری رباتیک در نظر گرفته می شود. شکل (۲-۲) [۱۱] نمایشی از یک فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی به همراه متعلقات آن را ارائه می دهد و شکل (۳-۲) نمایش سیستمی از فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ را ارائه می دهد. همانطور که در شکل (۲-۲) دیده می شود یک فرآیند جوشکاری شامل تجهیزاتی از قبیل انبر جوش، قطعه کار، ماشین جوشکاری یا منبع توان، واحد تغذیه سیم الکتروود، سیم الکتروود، گاز محافظ و در جوشکاری رباتیک واحد حرکت انبر جوش بر روی شکاف است که ربات این وظیفه را بر عهده دارد.

شکل (۲-۳) به جزئیات بیشتری از فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی اشاره می کند که در توصیف فرآیند جوشکاری مفید است. در طی فرآیند جوشکاری ولتاژ ترمینال توسط ماشین جوشکاری یا همان منبع توان تأمین می شود و جریان الکتریکی در یک مدار الکتریکی ایجاد می شود.



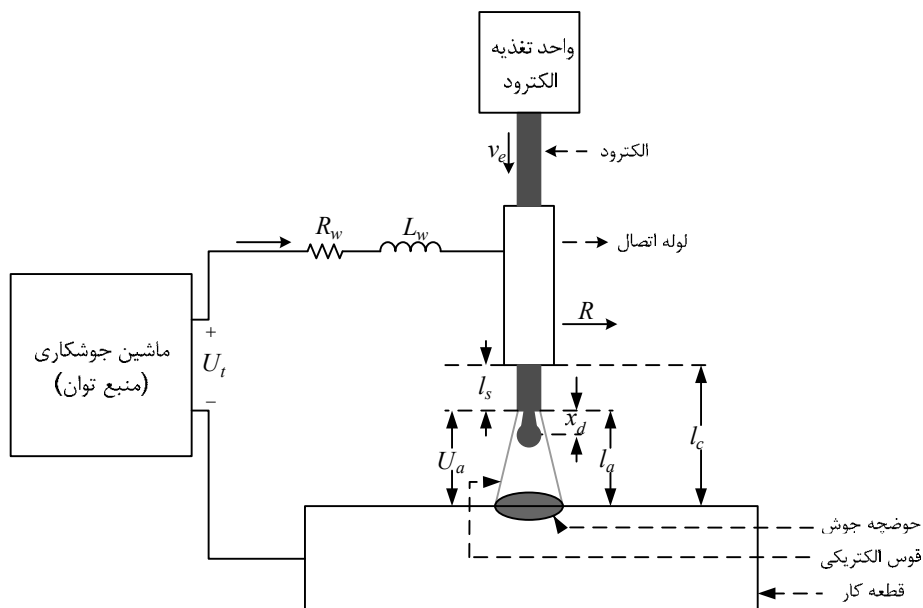
شکل (۲-۲) متعلقات فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی گاز- فلز

انرژی ایجاد شده در قوس الکتریکی منجر به ذوب الکتروود شده و قطره مذاب ایجاد می شود. این انرژی همچنین باعث رشد قطره مذاب می شود و نهایتاً نقش جدا کردن قطره از انتهای الکتروود و انتقال به قطعه کار را بر عهده دارد. الکتروودی که به این شیوه مصرف می شود توسط نیروی حرکتی واحد تغذیه الکتروود جایگزین می شود. انرژی ایجاد شده در قوس الکتریکی قطعه کار را نیز ذوب می کند و قسمت ذوب شده از قطعه کار به همراه قطره مذاب جدا شده از الکتروود بر روی قطعه کار حوضچه جوش را تشکیل می دهند. زمانی که حوضچه جوش سرد و جامد شود فرآیند جوشکاری کامل می شود. در طی این نوع جوشکاری گاز محافظ جاری در اطراف الکتروود، قوس الکتریکی و حوضچه جوش را در برابر نفوذ هوای محیط محافظت می کند. علت استفاده از گازهای محافظ افزایش کیفیت جوش و جلوگیری از ایجاد تخلخل و سرباره در جوش است. سرباره به دلیل ترکیب شدن اکسیژن و نیتروژن هوای اطراف با فلز مذاب ایجاد می شود و تخلخل به دلیل به دام افتادن هوای محیط در حوضچه جوش در هنگام سرد شدن حوضچه جوش می باشد. در این راستا از دو نوع گاز محافظ استفاده می شود. استفاده از گازهای خنثی مانند آرگون و هلیوم که به روش <sup>1</sup>MIG معروف است و استفاده از گازهای فعال مانند دی اکسید کربن که به روش <sup>2</sup>MAG معروف است. هرکدام از این شیوه ها مزیت ها و مشکلات خاص خود را دارد. اطلاعات بیشتر در این زمینه را می توان در [۸۲] یافت. فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ را می توان به سه حالت کاری بسته به اندازه جریان الکتریکی تقسیم بندی کرد. این حالت ها که به حالت های انتقال فلز نیز معروف هستند به ترتیب

<sup>1</sup> Metal inert gas

<sup>2</sup> Metal active gas

حالت اتصال کوتاه یا قوس کوتاه، حالت دانه ای و حالت اسپری می باشد. در حالت اتصال کوتاه انتهای الکتروود به همراه قطره آویزان به طور متناوب، تحت اتصال کوتاه با قطعه کار قرار می گیرد. این اتصال کوتاه منجر به افزایش ناگهانی جریان جوشکاری می شود. انرژی آزاد شده در اثر افزایش شدید جریان باعث جدا شدن قطره مذاب می شود. به طور معمول جوشکاری در حالت اتصال کوتاه تا حداکثر جریان ۲۰۰ آمپر بسته به قطر و جنس ماده الکتروود می تواند مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۲-۳) فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی

در جوشکاری در حالت اسپری الکتروود به طور ایده آل تحت اتصال کوتاه با قطعه کار قرار نمی گیرد. این امر به دلیل استفاده از جریان های بالاتر می باشد که حداقل آن ۲۵۰ آمپر است. بنابراین تحت تأثیر این جریان های بالا قطرات مذاب الکتروود با سرعت به سمت قطعه کار در راستای محور الکتروود بدون این که الکتروود با قطعه کار اتصال کوتاه کند پرتاب می شوند. در حالت دانه ای با توجه به استفاده از محدوده جریان بین حالت اتصال کوتاه و حالت اسپری، اندازه قطره های مذاب بزرگ و نسبت به حالت اسپری بسیار نامنظم هستند. این امر به دلیل تأثیر بیشتر نیروی جاذبه در جدا کردن قطره مذاب نسبت به جریان جوشکاری می باشد که کنترل پذیری در این حالت بسیار پایین بوده و کیفیت جوش پایینی را ایجاد می کند.

در بحث کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی باید اشاره کرد که هدف از کنترل فرآیند رسیدن به یک جوش با کیفیت خوب است. در این راستا باید پارامترهایی از فرآیند جوشکاری که در تعیین کیفیت جوش نقش دارند را بررسی کرده و کنترل کننده را بر مبنای تنظیم این پارامترها به صورت مطلوب طراحی کرد.



با توجه به مطالب ذکر شده در [۱۲] و [۱۰] میزان حرارات و جرم الکتروود منتقل شده به حوضچه جوش نقش تعیین کننده ای در کیفیت جوش ایفا می کنند. بنابراین برای رسیدن به یک کیفیت جوش خوب باید میزان گرما و جرم ورودی به حوضچه جوش را کنترل کرد. بنابراین تعیین پارامترهایی که بر روی این انتقال حرارت و جرم مؤثر هستند ضروری است. در این راستا با توجه به شکل های (۲-۲) و (۳-۲) می توان مشاهده کرد که چهار پارامتر ولتاژ ترمینال منبع توان  $U_t$ ، سرعت تغذیه سیم الکتروود  $v_e$ ، فاصله لوله اتصال یا انبر جوش تا قطعه کار  $l_c$  و سرعت حرکت انبر جوش بر روی شکاف  $R$  به عنوان متغیرهای قابل تنظیم در فرآیند قادر به کنترل میزان حرارات و جرم منتقل شده به حوضچه جوش می باشند. بنابراین این چهار پارامتر به عنوان ورودی های فرآیند در نظر گرفته می شوند. برای درک این موضوع که ورودی های سیستم چگونه بر روی انتقال حرارت و جرم تأثیر می گذارند ناگزیر از مدل کردن فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ هستیم. چرا که دینامیک حاکم بر سیستم به خوبی رفتار فرآیند را در قبال تغییر این ورودی ها نشان می دهد. در این راستا مدل ارائه شده جهت کنترل فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با توجه به [۱۲] شامل دو بخش است. بخش اول مربوط به دینامیک های مربوط به جریان جوشکاری و طول قوس می باشد و دیگری مربوط به مدل انتقال حرارت و جرم حالت دائم است.

#### مدل جریان و طول قوس

$$\dot{I} = -\frac{1}{L_w}((R_w + R_c - \rho_r l_a)I + U_a) + \frac{1}{L_w}U_t - \frac{\rho_r}{L_w}l_c \quad (۱-۲)$$

$$\dot{l}_a = k_1 I + k_2 \rho_r I^2 (l_c - l_a) - v_e \quad (۲-۲)$$

$$U_a = U_0 + R_a I + E_a l_a \quad , \quad l_a = l_c - l_s \quad (۳-۲)$$

که در آن  $R_w$  به عنوان مجموع مقاومتهای مدار و  $L_w$  مجموع سلف های مدار،  $I$  جریان الکتریکی مدار در داخل،  $R_c$  مقاومت تماسی بین لوله اتصال و الکتروود،  $\rho_r$  مقاومت ویژه الکتروود،  $U_a$  ولتاژ قوس،  $l_a$  طول قوس،  $U_0$  ثابت ولتاژ قوس،  $E_a$  فاکتور طول قوس،  $l_c$  بیرون زدگی الکتروود و  $k_1$  و  $k_2$  ثابت های سرعت ذوب هستند.

#### مدل انتقال حرارت و جرم حالت دائم

$$H = \frac{(\rho_r(l_c - l_a)I + U_a)I\eta}{R} \quad (۴-۲)$$

که در آن  $H$  گرمای ورودی در واحد طول فلز تحت جوش،  $\eta$  ضریب انتقال حرارت است.

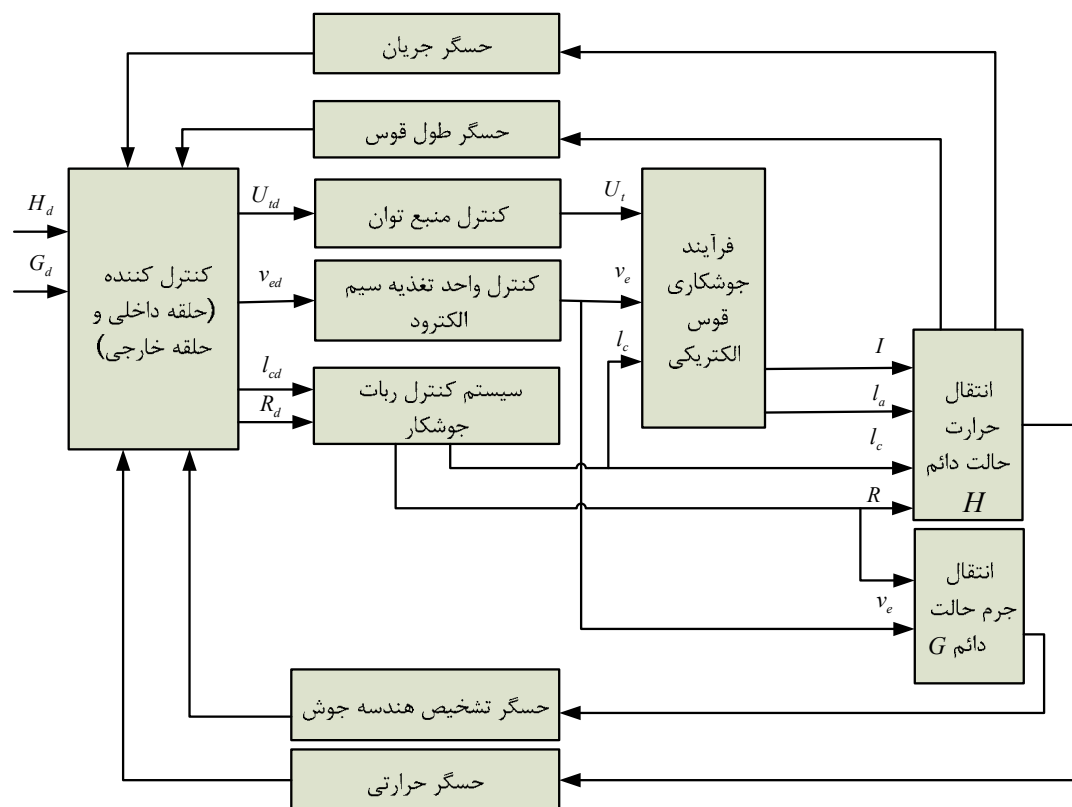
$$G = \frac{A v_e}{R} \quad (۵-۲)$$

که در آن  $G$  به عنوان سطح مقطعی عرضی شکل دانه های جوش و  $A$  سطح مقطع الکتروود است.

همانطور که از روابط بالا مشخص است ورودی های تعریف شده هر کدام به نحوی در انتقال حرارت و جرم به حوضچه جوش نقش دارند. بدین گونه که ولتاژ ترمینال باعث برقراری جریان الکتریکی در مدار می شود. این جریان باعث ایجاد قوس الکتریکی در فاصله هوایی بین الکتروود و قطعه کار می شود. تغییرات در طول قوس که ناشی از سرعت تغذیه الکتروود و فاصله انبر جوش تا قطعه کار است منجر به تغییر جریان جوشکاری می شود. همچنین سرعت حرکت انبر جوش به همراه جریان، طول قوس و سرعت تغذیه الکتروود مستقیماً بر روی حرارت ورودی در واحد طول فلز تحت جوش و سطح مقطع عرضی جوش تأثیر می گذارند.

بنابراین ساختارهای کنترلی پیشنهاد شده در کارهای انجام شده در این زمینه به صورت دو حلقه کنترلی داخلی و خارجی می باشد. حلقه کنترلی داخلی مربوط به کنترل جریان و طول قوس است و حلقه کنترلی خارجی مربوط به کنترل پارامترهای حوضچه جوش که شامل میزان نفوذ جوش، نرخ گرم و سرد شدن حوضچه جوش است. باید توجه کرد که مطابق تمامی مسائل مربوط به کنترل فرآیند ها در عمل، سیگنال های کنترلی باید برای فرآیند توسط محرک ها فراهم شود. با در نظر گرفتن فرآیند جوشکاری رباتیک این محرک ها منبع توان، موتور تغذیه الکتروود و ربات می باشند که در شکل (۲-۴) هم نشان داده شده است. منبع توان نقش فراهم کردن سیگنال ولتاژ ترمینال  $U_t$  با جریان بالا را بر عهده دارد. موتور تغذیه الکتروود نقش تنظیم سرعت تغذیه سیم الکتروود  $V_e$  را بر عهده دارد. ربات که انبر جوش را حمل می کند وظیفه تنظیم فاصله انبر جوش تا قطعه کار  $l_c$  و سرعت حرکت انبر جوش  $R$  را بر عهده دارد. این محرک ها هر کدام به تنهایی به عنوان یک فرآیند در نظر گرفته می شوند که پیچیده ترین آنها ربات جوشکار می باشد.

بنابراین برای اعمال سیگنال های دریافتی از کنترل کننده به فرآیند، محرک ها باید تحت کنترل قرار گیرند تا قادر به انجام صحیح فرمان کنترلی باشند. در این راستا کنترل حلقه بسته ربات جوشکار مهم است در حالی که منبع توان و موتور تغذیه الکتروود را می توان به صورت حلقه باز کنترل کرد که در این صورت مقدار ولتاژ ترمینال و سرعت تغذیه سیم برای هر جوشکاری مقداری ثابت خواهد بود. اما کنترل موقعیت و سرعت مجری نهایی ربات که انبر جوش را باید در یک مسیر خاص در فضای کار با سرعت مشخصی جابجا کند نقش تعیین کننده ای در کنترل کیفیت جوش خواهد داشت. بر همین اساس در این پایان نامه هدف خود را بر روی کنترل موقعیت و سرعت مجری نهایی ربات جوشکار در فضای کار قرار داده ایم.

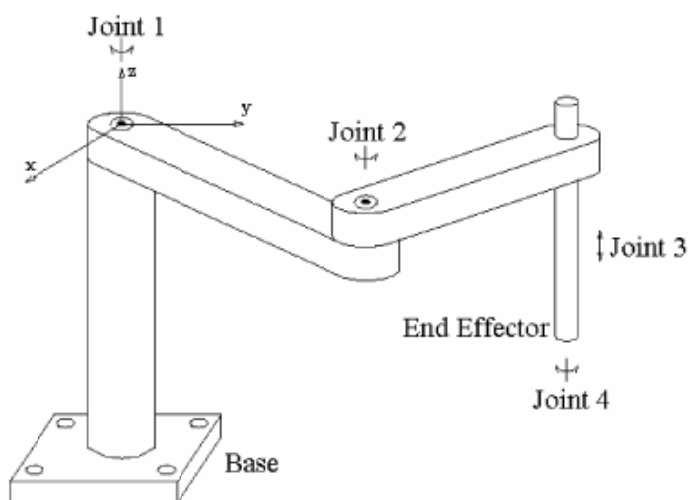


شکل (۲-۴) بلوک دیاگرام کنترلی و نقش ربات در کنترل فرآیند جوشکاری

# فصل سوم

## مدلسازی ربات اسکارا

۱-۳- مدلسازی سینماتیکی



شکل (۱-۳) ربات اسکارا

همانطور که در شکل (۱-۳) دیده می شود، ربات SCARA از نوع ربات های سه مفصله <sup>1</sup>RRP می باشد یعنی دو مفصل اول دورانی و مفصل آخر کشویی می باشد. بعضی از این ربات ها دارای یک مفصل چهارم نیز می باشند که از نوع دورانی بوده و به عنوان مچ در انتهای مفصل کشویی نصب می شود.

در ابتدا بهتر است بعضی از تعریفهای اساسی را در مورد مشخصات ربات مطرح کنیم.

**درجات حرکت (DOM):** تعداد مفاصل ربات، درجات حرکت ربات را معین می کند. هر مفصل یک درجه حرکت به ربات اضافه می کند. هر چه تعداد درجات حرکت ربات بیشتر باشد قدرت انعطاف آن برای انجام حرکات ظریف و ماهرانه بیشتر می شود.

<sup>1</sup> Revolute Revolute Prismatic

<sup>2</sup> Degree Of Motion

درجات آزادی (DOF)<sup>۱</sup>: به تعداد حرکت‌های مستقل مجری نهایی ربات در جهت یا حول سه محور مختصات اصلی گفته می‌شود. پس ربات می‌تواند حداکثر ۶ درجه آزادی داشته باشد. تفاضل تعداد درجات آزادی و درجات حرکت را اصطلاحاً درجات اضافی گفته می‌شود که ربات‌های چالاک و ظریف درجات اضافی حرکت دارند یعنی درجات حرکت آنها از درجات آزادی بیشتر است.

**ماتریس دوران (ماتریس جهت<sup>۲</sup>):** ماتریس دوران  $R^{i-1}$  با ابعاد  $3 \times 3$  برای مشخص کردن میزان دوران دو دستگاه مختصات نسبت به یکدیگر از ماتریس دوران استفاده می‌شود. به کمک ماتریس دوران می‌توان وضعیت چرخش دو مفصل پشت سر هم ربات را نسبت به یکدیگر بدست آورد و در نهایت جهت مجری نهایی را نسبت به دستگاه پایه ربات بدست آورد.

**بردار انتقال:** بردار  $d^{i-1}$  با ابعاد  $3 \times 1$  توصیف مبدأ دستگاه  $i$  در دستگاه  $i-1$  می‌باشد. توسط این بردار می‌توان موقعیت<sup>۳</sup> دو مفصل پشت سر هم ربات را نسبت به یکدیگر بدست آورد و در نهایت موقعیت (مختصات) مجری نهایی را نسبت به دستگاه پایه ربات بدست آورد. معمولاً این بردار تابعی از تمام متغیرهای مفصلی اعم از دورانی و کشویی می‌باشد که نقش اصلی را در موقعیت مجری نهایی ربات در فضای کار ایفا می‌کند.

**ماتریس تبدیل:** ماتریس  $T^{i-1}$  به صورتی که در (۳-۱۸) آورده شده است از کنار هم قرار  $d^{i-1}$  و  $R^{i-1}$  در یک ماتریس  $4 \times 4$  به صورت زیر تشکیل می‌شود که در مجموع کلیه اطلاعات مربوط به موقعیت و جهت مجری نهایی را بر حسب متغیرهای فضای مفصلی می‌دهد. ماتریس تبدیل یک تبدیل از فضای مفصلی به فضایی دکارتی انجام می‌دهد تا از روی مقدار متغیرهای مفصلی در هر لحظه بتوان مقدار متغیرهای دکارتی شامل  $X$ ،  $Y$ ،  $Z$  مجری نهایی و جهت آن نسبت به دستگاه پایه را بدست آورد.

$$T^{i-1}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} R^{i-1}_{3 \times 3} & d^{i-1} \\ \underline{0}_{1 \times 3} & I \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

**نمایش دناویت هارتنبرگ:** یک دستورالعمل متداول برای تعیین دستگاه‌های مختصات در کاربردهای رباتیک، دناویت هارتنبرگ یا دستورالعمل D-H است. در این دستورالعمل هر ماتریس تبدیل  $T^{i-1}$  به صورت ضرب چهار تبدیل اساسی نشان داده می‌شود.

$$T^{i-1} = Rot_{z_{i-1}, \theta_i} \times Trans_{z_{i-1}, d_i} \times Trans_{x_i, a_i} \times Rot_{x_i, \alpha_i} \quad (3-19)$$

<sup>1</sup> Degree Of Freedom

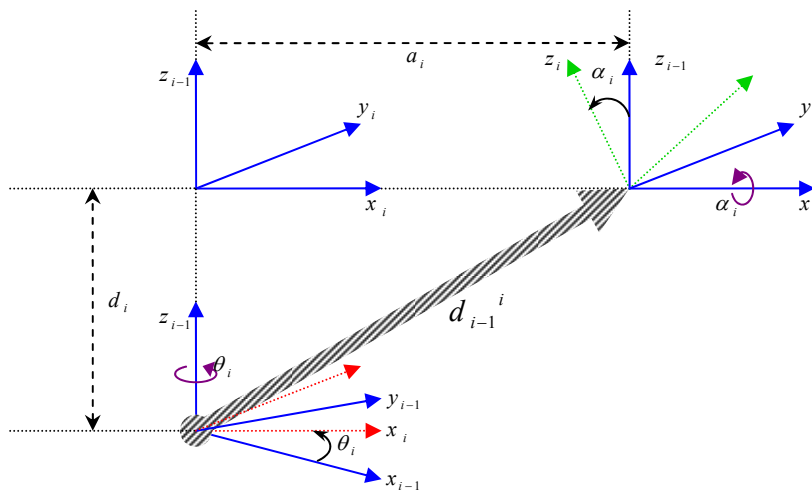
<sup>2</sup> Orientation

<sup>3</sup> Position

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

که در آن  $d_i$  انحراف رابط،  $a_i$  طول رابط،  $\theta_i$  زاویه مفصل و  $\alpha_i$  پیش رابط است. همانطور که در شکل (۲-۳) دیده می‌شود این چهار پارامتر، به طور کامل برای یک رابط آورده شده است.



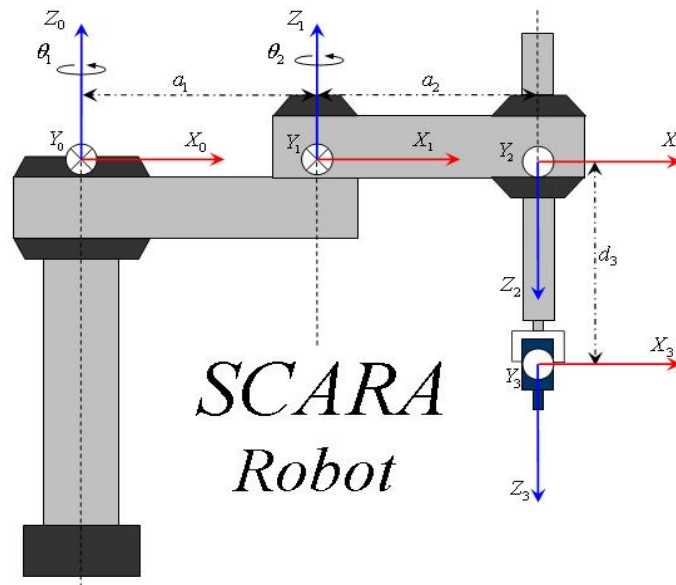
شکل (۲-۳) پارامترهای دناویت هارتنبرگ

به کمک این چهار پارامتر می‌توان موقعیت نسبی دو سیستم مختصات را به طور کامل تعیین نمود. در زیر تعریفی از این پارامترها را بیان می‌کنیم.

- $a_i$  طول عمود مشترک (فاصله از  $Z_{i-1}$  تا  $Z_i$  در امتداد  $X_i$ )
- $d_i$  فاصله بین مبدا و نقطه تقاطع محورهای  $X_i$  و  $Z_{i-1}$  (فاصله از  $X_{i-1}$  تا  $X_i$  در امتداد  $Z_{i-1}$ ). هنگامی که مفصل  $i$  کشویی باشد  $d_i$  متغیر است.
- $\alpha_i$  زاویه بین  $Z_i$  و  $Z_{i-1}$  که حول  $X_i$  در جهت راستگرد اندازه‌گیری می‌شود.

• زاویه بین محور  $x_{i-1}$  و  $x_i$  که حول محور  $Z_{i-1}$  در جهت راستگرد اندازه گیری می شود. هرگاه مفصل آلولایی باشد  $\theta_i$  متغیر است.

نمایش دناویت هارتنبرگ ربات اسکاری در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.



شکل (۳-۳) دستگاه بندی دناویت هارتنبرگ ربات اسکارا

### ۲-۳- سینماتیک در ربات اسکارا

مفهوم سینماتیک در حقیقت رابطه ای است که بین متغیر های فضای مفصلی  $q$  و متغیر های فضای دکارتی  $X$  برقرار می باشد و توسط این رابطه می توان موقعیت و جهت مجری نهایی را نسبت به موقعیت مفاصل و برعکس بدست آورد.

- سینماتیک مستقیم: محاسبه موقعیت و جهت مجری نهایی (متغیر های فضای دکارتی  $X$ ) بر حسب موقعیت مفاصل (متغیر های فضای مفصلی  $q$ ) است
- سنماتیک وارون: محاسبه موقعیت مفاصل (متغیر های فضای مفصلی  $q$ ) بر حسب موقعیت و جهت مجری نهایی (متغیر های فضای دکارتی  $X$ ) است.

### ۱-۲-۳- سینماتیک مستقیم

ماتریس تبدیل  $T_{i-1}^i$  که از طریق پارامترهای دناویت هارتنبرگ بدست می آید در حقیقت همان ماتریس سینماتیک مستقیم است که موقعیت دستگاه  $i$ ام را نسبت به دستگاه  $i-1$ ام ( $d_{i-1}^i$ ) و جهت دستگاه  $i$ ام را نسبت به دستگاه  $i-1$ ام ( $R_{i-1}^i$ ) مشخص می کند. اگر برای هر مفصل ماتریس های تبدیل را بدست آورده و در هم ضرب

کنیم در نهایت ماتریس  $T_0^n$  یک ربات  $n$  رابط بدست خواهد آمد. در اینجا برای ربات اسکارا بنا به مختصات بندی دناویت هارتنبرگ ماتریس  $T_0^n$  را برای  $n = 3$  بدست می آوریم.

جدول (۱-۳) پارامترهای دناویت هارتنبرگ در ربات اسکارا

| مفصل | $\alpha_i$ | $a_i$ | $\theta_i$   | $d_i$   |
|------|------------|-------|--------------|---------|
| ۱    | ۰          | $a_1$ | $\theta_1^*$ | ۰       |
| ۲    | $۱۸۰$      | $a_2$ | $\theta_2^*$ | ۰       |
| ۳    | ۰          | ۰     | ۰            | $d_3^*$ |

$$T_0^3 = T_0^1 \times T_1^2 \times T_2^3$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & \sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & -\cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۲۵-۳)$$

که در آن ماتریس های دوران و انتقال مجری نهایی اسکارا به شرح زیر می باشند.

$$R_0^3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & \sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & -\cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (۲۶-۳)$$

$$d_0^3 = \begin{bmatrix} a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos(\theta_1) \\ a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \sin(\theta_1) \\ -d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (۲۷-۳)$$

در ربات اسکارا متغیر های مفصلی تحت بردار  $q$  نمایش داده می شود. بنابراین به ازای هر مقداری از بردار  $q$ ، ماتریس تبدیلی بدست می آید که موقعیت و جهت مجری نهایی را به صورت عددی معلوم می کند.



$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (28-3)$$

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29-3)$$

### ۳-۲-۲- سینماتیک وارون

مفهوم سینماتیک وارون محاسبه مقادیر متغیرهای مفصلی از روی متغیرهای دکارتی است. با توجه به

سینماتیک مستقیم ربات اسکارا [۳۶]، سه معادله سه مجهول مربوطه به صورت (۳۹-۳) می باشد.

$$\begin{aligned} a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos(\theta_1) &= P_x \\ a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \sin(\theta_1) &= P_y \\ -d_3 &= P_z \end{aligned} \quad (39-3)$$

برای محاسبه زوایای مفصلی از روی متغیرهای دکارتی به صورت زیر عمل می کنیم.

$$X = a_2(\cos(\theta_1)\cos(\theta_2) - \sin(\theta_1)\sin(\theta_2)) + a_1 \cos(\theta_1) \quad (40-3)$$

$$Y = a_2(\sin(\theta_1)\cos(\theta_2) + \cos(\theta_1)\sin(\theta_2)) + a_1 \sin(\theta_1) \quad (41-3)$$

$$\begin{aligned} X^2 &= a_2^2[\cos^2(\theta_1)\cos^2(\theta_2) + \sin^2(\theta_1)\sin^2(\theta_2) - 2\cos(\theta_1)\cos(\theta_2)\sin(\theta_1)\sin(\theta_2)] \\ &+ a_2^2 \cos^2(\theta_1) + 2a_1 a_2 \cos(\theta_1)[\cos(\theta_1)\cos(\theta_2) - \sin(\theta_1)\sin(\theta_2)] \end{aligned} \quad (42-3)$$

$$\begin{aligned} Y^2 &= a_2^2[\sin^2(\theta_1)\cos^2(\theta_2) + \sin^2(\theta_2)\cos^2(\theta_1) + 2\cos(\theta_1)\cos(\theta_2)\sin(\theta_1)\sin(\theta_2)] \\ &+ a_1^2 \sin^2(\theta_1) + 2a_1 a_2 \sin(\theta_1)[\sin(\theta_1)\cos(\theta_2) + \cos(\theta_1)\sin(\theta_2)] \end{aligned} \quad (43-3)$$

$$\begin{aligned} X^2 + Y^2 &= a_2^2[c^2(\theta_1)c^2(\theta_2) + s^2(\theta_1)s^2(\theta_2) + s^2(\theta_1)c^2(\theta_2) + s^2(\theta_2)c^2(\theta_1)] \\ &+ a_1^2(c^2(\theta_1) + s^2(\theta_1)) + 2a_2 a_3(c(\theta_2)[c^2(\theta_1) + s^2(\theta_1)]) \\ &= a_2^2[(c^2(\theta_1) + s^2(\theta_1))[c^2(\theta_2) + s^2(\theta_2)]] + a_1^2 + 2a_1 a_2 c(\theta_2) \end{aligned} \quad (44-3)$$

$$\begin{aligned}
 X^2 + Y^2 &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\theta_2) \\
 \text{if } \rightarrow r^2 &= X^2 + Y^2 \\
 \text{if } \rightarrow s &= a_1^2 + a_2^2 \\
 \cos(\theta_2) &= \frac{r-s}{2a_1a_2} \Rightarrow \theta_2 = \cos^{-1} \left[ \frac{r^2 - s}{2a_1a_2} \right]
 \end{aligned} \tag{۴۵-۳}$$

با استفاده از چند تبدیل مثلثاتی خواهیم داشت :

$$\theta_2 = a \tan 2 \left[ \frac{\sqrt{2rs - q^2 - r^2}}{r - s} \right] \tag{۴۶-۳}$$

و در ادامه برای محاسبه  $\theta_1$  داریم.

$$\begin{aligned}
 X^2 - Y^2 &= a_2^2 [s^2(\theta_1) - c^2(\theta_1)][s^2(\theta_2) - c^2(\theta_2)] - 4s(\theta_1)s(\theta_2)c(\theta_1)c(\theta_2) \\
 &+ a_1^2 ([c^2(\theta_1) - s^2(\theta_1)]) + 2a_1a_2(c(\theta_2)[c^2(\theta_1) - s^2(\theta_1)] - \\
 &2s(\theta_1)s(\theta_2)c(\theta_1))
 \end{aligned} \tag{۴۷-۳}$$

با استفاده از چند تبدیل مثلثاتی خواهیم داشت

$$\begin{aligned}
 r^2 &= X^2 + Y^2 \\
 \text{if } \rightarrow s &= a_1^2 + a_2^2 \\
 \text{if } \rightarrow q &= a_1^2 - a_2^2 \\
 \theta_1 &= a \tan 2 \left( \frac{Y}{X} \right) - a \tan 2 \left[ \frac{\sqrt{2rs - q^2 - r^2}}{r + q} \right]
 \end{aligned} \tag{۴۸-۳}$$

و برای متغیر مفصلی آخر که بسیار ساده است داریم.

$$d_3 = -P_z \tag{۴۹-۳}$$

### ۳-۳- سینماتیک سرعت در ربات اسکارا (ژاکوبین بازوی ماهر)

خواص هندسی ربات در ماتریس ژاکوبین بیان می شود. این ماتریس به صورت یک تبدیل عمل می کند و سرعت های مفصلی را به سرعت دروانی و سرعت خطی نقطه انتهایی مربوط می سازد. ژاکوبین یک تابع ماتریسی است و می تواند به عنوان نوعی بردار از مشتق یک تابع اسکالر تلقی گردد. ماتریس ژاکوبین یکی از مهمترین کمیت های آنالیز و کنترل حرکت ربات محسوب می گردد و به صورت مجازی جنبه های مختلفی از کارهای رباتیک را پدید می آورد. در طراحی و اجرای مسیرهای هموار، در تعیین ترکیب های تکین، در اجرای حرکت های فضای دکارتی، در بدست آوردن معادلات دینامیکی حرکت و در تبدیل نیروها و گشتاورها از مجری نهایی به مفاصل بازوی ماهر به کار می رود. ماتریس ژاکوبین را در حالت کلی با نماد  $J$  نمایش می دهند. در حالت کلی ماتریس ژاکوبین ۶ سطر دارد که بسته به این که کدام سطر ها مقدار داشته باشند مبین تعداد درجات آزادی حرکت ربات می باشد و به تعداد متغیر های مفصلی یا همان تعداد مفصل ها ستون دارد که مبین تعداد درجات حرکت می باشد. بنابراین ماتریس ژاکوبین یک ماتریس  $6 \times n$  است.

$$\Rightarrow J = \begin{bmatrix} -a_1 \sin(\theta_1) - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ a_1 \cos(\theta_1) + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-59)$$

همانطور که دیده می شود ماتریس ژاکوبین اسکارا دارای ۴ سطر غیر صفر می باشد که مبین ۴ درجه آزادی آن می باشد که قبلاً به این موضوع اشاره شد.

#### ۳-۳-۱. تکین ها

از آنجا که ژاکوبین تابعی از متغیر های مفصلی  $q$  است، ترکیب های آن برای وقتی که مرتبه  $J$  کاهش می یابد اهمیت خاص دارند. چنین ترکیب هایی، تکین ها یا ترکیب های تکین نامیده می شوند. شناسایی تکین های بازوی ماهر به دلایل زیر مهم است

- تکین ها ترکیب هایی را نشان می دهند که جهات معینی از حرکت ممکن است غیرقابل اجرا باشد.
- در تکین ها ممکن است سرعت های محدود مجری نهایی به سرعت های نامحدود مفاصل مربوط شود.

- در تکین ها ممکن است نیروها و گشتاورهای محدود مجری نهایی به گشتاورهای نامحدود مفاصل مربوط شوند
- تکین ها معمولاً به نقاط مرزی فضای کاری بازوی ماهر مربوط می شوند که نقاط ماکزیمم دسترسی بازوی ماهر هستند.
- تکین ها به نقاطی در فضای کاری مربوط می شوند که ممکن است در اثر مقدار کوچکی تغییر در پارامترهای رابط نظیر طول، انحراف و غیره، غیر قابل دسترس باشند.
- نزدیک تکین ها راه حل یگانه ای برای سینماتیک وارون وجود نخواهد داشت. در این حالت ممکن است هیچ پاسخی وجود نداشته باشد یا ممکن است تعداد بی نهایت پاسخ وجود داشته باشد.

### ۳-۳-۲. محاسبه تکین ها

ترکیب های تکین برای بازوهای ماهر با مچ کروی به دو مسئله ساده تر تقسیم می شود. مسئله اول تعیین آن دسته از تکین های بازو ناشی از حرکت بازوها که شامل سه رابط اول یا بیشتر می باشد. مسئله دوم تعیین تکین های مچ است که از حرکت مچ کروی ناشی می شود. اطلاعات بیشتر را می توانید در [۳۶] جستجو کنید. با توجه به این که ربات اسکارا مچ کروی ندارد، برای محاسبه تکین های کافی است که تکین های بازو را حساب کنیم بنابراین داریم.

$$J_{11} = \begin{bmatrix} -a_1 \sin(\theta_1) - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ a_1 \cos(\theta_1) + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (71-3)$$

$$\det J_{11} = 0 \quad \Rightarrow \quad -a_1 a_2 \sin(\theta_2) = 0 \quad (72-3)$$

$$\Rightarrow \theta_2 = k\pi \quad , \quad k = 1, 2, \dots \quad (73-3)$$

همانطور که دیده می شود تکین های ربات اسکارا فقط مربوط به مفصل دوم می شود و با توجه به ساختار مکانیکی ربات های اسکارا عملاً دارای دو تکین خواهد بود

$$\theta_2 = 0, \pi \quad (74-3)$$

### ۳-۴- مدلسازی دینامیکی

معادلات دینامیکی بازوهای ماهر در [۳۵، ۳۶] آورده شده است. دو مسئله در ارتباط با دینامیک بازوهای ماهر وجود دارد که حل آنها مهم می باشد.

دینامیک وارون: حل معادلات حرکت بازوی ماهر برای تعیین نیروهای لازم

دینامیک مستقیم: حل معادلات حرکت به صورت یکپارچه تا به ازای یک نیروی اعمالی، مقدار متغیر در پاسخ به آن نیرو تعیین شوند.

معادلات حرکت یک بازوی ماهر  $n$  مفصله در حالت کلی به صورت زیر است،

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) = \tau \quad (1-3)$$

که در آن  $q$  بردار متغیرهای مفصلی،  $\dot{q}$  بردار سرعت های مفصلی،  $\ddot{q}$  بردار شتاب های مفصلی،  $D(q)$  ماتریس متقارن ممان اینرسی فضای مفصلی یا تانسور اینرسی بازوی ماهر،  $C(q, \dot{q})\dot{q}$  بردار گشتاورهای کوریولیس و جانب مرکز،  $F(\dot{q})$  بردار اصطکاک های ویسکوز و کولن است که معمولاً به عنوان بخشی از دینامیک بازوهای صلب در نظر گرفته نمی شود،  $G(q)$  بردار توصیف کننده نیروهای گرانشی و  $\tau$  بردار گشتاور ورودی است.

گشتاور لازم، توسط موتورهای مفصلی به اعمال می شود. در نتیجه موتورهای نقش اساسی را در حرکت بازوی ماهر ربات به عهده دارند. کنترل موقعیت ربات هم در واقع کنترل خروجی موتورهای می باشد. برای کنترل خروجی موتورهای نیاز به معادلات دینامیکی آنها می باشد که بسته به نوع موتور، در ربات ها تفاوت می کند. معادلات دینامیکی حرکت موتورها در حالت کلی به صورت زیر است [۳۶]:

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m = \tau_m \quad (2-3)$$

که در آن  $\tau_m$  گشتاور اعمالی به موتور می باشد و  $q_m$  متغیر زاویه ای موبوط به موتور می باشد. معمولاً چون سرعت این موتورها زیاد می باشد، برای اتصال موتورها به مفصل ها از چرخ دنده ها برای کاهش سرعت موتور استفاده می شود. بنابراین متغیری که در معادلات استفاده می شود به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \theta &= r\theta_m \\ 0 < r < 1 \end{aligned} \quad (3-3)$$

که در آن  $r$  نسبت تبدیل چرخ دنده ها می باشد.

بازوها برای هر موتور حکم بار را دارند. حضور چرخ دنده ها باعث می شود که این گشتاور بار به نسبت ضریب چرخ دنده ها کاهش یابد و به موتور وارد گردد که این مسئله خود کمک بزرگی برای کاهش بار روی موتورها است. گشتاور خروجی موتور به منزله گشتاور ورودی مفصل ها می باشد، بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{J_m}{r} \ddot{\theta} + \frac{B_m}{r} \dot{\theta} = \tau_m - r \tau_\ell \quad (۴-۳)$$

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) = \tau_\ell \quad (۵-۳)$$

با توجه به این که گشتاور ربات توسط موتورها تامین می‌گردد. عملاً در کنترل ربات تمامی سیگنال‌ها از جنس ولتاژ هستند، بنابراین معادله حرکت موتور را به فضای ولتاژ برده سپس با معادلات دینامیکی حرکت ربات تلفیق می‌کنیم. به طور معمول در ربات‌ها از موتورهای dc مغناطیس دائم استفاده می‌شود. در موتورهای dc مغناطیس دائم شار مغناطیسی مربوط به استاتور ثابت می‌باشد بنابراین گشتاور اعمالی به موتور که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\tau = k_m i \quad (۶-۳)$$

که در آن  $i$  جریان ورودی به موتور و  $k_m$  ثابت است.

این جریان توسط ولتاژ اعمالی به روتور ایجاد می‌شود. بنابراین با کنترل ولتاژ جریان را می‌توان کنترل کرده و با کنترل جریان گشتاور را کنترل می‌کنیم. رابطه بین ولتاژ و جریان موتور به صورت زیر است.

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + v_b \quad (۷-۳)$$

که در آن  $R$  مقاومت اهمی سیم پیچ روتور،  $L$  اندوکتانس سیم پیچ روتور و  $v_b$  ولتاژ ضد محرکه القایی<sup>۱</sup> است.

در موتور مغناطیس دائم  $v_b$  به سرعت موتور  $\omega$  وابسته است

$$v_b = k_b \omega = k_b \frac{d\theta_m}{dt} \quad (۸-۳)$$

که در آن  $k_b$  ثابت است.

حال معادلات (۴-۳) را بر حسب ولتاژ بازنویسی می‌کنیم.

$$\frac{J_{m_1}}{r_1} \ddot{\theta}_{m_1} + \frac{1}{r_1} \left( B_{m_1} + \frac{k_{m_1} k_{b_1}}{R_1} \right) \dot{\theta}_{m_1} = \frac{k_{m_1}}{r_1 R_1} v_1 - \tau_{\ell_1} \quad (۹-۳)$$

<sup>۱</sup> Back emf

$$r\theta_{m_1} = \theta_{\ell_1} \Rightarrow \theta_{m_1} = \frac{1}{r_1}\theta_{\ell_1} \quad (10-3)$$

که  $\theta_{\ell_1}, \dot{\theta}_{m_1}, \ddot{\theta}_{m_1}$  همگی پارامترهای موتور ۱ هستند و  $\theta_{\ell_1}$  میزان چرخش بعد از اعمال چرخ دنده است. در نتیجه دسته معادلات خروجی موتورها به صورت زیر می باشد

$$\begin{cases} \frac{J_{m_1}}{r_1^2}\ddot{\theta}_{\ell_1} + \frac{1}{r_1^2}\left(B_{m_1} + \frac{k_{m_1}k_{b_1}}{R_1}\right)\dot{\theta}_{\ell_1} = \frac{k_{m_1}}{r_1R_1}v_1 - \tau_{\ell_1} \\ \frac{J_{m_2}}{r_2^2}\ddot{\theta}_{\ell_2} + \frac{1}{r_2^2}\left(B_{m_2} + \frac{k_{m_2}k_{b_2}}{R_2}\right)\dot{\theta}_{\ell_2} = \frac{k_{m_2}}{r_2R_2}v_2 - \tau_{\ell_2} \\ \dots \\ \frac{J_{m_n}}{r_n^2}\ddot{\theta}_{\ell_n} + \frac{1}{r_n^2}\left(B_{m_n} + \frac{k_{m_n}k_{b_n}}{R_n}\right)\dot{\theta}_{\ell_n} = \frac{k_{m_n}}{r_nR_n}v_n - \tau_{\ell_n} \end{cases} \quad (11-3)$$

فرم ماتریسی معادلات خروجی موتورها:

$$\begin{bmatrix} \frac{J_{m_1}}{r_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{J_{m_n}}{r_n^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{\ell_1} \\ \vdots \\ \ddot{\theta}_{\ell_n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{r_1^2}\left(B_{m_1} + \frac{k_{m_1}k_{b_1}}{R_1}\right) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{r_n^2}\left(B_{m_n} + \frac{k_{m_n}k_{b_n}}{R_n}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{\ell_1} \\ \vdots \\ \dot{\theta}_{\ell_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_{m_1}}{r_1R_1}v_1 \\ \vdots \\ \frac{k_{m_n}}{r_nR_n}v_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tau_{\ell_1} \\ \vdots \\ \tau_{\ell_n} \end{bmatrix} \quad (12-3)$$

در نتیجه می توان معادلات را به فرم زیر نشان داد

$$J\ddot{q} + B\dot{q} = Kv - \tau_\ell \quad (13-3)$$

که در آن  $q$  بردار متغیرهای مفصلی است.

با توجه به معادله دینامیکی (۳-۵) و جایگذاری آن در معادله بالا خواهیم داشت :

$$J\ddot{q} + B\dot{q} = Kv - D(q)\ddot{q} - C(q, \dot{q})\dot{q} - F(\dot{q}) - G(q) \quad (۱۴-۳)$$

برای راحتی در ساده کردن معادلات می توان  $F(\dot{q})$  و  $C(q, \dot{q})$  را در هم ادغام کرده و با  $C'(q, \dot{q})$  نمایش دهیم. بنابراین داریم:

$$K^{-1}(J + D)\ddot{q} + K^{-1}(B + C')\dot{q} + K^{-1}G(q) = v \quad (۱۵-۳)$$

حال اگر تعریف کنیم

$$\begin{cases} M(q) = K^{-1}(J + D) \\ h(q, \dot{q}) = K^{-1}(B + C')\dot{q} + K^{-1}G \end{cases} \quad (۱۶-۳)$$

معادلات دینامیکی حرکت ربات با در نظر گرفتن دینامیک موتورها را می توان به صورت کلی زیر نوشت.

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = v \quad (۱۷-۳)$$



# فصل چهارم

## طراحی مسیر

ساده ترین نوع حرکت ربات، حرکت نقطه به نقطه است. در این روش به ربات فرمان داده می شود که از پیکر بندی اولیه  $T_0^{init}$  به پیکر بندی نهایی  $T_0^{final}$  برود بدون آنکه به مسیر دنبال شده توسط مجری نهایی در بین دو موقعیت توجه شود. این نوع از حرکت برای کارهای جابجایی مواد در وضعیتی که فضای کاری خالی از موانع باشد مناسب است و بطور معمول حالت آموزش و اجرا نامیده می شود که ربات با جعبه آموزش برای یک سلسله از حرکت ها آموزش می بیند. وضعیت های ربات ثبت می شوند و در حالت اجرا کار می کند. حرکت مفاصل در این طرح معمولاً غیر مختصاتی است اگر چه مفاصل شاید آنگونه به حرکت درآیند که آنها به موقعیت های نهایی خود بطور همزمان برسند. برای ربات هایی که بطور فیزیکی با جعبه آموزش در یک حرکت مورد نظر هدایت می شوند نیازی به محاسبه سینماتیک مستقیم و وارون نیست. حرکت مورد نظر بسادگی به صورت یک مجموعه از زوایای مفصلی ثبت می شود و ربات می تواند در فضای مفصلی به طور کامل کنترل شود. برای برنامه ریزی خارج خط با دادن مقادیر اولیه و نهایی موقعیت ها و جهت های مجری نهایی، سینماتیک وارون حل می شود تا مقادیر مورد نیاز اولیه و نهایی متغیر های مفصلی تعیین گردند. تصور کنید که پیکر بندی اولیه و نهایی ربات به صورت  $T_0^{init}$  و  $T_0^{final}$  تعیین شدند. برای یک ربات با مچ کروی شاید بتوانیم موقعیت و جهت را از هم جدا کنیم. حرکت اولین ۳ مفصل با محاسبه متغیر های مفصلی  $q_1, q_2, q_3$  مربوط به  $d_0^3$  و  $d_0^3$  محاسبه می شود. حرکت ۳ متغیر مفصلی آخر با محاسبه گروه زوایای اوپلر مربوط به  $R_3^{init}$  و  $R_3^{final}$  بدست می آیند. برای بعضی مقاصد نظیر جلوگیری از برخورد با مانع، مسیر مجری نهایی می تواند محدود شود به گونه ای که با اضافه نمودن نقاط بینابینی بین وضعیت های اولیه و نهایی این کار را انجام داد. مسئله تولید مسیر های هموار در فضای مفصلی را در اینجا با کمک توابع چند جمله ای زمانی بررسی می کنیم. به وسیله یک مسیر، توابع زمانی موقعیتها، سرعتها و شتابهای مفصلی را می توان ایجاد کرد. به عنوان مثال در اینجا دو نوع مسیر معروف درجه ۲ زمانی را که اصطلاحاً هم مسیر های سهموی گفته می شود بررسی می کنیم. این مسیر ها زمانی مناسب هستند که یک سرعت ثابت برای قسمتی از مسیر مورد نظر است که برای طراحی مسیر فضای دکارتی در کاربرد هایی همچون ربات های جوشکار

بسیار مناسب هستند زیرا انواع جوشکاری برای رسیدن به کیفیت جوش خوب با سرعت ثابت انجام می شود. در این گونه مسیر ها، سرعت در آغاز افزایشی است تا به مقدار معین در یک محدوده زمانی برسد، سپس در طی آن مسیری که باید سرعت حرکت ربات ثابت باشد، با همان سرعت ادامه می دهد سپس با سرعتی کاهشی به موقعیت هدف یا نهایی خود می رسد.

#### ۴-۱- مسیر های سهموی با قسمت سرعت ثابت

برای دستیابی به این هدف منحنی موقعیت مورد نظر دارای سه بخش است. اولین بخش از زمان  $t_0$  تا  $t_b$  است که یک چند جمله ای درجه دو خواهد بود که سرعت خطی افزایشی را نتیجه می دهد. از زمان  $t_b$  تا زمان  $t_f - t_b$  یک تابع خطی را خواهیم داشت که سرعت ثابت را نتیجه می دهد و از زمان  $t_f - t_b$  تا  $t_f$  یک چند جمله ای از درجه دو خواهیم داشت که سرعت خطی کاهشی را نتیجه می دهد که باعث می شود مجری نهایی در موقعیت انتهایی خودش متوقف شود. معمولاً در محاسبه این گونه مسیر ها نیاز به شرط های اولیه ای داریم که به صورت زیر هستند [۳۵].

موقعیت های اولیه و نهایی

$$P(t_0) = P_0 \quad (۱-۴)$$

$$P(t_f) = P_f \quad (۲-۴)$$

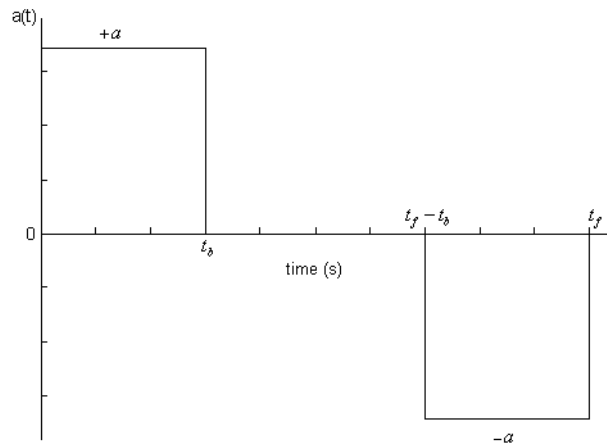
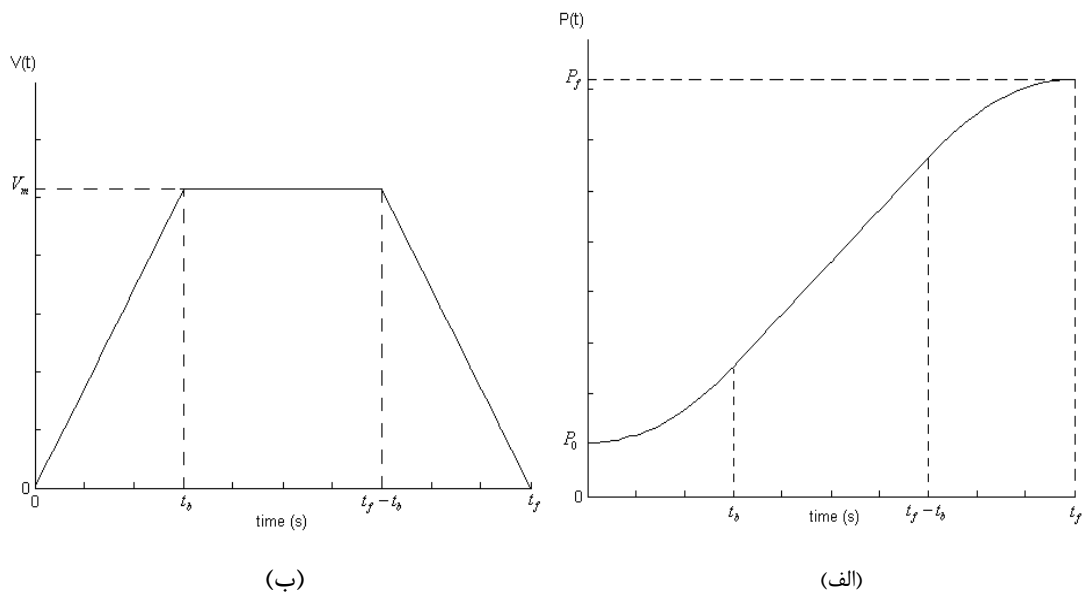
سرعت های اولیه و نهایی و سرعت حداکثری که باید به آن برسد.

$$\dot{P}(t_0) = V(t_0) = 0 \quad (۳-۴)$$

$$\dot{P}(t_f) = V(t_f) = 0 \quad (۴-۴)$$

$$\dot{P}(t_b) = \dot{P}(t_f - t_b) = V_m \quad (۵-۴)$$

البته بسته به شرایط طراحی مسیر، تعداد شرایط اولیه می تواند اضافه یا کم شود معمولاً هم  $t_0 = 0$  فرض می شود. در شکل (۱-۴) به طور شهودی مشاهده می کنید.



شکل (۱-۴) منحنی مسیر های سهموی، (الف) منحنی موقعیت، (ب) منحنی سرعت، (ج) منحنی شتاب

در نهایت رابطه ریاضی توصیف کننده این دسته از مسیر ها به صورت زیر می باشد.

$$P(t) = \begin{cases} P_0 + \frac{a}{2} t^2 & 0 \leq t < t_b \\ (P_0 - \frac{a}{2} t_b^2) + at_b t & t_b \leq t < t_f - t_b \\ (P_0 - \frac{a}{2} t_f^2) + at_f t - \frac{a}{2} t^2 & t_f - t_b \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (۴-۶)$$

با محدودیت های زیر

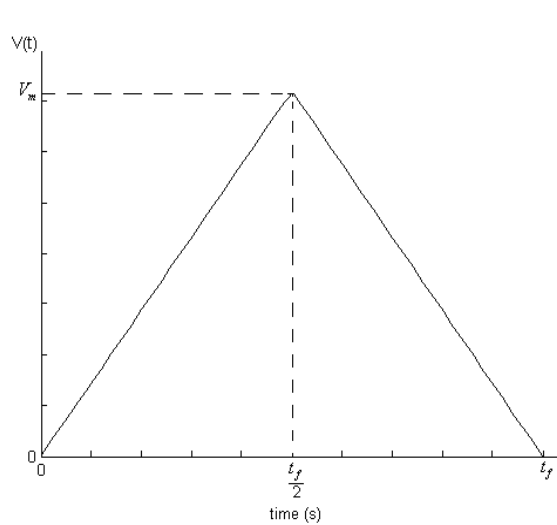
$$\begin{cases} V_m = at_b \\ P_f - P_0 = at_b(t_f - t_b) \\ t_f > 2t_b \end{cases} \quad (7-4)$$

که در آن  $a$  شتاب ثابت حرکت است.

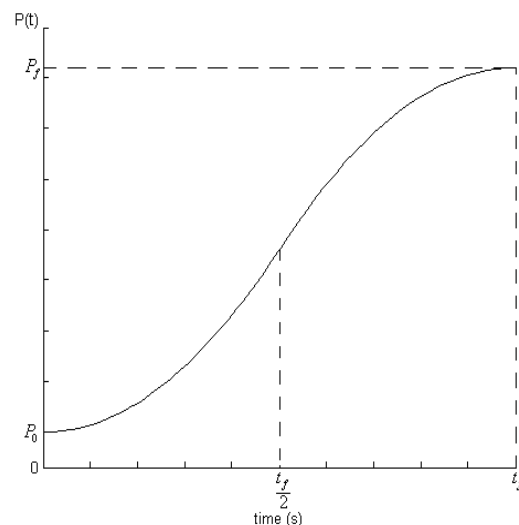
در طراحی این گونه مسیر ها عملاً کافی است تا شتاب حرکت را که در هر دو موقعیت سرعت افزایشی و کاهششی یکسان ولی با علامت قرینه را پیدا کنیم (چرا که اصولاً سعی می شود تا افزایش و کاهش سرعت با یک شتاب صورت گیرد مگر بسته به شرایط این حالت صادق نباشد) سپس با دوبار انتگرال گیری مسیر موقعیت مطلوب را بدست می آوریم.

#### ۴-۲- مسیر های با کمترین زمان

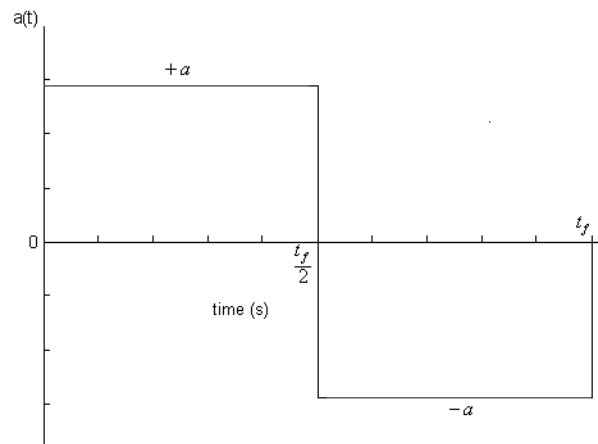
ویژگی مهم این مسیر عدم تعیین زمان و توجه به سریعترین مسیر بین  $P_0$  و  $P_f$  با شتاب ثابت و معین  $a$  است که در آن زمان نهایی  $t_f$  حداقل می شود. این مسیر گاهی اوقات مسیر بنگ-بنگ نامیده می شود زیرا پاسخ بهینه با بیشترین شتاب در مقدار  $+a$  بدست می آید تا اینکه در زمان کلید زنی مناسب  $t_s$  بطور یک مرتبه به مقدار حداقل  $-a$  برسد و تا زمان  $t_f$  ادامه خواهد داشت. معمولاً برای داشتن سریع ترین مسیر  $t_s = \frac{t_f}{2}$  انتخاب می شود.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل (۳-۴) منحنی مسیرهای با کمترین زمان، (الف) منحنی موقعیت، (ب) منحنی سرعت، (ج) منحنی شتاب

با همان شرایط اولیه بالا روابط ریاضی توصیف کننده این مسیر به صورت زیر می باشد.

$$P(t) = \begin{cases} P_0 + \frac{a}{2} t^2 & 0 \leq t \leq \frac{t_f}{2} \\ \left(\theta_f - \frac{a}{2} t_f^2\right) + at_f t - \frac{a}{2} t^2 & \frac{t_f}{2} \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (۸-۴)$$

با محدودیت های

$$\begin{cases} V_s = a \frac{t_f}{2} = V_m \\ P_f - P_0 = \frac{V_s t_f}{2} \end{cases} \quad (۹-۴)$$

### ۳-۴- مسیرهای دکارتی

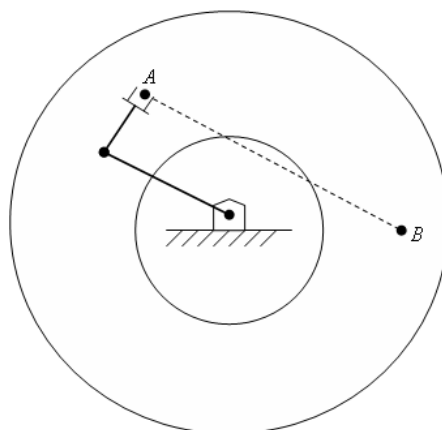
مسیرهای فضای مفصلی نقطه اولیه و نهایی خود را از طریق سینماتیک وارون نقاط اولیه و نهایی فضای دکارتی بدست می آورند، بنابراین می توانند این نقاط را حتما طی کنند ولی شکل فضایی مسیر طی شده در فضای دکارتی به وسیله مجری نهایی، دارای شکلی پیچیده می باشد که به سینماتیک خاص بازوی مکانیکی ماهر مورد نظر بستگی دارد. بنابراین برای تولید مسیرهای دکارتی به خصوص مسیرهای خط راست یا دایره ای و غیره باید توابع زمانی بر حسب متغیرهای دکارتی تولید کرد. مثلا برای تولید یک خط راست در فضای دکارتی در صفحه، به راحتی

می توان از همان مسیر های درجه ۲ برای متغیر  $x$  و  $y$  مجری نهایی استفاده کرد البته باید توجه کرد که زمان طی مسیر برای هر ۲ متغیر باید یکسان باشد تا در صفحه خط راست ایجاد شود.

### ۳-۴-۱- مشکلات هندسی مسیر های دکارتی

از آنجا که بین مسیر فضای دکارتی و فضای مفصلی، تناظری پیوسته برقرار می شود، در مسیر های دکارتی مشکلات گوناگونی در ارتباط با فضای کار و نقاط تکین ایجاد می شود. در کل مشکلات طراحی مسیر در فضای دکارتی را می توان به سه دسته تقسیم کرد. ۱- نقاط بینابینی غیر قابل دسترس ۲- سرعت زیاد مفاصل در نزدیکی نقاط تکین ۳- عدم دسترسی به نقاط شروع و هدف از طریق جوابهای مختلف.

در مورد اول می توان گفت که بعضی مواقع به دلایل ساختاری مثلا کوچک بودن طول یک رابط نسبت به رابط دیگر طی کردن یک خط راست بین دو نقطه که در فضای کاری ربات قرار دارد (مانند  $A$  و  $B$  در شکل (۳-۴)) ولی بعضی نقاط بین این خط خارج از فضای کاری ربات قرار می گیرد و ربات قادر به طی کردن مسیر بین دو نقطه از طریق آن خط راست را نمی باشد.



شکل (۳-۴) نقاط بینابینی غیر قابل دسترس

در مورد دوم که در نقاط تکین به ازاء سرعت دلخواه در فضای دکارتی، نمی توان سرعت مفصلها را متناسب با آن بدست آورد و سرعت مفاصل به بینهایت میل می کند. این مشکل به دلیل عدم وجود یک رابطه یک به یک بین سرعت های مفصلی و دکارتی می باشد. بنابراین بازوی ماهر نمی تواند در بعضی مسیر های خاص در فضای دکارتی، گرچه در فضای کاری اش است، حرکت کند. بنابراین باید در طراحی مسیر دکارتی به عبور از نقاط تکین توجه داشت و مسیر را جوری طراحی کرد که اگر مجبور به عبور از نقاط تکین شدید حتما سرعت مجری نهایی در آن نقاط به صفر رسیده باشد.

در مورد سوم هم به دلایل ساختاری در بعضی مواقع با توجه با این که بنابه سینماتیک وارون ربات قادر است که مسیر بین دو نقطه خاص را از چند مسیر متفاوت طی کند اما محدودیت های حرکتی مفاصل در ساخت ربات،

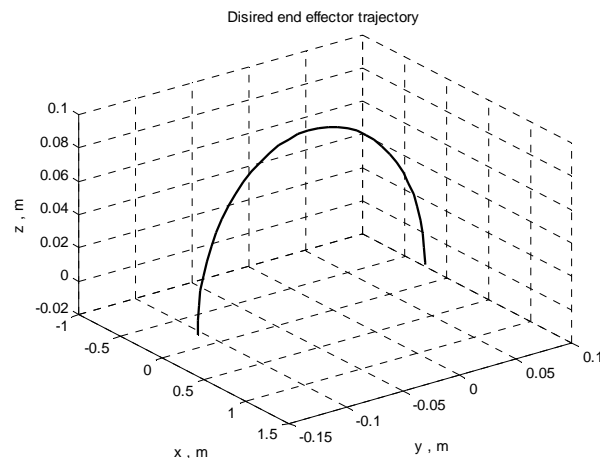
این اجازه را به آن ندهد که بتواند در تمام آن مسیر ها حرکت کند. این مشکل به ویژه هنگامی روی می دهد که ربات نتواند با همان وضعیت فیزیکی شروع حرکت، به نقطه هدف برسد.

#### ۲-۳-۴- طراحی مسیر دکارتی نمونه

انواع مسیرهایی که ربات اسکارا ضمن ردگیری مسیر قادر به جوشکاری می باشد عبارتند از:

- خط راست که در [۱۹] به عنوان مسیر جوشکاری مد نظر قرار گرفته شده است.
- دایره در صفحه که در زیر به عنوان مسیر نمونه طراحی می شود [۴۳].
- مسیر نیم دایره عمودی که در شکل (۴-۴) آورده شده است.

انجام جوشکاری بر روی یک شکاف به چهار مرحله تقسیم می شود [۳۸]. مرحله اول ربات باید از محل استقرار خود (Home) به سمت نقطه شروع بیاید. در مرحله دوم با یک حرکت شتابدار خود را باید به سرعت مطلوب در ابتدای شروع مسیر جوشکاری برساند. سپس در مرحله سوم بعد از آنکه به سرعت مطلوب رسید، جوشکاری آغاز می شود که در تمام طی انجام جوشکاری ربات باید با سرعت ثابت حرکت کند تا به انتهای مسیر جوش برسد. در مرحله چهارم که جوشکاری تمام می شود ربات باید بعد طی مسیری کوتاه سرعت خود را به صفر برساند.



شکل (۴-۴) مسیر منحنی نیم دایره ای در فضای دکارتی

برای داشتن یک مسیر دایره ای در فضای سه بعدی، بسته به اینکه مرکز دایره را روی کدام محور تنظیم می کنیم کافی است که دو تا از سه متغیر دکارتی به صورت توابع سینوسی و کوسینوسی تعریف شوند. این گونه مسیر ها می تواند به طور مثال مسیر جوشکاری دور یک لوله باشد که رباتی همچون اسکارا قابلیت طی کردن این مسیر را دارد. بسته به مشخصات فلز تحت جوش، قطر و جنس الکتروود و فشار گاز محافظ سرعت حرکت انبر جوش می تواند در رنج (۳۰-۵) mm/s تغییر کند [۳۱، ۳۷]. بنابراین کنترل کننده حلقه خارجی در سیستم کنترل جوشکاری

رباتیکی بسته به خطای موجود در حرارت و شکل هندسی دانه های جوش سرعت مطلوب حرکت انبر جوش  $R$  را در رنج بیان شده تعیین می کند. با توجه به اینکه در این پایان نامه کنترل سرعت و موقعیت مجری نهایی ربات که انبر جوش را حمل می کند مد نظر است، بنابراین فرض می کنیم مسیر نمونه طراحی شده در زیر همان مسیر مطلوب تعیین شده توسط کنترلر حلقه خارجی می باشد.

مسیر دایره ای انتخاب شده در صفحه  $x-y$  از فضای کاری ربات به مرکز  $C=(0.2, 0.15)$  m و شعاع  $r=0.05$  m قرار دارد. سرعت حرکت مطلوب  $R=25$  mm/s در نظر گرفته شده است. بنابراین سرعت حرکت دورانی بر روی دایره از طریق رابطه  $\omega = R/r$  برابر  $0.5$  rad/s بدست می آید. با انتخاب مسیر مطلوب در جهت  $x$  و  $y$  به صورت زیر

$$0 \leq t \leq 6\pi, \begin{cases} x(t) = 0.05\cos(\theta(t)) + 0.15 \\ y(t) = 0.05\sin(\theta(t)) + 0.2 \end{cases} \quad (10-4)$$

مشاهده می شود  $\theta(t)$  باید به صورت مسیر سهموی با قسمت سرعت ثابت برابر  $0.5$  rad/s طراحی شود تا مراحل طی مسیر جوشکاری را برآورده سازد. در اینصورت فرض می کنیم ربات در لحظه صفر بر روی دایره در مختصات  $(0.2, 0.2)$  m قرار دارد و بعد از طی  $45^\circ$  در مختصات  $(0.236, 0.186)$  با رسیدن به سرعت مطلوب جوشکاری آغاز می شود. سپس بعد از پایان جوشکاری در همان مختصات شروع، ربات طی مسیر  $45^\circ$  در مختصات  $(0.25, 0.15)$  متوقف می شود. بنابراین  $\theta(t)$  به صورت زیر بدست می آید.

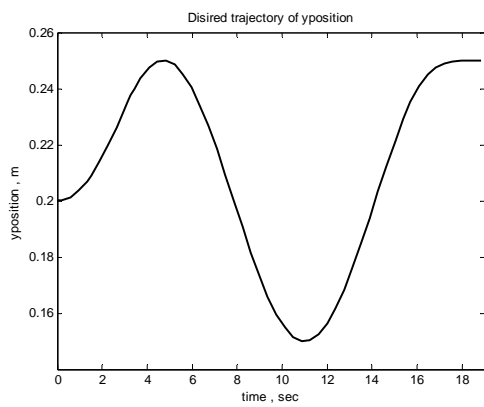
$$\theta(t) = \begin{cases} (0.25/\pi)t^2 & 0 \leq t \leq \pi \\ -\pi/4 + 0.5t & \pi \leq t \leq 5\pi \\ -6.5\pi + 3t - (0.25/\pi)t^2 & 5\pi \leq t \leq 6\pi \end{cases} \quad (11-4)$$

برای طراحی مسیر در جهت  $z$  فرض می کنیم که مفصل سوم ربات در مدت  $1.5$  ثانیه به صورت یک مسیر سهموی با کمترین زمان به موقعیت مطلوب نسبت به دستگاه مختصات پایه ربات در  $0.45$  m برسد.

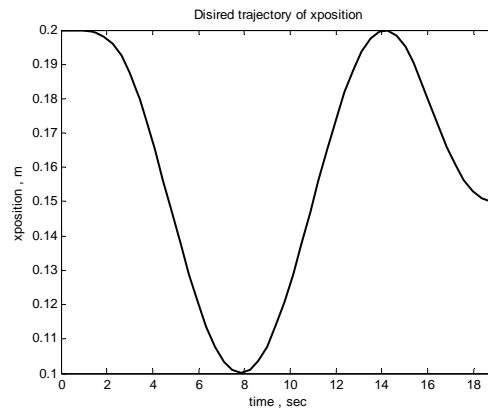
$$z(t) = \begin{cases} 0.5 - 0.0111t^2 & 0 \leq t \leq 1.5 \\ 0.5499 - 0.0666t + 0.0111t^2 & 1.5 \leq t \leq 3 \\ 0.45 & 3 \leq t \leq 6\pi \end{cases} \quad (12-4)$$

در شکل‌های (۴-۵) و (۴-۶) مسیرهای نمونه طراحی شده در فضای دکارتی و مسیرهای مفصلی متناظر نمایش داده شده است.

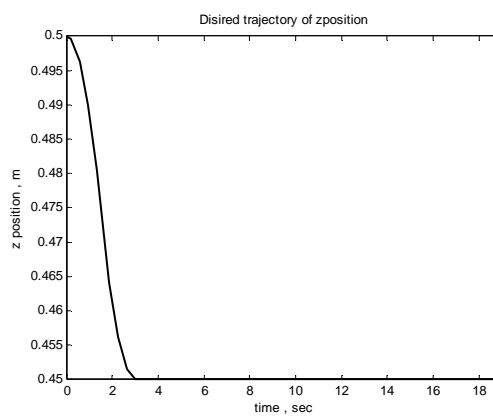




(ب)



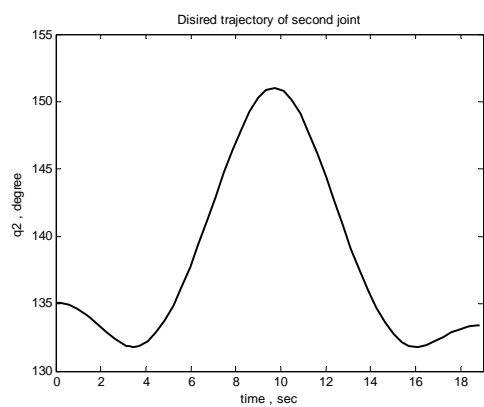
(الف)



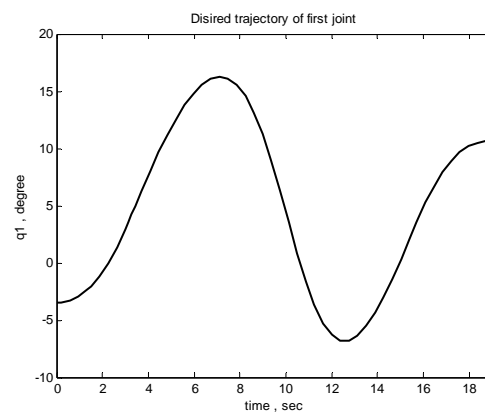
(ج)

شکل (۴-۵) منحنی حرکت برای مسیر دایره ای، (الف) بر روی محور X، (ب) بر روی محور Y، (ج) بر روی محور Z

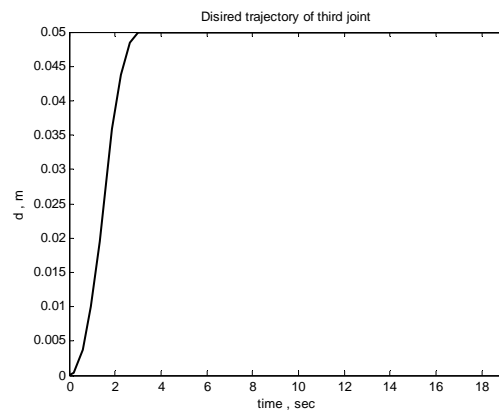
مسیر های مفصلی برای ربات اسکارا



(ب)



(الف)



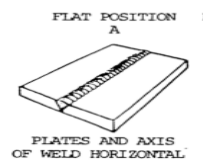
(ج)

شکل (۴-۶) منحنی موقعیت برای مسیر دایره ای، (الف)  $\theta_1$ ، (ب)  $\theta_2$ ، (ج)  $d$

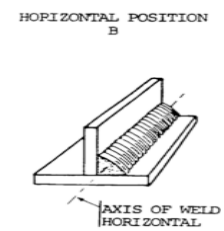
بنابراین برای جوشکاری های رباتیک شکاف هایی از نوع صفحات افقی در شکل (۴-۷-ب) ، صفحات گوشه ای<sup>۱</sup> در شکل (۴-۷-الف) و جوشکاری دور لوله در شکل (۴-۷-ج) توسط ربات اسکارا به راحتی قابل انجام است.



(ج)



(ب)



(الف)

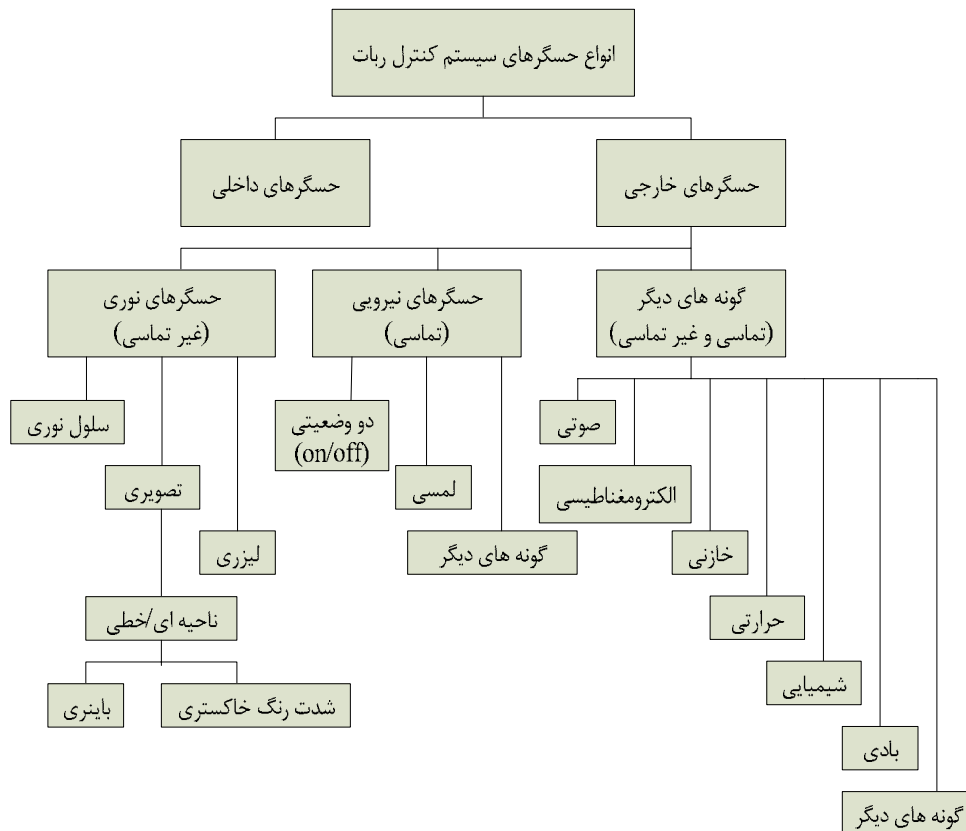
شکل (۴-۷) انواع سطح قابل جوشکاری برای ربات اسکارا، (الف) گوشه ای، (ب) مسطح، (ج) دایره ای

<sup>1</sup> Fillet Weld

# فصل پنجم

## حسگرهای<sup>۱</sup> مورد استفاده در ردیابی شکاف

باید به نیازمندی های اندازه گیری در فرآیند جوشکاری توجه شود. در نمودار (۱-۵) انواع حسگرهای سیستم کنترل ربات را در یک کلاسه بندی کلی مشاهده می کنید، که از این میان به بررسی حسگرهایی که در جوشکاری رباتیک به کار می روند می پردازیم.



شکل (۱-۵) انواع حسگرهایی که در ساختمان ربات به کار می رود

<sup>1</sup> Sensores

امروزه از حسگرها مختلفی در ردیابی شکاف در جوشکاری استفاده می شود، حسگرهای ردیابی شکاف در سیستمهای جوشکاری اتوماتیک به دو نوع تماسی و غیر تماسی دسته بندی می شوند. حسگر جوشکاری نمی تواند فرآیند جوشکاری را بهبود بخشد، بلکه تنها می تواند انبر جوش را در مسیر صحیح با شکاف هم محور کند. سپس با تنظیم دیگر پارامترهای جوش می توانیم به یک جوش با کیفیت دست پیدا کنیم. بهترین روش در جوشکاری قوس الکتریکی رباتیک روشی است که در آن ربات بتواند جوشهای بدون نقصی را در فرآیند ایجاد کند. اولین قدم در رسیدن به این هدف قرار گرفتن انبر جوش در جای درست می باشد. انجام این کار نیازمند اندازه گیری دقیق شکاف است. حال به بررسی حسگرهایی می پردازیم که در رسیدن به این هدف کارایی سیستم را بهبود می بخشد. حسگرهای جوشکاری رباتیک در کل به دو دسته حسگرهای تماسی و غیر تماسی تقسیم بندی می شوند حسگرهای تماسی<sup>۱</sup> برای ردیابی کردن شکاف به کار نمی روند و قبل از شروع جوشکاری کار خود را به اتمام می رسانند. استفاده از حسگرهای تماسی به این صورت است که ربات به وسیله الکتروود یا یک اشاره گر و با استفاده از تماسی که با قطعه کار برقرار می کند شکاف را پیدا می کند. بدین وسیله ربات به مکان شکاف آگاهی پیدا می کند. سپس ربات با توجه به یک الگوریتم خاص، انبر جوش را در مکان صحیح قرار می دهد. این روش گاهی نیز برای پیدا کردن اغتشاشات شکاف به کار می رود، بنابراین ربات می تواند ملزومات مورد استفاده برای غلبه بر اغتشاش را از جدول کنترلی کمکی که به همین منظور در اختیار دارد استخراج کند. به این ترتیب ربات می تواند با وجود اغتشاش، کیفیت جوش را در حد مطلوب نگاه دارد. استفاده از حسگرهای تماسی روش ارزان قیمتی می باشد که بزرگترین مزیت آن سادگی پیاده سازی آن است. در استفاده از این روش، شکاف باید دارای لبه باشد و ضخامت ورقه ای که در جوشکاری استفاده می شود نباید کمتر از ۲ mm باشد. در حسگر غیر تماسی همانطور که از نامش پیداست، ربات برای ردیابی و اندازه گیری پارامترهای لازم نیازی به تماس با سطح جوشکاری ندارد. از انواع حسگرهای غیر تماسی می توان به موارد زیر اشاره کرد

- ۱- حسگرهای TAST<sup>۲</sup>
- ۲- حسگرهای AVC<sup>۳</sup>
- ۳- حسگرهای القایی<sup>۴</sup>
- ۴- حسگرهای تصویری بر پایه لیزر<sup>۵</sup>

<sup>1</sup> Touch sensor

<sup>2</sup> Through arc seam tracking

<sup>3</sup> Arc voltage control

<sup>4</sup> Inductive sensor

<sup>5</sup> Vision based laser sensor

- ۵- حسگرهای نوری<sup>۱</sup>  
 ۶- حسگرهای صوتی<sup>۲</sup>  
 ۷- حسگرهای تصویری<sup>۳</sup>

حسگرهای غیر تماسی نیز تمام نیازهای ربات جوشکار را برای داشتن یک جوشکاری کاملاً اتوماتیک برآورده نمی‌کند [۶۰] و باید به مسائل از قبیل نوع، توانایی‌های آن و محیطی که حسگر در آن کار می‌کند توجه کرد. وضعیت شکاف جوش در طی جوشکاری به علت خطای نوار نقاله، محیط خشن جوشکاری و غیره به هم می‌خورد و همواره در سر جای از پیش تعیین شده خود قرار نمی‌گیرد. اگر ربات توانایی دیدن این خطای ایجاد شده در شکاف جوش را نداشته باشد، جوش بسیار ضعیف خواهد بود. بنابراین پیاده‌سازی الگوریتمی که ربات در طی انجام عمل جوشکاری بتواند این خطا را حس کرده و در زمان واقعی سعی در رفع آن کند از اهمیت ویژه‌ای در بهبود کیفیت جوش برخوردار است. به منظور انتخاب الگوریتم مناسب، یک متخصص به ناچار باید با انواع حسگرهای مورد استفاده در جوشکاری، مزایا و معایب هر یک از آنها آگاهی کامل داشته تا بتواند بسته به شرایط بهترین الگوریتم و بهترین حسگر را برای یک سیستم جوشکاری اتوماتیک انتخاب کند. پاره‌ای از این اطلاعات در جدول (۱-۵) آورده شده است تا ما بتوانیم در شرایط مختلف حسگر مورد نظر خود را انتخاب کنیم. برای جوشکاری انواع شکاف ما می‌توانیم نیازمندیهای تنظیم پارامترها را در یک RPM کارت ذخیره کرده و بعد در جوشکاری شکاف مورد نظر از این اطلاعات به صورت خارج خط استفاده کنیم، یعنی حسگر مورد استفاده را از مدار خارج کرده و از اطلاعات RPM کارت برای کنترل ربات استفاده کنیم. اکنون به بررسی انواع روشهای مختلف ردیابی و اصلاح پارامترهای جوش که در مقالات مختلف علمی به آنها پرداخته شده می‌پردازیم.

## TAST-۱-۵<sup>۴</sup>

یکی از روشهای ارزان برای دنبال کردن شکاف جوش می‌باشد که به تنها سخت‌افزاری که نیاز دارد یک حسگر جریان می‌باشد، به علت شیوه خاصی که این روش در ردیابی شکاف دارد، حسگر جریان مورد استفاده قرار گرفته در این روش به این نام شهرت پیدا کرده است. در این روش ربات جوشکار دارای یک برنامه نرم‌افزاری مخصوص بوده تا بتواند جریان فیدبک شده را تفسیر کرده و موقعیت مناسب انبر جوش را تعیین کند. ردیابی شکاف به روش TAST یا همان اندازه‌گیری قوس الکتریکی از سال ۱۹۸۰ شروع شد [۳۸]، در این روش از تغییرات عمودی طول قوس (حرکت رفت و برگشت روی شکاف، یا چرخاندن انبر جوش روی شکاف) که منجر به تغییر جریان جوشکاری می‌شود برای بدست آوردن مکان انبر جوش استفاده می‌شود. از این روش می‌توان برای استخراج

<sup>1</sup> Light sensor

<sup>2</sup> Acoustic sensor

<sup>3</sup> Vision sensor

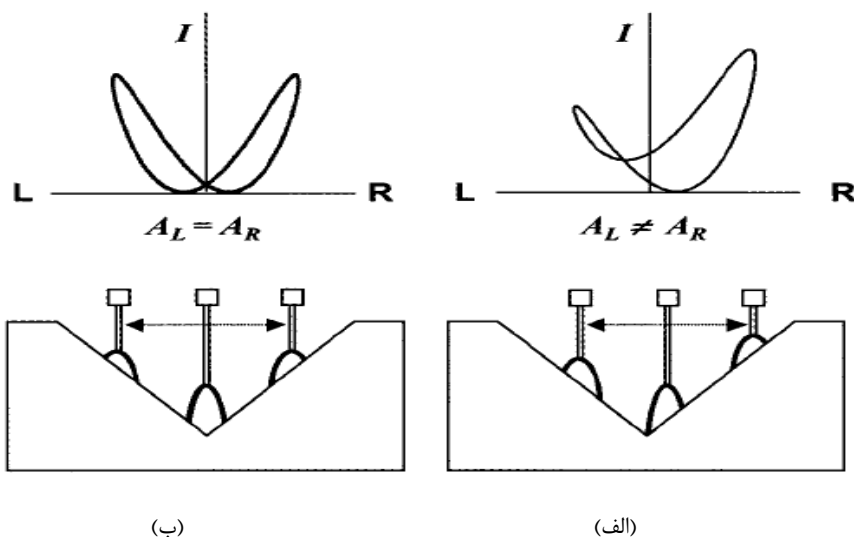
<sup>4</sup> Through Arc Seam Tracking

:  
 خصوصیات فیزیکی قطعه کار نیز استفاده کرد. اصولاً TAST یکی از روشهای کم هزینه برای ردیابی شکاف جوش می باشد.

جدول (۱-۵) انتخاب بهترین حسگر بسته به شرایط

|                       | TAST  | AVC                                   | لیزر                | تماسی                       |
|-----------------------|---|---------------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| پیدا کردن شکاف        | خیر   | خیر                                   | بله                 | بله                         |
| ردیابی شکاف           | بله   | بله                                   | بله                 | خیر                         |
| قابلیت تطبیق          | بله   | خیر                                   | بله                 | محدود                       |
| نوع شکاف              | لبه دار ، گوشه ای ، مسطح ، شیاردار                              | لبه دار ، گوشه ای                     | تمامی انواع         | لبه دار ، گوشه ای ، شیاردار |
| نوع مواد              | تمامی انواع فولاد   | تمامی انواع فولاد ، آلومینیوم         | بدون انعکاس         | تمامی انواع                 |
| مینیمم لبه شکاف       | ۲ mm  | ۴mm                                   | ۰.۸ mm              | ۲mm                         |
| سیکل کاری             | ندارد   | ندارد                                 | ۱ ثانیه در هر جستجو | ۱.۵ ثانیه در هر جستجو       |
| نگهداری تجهیزات (۱-۵) | ۴   | ۳                                     | ۳                   | ۱                           |
| سختی برنامه نویسی     | ۴   | ۳                                     | ۴                   | ۲                           |
| انواع جوشکاری         | قوس الکتریکی در پناه گاز پالسی ، قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ | قوس الکتریکی تنگستن در پناه گاز محافظ | اکثر انواع جوشکاری  | اکثر انواع جوشکاری          |

با توجه به اینکه تغییر در میزان بیرون آمدگی الکتروود<sup>۱</sup> با طول قوس و جریان رابطه تناسبی معکوس دارد این روش با مشاهده فیدبک جریان قوس، می تواند فاصله افقی انبر جوش از قطعه کار<sup>۲</sup> را برای ثابت ماندن میزان بیرون آمدگی الکتروود تنظیم کند.



شکل (۵-۲) مانیتور جریان نسبت به طول قوس، (الف) هنگامی که انبر جوش از مسیر خود خارج شده، (ب) هنگامی که انبر جوش در مسیر درست حرکت می کند [۳۹]

به علت سخت و خشن بودن محیط جوشکاری سیگنال جریان فیدبک گرفته شده شامل نویزهای فراوانی می باشد که این نویزها تفسیر ربات از روی سیگنال بازگشتی را دچار مشکل می کنند. بنابراین باید آنها را فیلتر کرد. با انجام این فیلترینگ و بدست آوردن الگوریتم خاصی برای کار با اطلاعات فیدبک، روش TAST توانای ردیابی کردن شکاف هایی با ضخامت کمتر از ۲ mm را با سرعت ۵۵ اینچ بر دقیقه دارد. در روشهای مرسوم استفاده های گوناگونی از انواع حسگرهای طول قوس می شود، گستره استفاده از حسگرهای طول قوس بسته به نوع شکافی که باید جوش داده شود و نیز ضخامت صفحه های که باید جوش شوند محدود می شود. بنابراین در جوشکاری های خاص نیاز به انواع الگوریتمهای مختلف برای ردیابی کردن شکاف در جوشکاری احساس می شود. در این راستا حسگرهای گوناگونی طراحی و معرفی شده اند.

در مقاله [۴۰] از این روش برای حرکت انبر جوش در مسیر صحیح بر روی یک شکاف گوشه ای<sup>۳</sup> استفاده شده است. بر خلاف کارهای گذشته که بدون در نظر گرفتن نویز حسگر سعی در کاهش خطا می کردند، در این مقاله نویسندگان با در نظر گرفتن نویز با استفاده از یک الگوریتم فازی خطا را به حداقل می رسانند. همچنین با استفاده از نتایج آزمایشگاهی نشان می دهند که الگوریتم فازی پیاده سازی شده در برابر اغتشاشات می تواند به

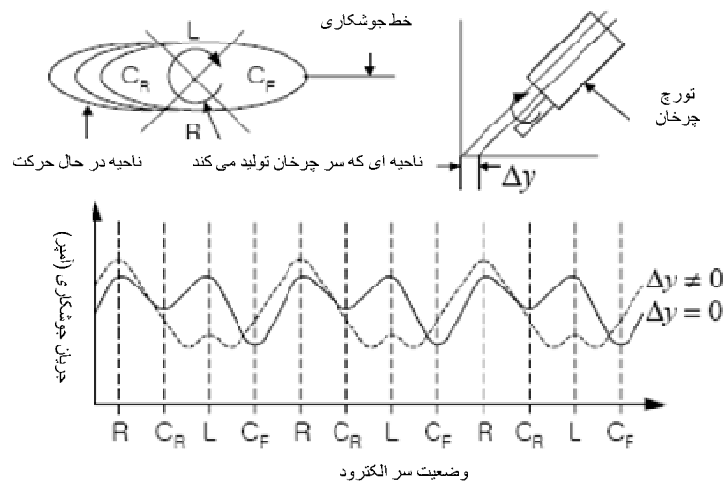
<sup>۱</sup> Stick-out

<sup>۲</sup> Contact tube

<sup>۳</sup> Corner

صورت مقاوم عمل کند. روش TAST دارای انواع گوناگونی می باشد که در کار بردهای مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. در این مقاله از چرخاندن سریع انبر جوش توسط یک موتور DC برای ردیابی شکاف استفاده می شود. به صورتی که در شکل (۲-۵) مشاهده می کنید، ناحیه ای که طی یک بار چرخاندن انبر جوش تحت پوشش قرار می گیرد را به چهار ناحیه تقسیم می شود، راست، چپ، جلو و عقب با توجه به شکل مشاهده می شود که با مانیتور کردن جریان در هر یک از چهار ناحیه، جریان میانگین در هر یک از چهار ناحیه را محاسبه می شود و اختلاف مقادیر محاسبه شده در ناحیه چپ و راست و بالا و پایین به عنوان خطا در نظر گرفته می شود و با استفاده از یک کنترلر PID سعی در رساندن منحنی جریان به منحنی مطلوب (هنگامی که انبر جوش دقیقاً در وسط شکاف قرار داشته باشد) می شود. هنگامی که این عمل صورت گیرد ربات دقیقاً بر روی شکاف قرار گرفته است.

یک مزیت مهم استفاده از حسگر قوس الکتریکی این است که این حسگر به صورت یک سیستم در بالای انبر جوش قرار گرفته و احتیاجی به مشاهده گر در اطراف محل جوشکاری ندارد، بنابراین گرما و نور شدید قوس بر روی آن تأثیری ندارد. به دلیل اینکه حسگرهای طول قوس نیاز به یک حرکت رفت و برگشت در طول شکاف دارند و نیز فرکانس حرکت آنها نمی تواند از یک حدی بزرگتر باشد و جوشکاری با سرعت نسبتاً پایینی انجام می شود، به کار گیری این نوع حسگرها در جوشکاری گوشه ای و ورقه های نازک مشکل می باشد. با این وجود در مقاله ذکر شده با توسعه روش TAST بر روی یک شکاف گوشه ای پیاده سازی شده است.



شکل (۳-۵) چهار ناحیه ای که در یک دور چرخش انبر جوش به وجود می آید

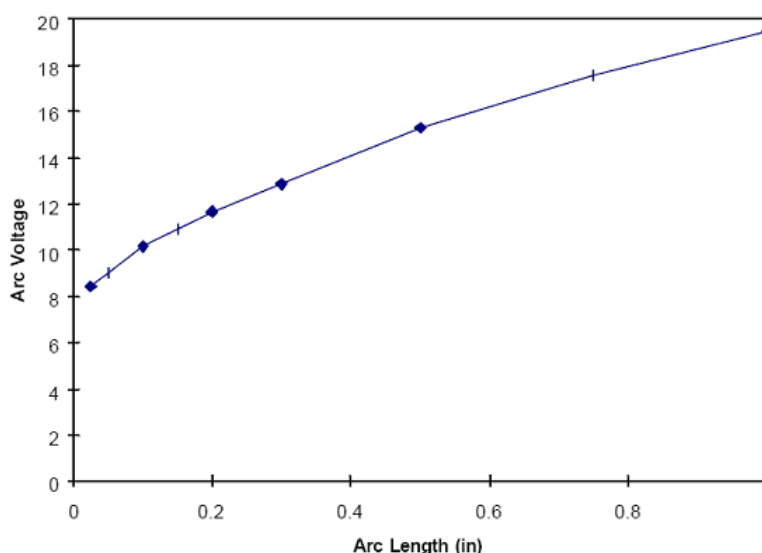
در اینجا زاویه کار در یک زاویه درست قرار می گیرد انحراف افقی انبر جوشکاری و زاویه کار توسط حسگر وضعیت چرخان، اندازه گیری می شود. حسگر وضعیت چرخش، از چهار دیود نوری که در یک صفحه دایره ای قرار گرفته اند تشکیل شده است. که نحوه عملکرد این حسگر را می توانید در مقاله مذکور مطالعه کنید. در این مقاله با توسعه سرعت چرخش انبر جوش و رساندن آن به فرکانسی در رنج ۲۵-۵۰ HZ، جریان با سرعت بالاتری تغییر می کند،



بنابراین می تواند به دقت بالاتری دست پیدا کند. روش ارائه شده در این مقاله این امکان را فراهم آورده که بتوانیم از حسگر قوس الکتریکی حتی در جوشکاری سطح لبه دار<sup>۱</sup> و گوشه ای بر روی ورقه های نازک استفاده کنیم و به کیفیت جوش خوبی دست پیدا کنیم. این مقاله برای فیلتر کردن نویز سیگنال جریان از یک فیلترینگ نرم افزاری بر پایه پردازش تصویر استفاده کرده است.

## ۵-۲- AVC

روش AVC نیز روشی ارزان قیمت می باشد و به تنها سخت افزاری که احتیاج دارد یک حسگر ولتاژ و یک نرم افزار واسط می باشد، حسگر ولتاژ مورد استفاده می تواند با جریان ثابت و یا پالسی کار کند. وقتی از جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن در پناه گاز محافظ<sup>۲</sup> استفاده می کنیم، با توجه به اینکه ولتاژ جوش به طور مستقیم با طول قوس به صورتی که در شکل (۴-۵) مشاهده می کنید متناسب است. در این روش از همان اصل استفاده شده در TAST استفاده می کنیم با این تفاوت که این بار به جای مشاهده کردن جریان، ولتاژ جوشکاری مشاهده می شود. به دلیل حساسیت کمتری که در سیگنال فیدبک وجود دارد AVC را می توان در ردیابی شکاف در سطوح عمودی نیز به کار برد، اما در عمل از AVC در ردیابی شکاف افقی استفاده می شود. AVC نیز مانند TAST تنظیم پیچیده ای دارد. اگر فرآیند قوس الکتریکی تنگستن در شکاف عمودی انجام شود و سیستم تغذیه سیم استفاده نشود، تنظیم پارامترهای AVC به طور عمده ای کاهش پیدا می کند و ساده تر می شود. بنابراین تنظیم پارامترهای AVC بستگی به پارامترهای جوش مورد استفاده دارد که این پارامترها قبل از شروع جوشکاری باید تنظیم شوند.



شکل (۴-۵) منحنی ولتاژ قوس نسبت به طول قوس

<sup>1</sup> Lab

<sup>2</sup> Gas tungsten arc welding (GTAM)

### ۳-۵- سیستمهای لیزری<sup>۱</sup>

هنگامیکه نوع فلز یا شرایط فرآیند وضعیتی را فراهم می آورد که استفاده از حسگر قوس الکتریکی برای ردیابی کردن شکاف در عمل ممکن نباشد، می توانیم از حسگرهای نصب شونده روی بدنه ربات و یا در کنار آن استفاده کنیم. یکی از حسگرهای خارجی مورد استفاده حسگر لیزری می باشد که تطبیق پذیری خوبی را برای ربات در ردیابی کردن شکاف به ارمغان می آورد. قابلیت اینگونه حسگرها در ردیابی شکاف هایی بر روی ورقه های نازک با ضخامت کمتر از ۱ mm میلیمتر و با عرض کمتر از ۱ mm به خوبی مشخص می شود. به منظور ردیابی کردن چنین شکافهایی، حسگر لیزری باید در جلوی انبر جوش نصب شود. به این ترتیب می تواند با کمک دوربینی که در کنار آن قرار گرفته نور بازگشتی از سطح را پردازش کند و اطلاعات مربوط به مکان شکاف و شکل هندسی آن (طول، عرض، ارتفاع) را استخراج کند. این اطلاعات به ربات داده می شود تا ربات انبر جوش را در سر جای مناسب خود قرار داده و همچنین تنظیمات مربوط به پارامترهای جوش را با توجه به جدولی که در اختیار دارد استخراج کند.

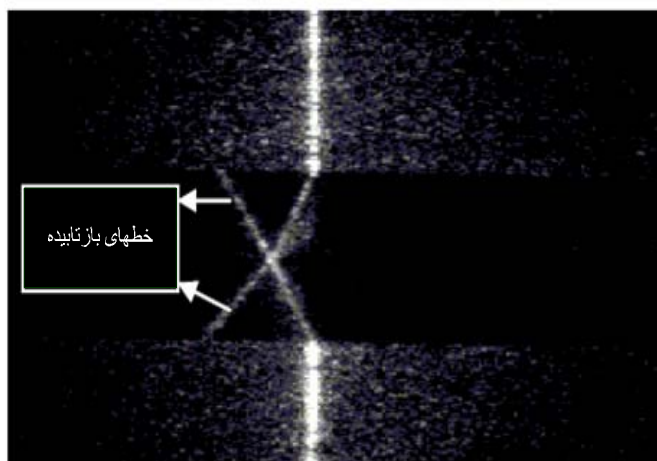
بر خلاف TAST و AVC حسگرهای لیزری برای بدست آوردن اطلاعات مورد نیاز، احتیاجی به برقراری قوس الکتریکی ندارند یعنی قبل از شروع جوشکاری می توانند مقداری از اطلاعات مورد نیاز برای ربات را استخراج کنند و مکان شکاف را قبل از شروع جوشکاری مشخص کنند. این کار به ربات اجازه می دهد که الکتروود را در مکان مورد نظر خود قرار دهد و هنگامی که جوشکاری آغاز شد حسگر لیزری می تواند برای ردیابی شکاف مورد استفاده قرار بگیرد. اندازه گیر لیزری حتی این قابلیت را دارد که با توجه به استخراج اطلاعات هندسی شکاف از روی تصاویر، اغتشاشات ناخواسته به وجود آمده در شکاف را به ربات بازگردانده و ربات با توجه به هندسه این نافرمی پارامترهای لازم برای بهبود کیفیت جوش را از جدول (جدول بهبود کیفیت جوش بسته به نوع هندسه شکاف) استخراج کند. سپس ربات با توجه به تنظیمات مجدد پارامترهای جوش، کیفیت جوش را در حد مطلوب خود نگاه می دارد. حسگر لیزری ساختار پیچیده ای دارد و از محیط نا مطلوب اطراف خود تأثیر می پذیرد و نیز هنگامی که بر روی انبر جوش مونتاز می شود، به دلیل شکننده بودن محدوده حرکتی انبر جوش را تا حد زیادی کاهش می دهد. علاوه بر اینها از نظر هزینه قیمت بالایی دارد. بنابراین اکثر مطالعات در زمینه کاهش قیمت و سهولت کار با اینگونه از اندازه گیرها انجام می شود. حال در این قسمت به بررسی چند نمونه از کاربرد حسگر تصویر<sup>۲</sup> را که در مقالات مختلف بر روی چند نمونه ربات عملی پیاده سازی شده می پردازیم. در مقاله [۴۱] اطلاعات صحیح شکاف از تصاویر گرفته شده با استفاده از سیگنال پروسسینگ استخراج می شود. در این مقاله یک سیستم ردیابی شکاف اتوماتیک و تنظیم پارامترهای جوش خودکار توسعه داده می شود. در این مقاله آموزش دادن و ذخیره کردن اطلاعات در یک قالب، پیدا کردن نقطه شروع جوش، روئیت وضعیت شکاف، بدست آوردن پارامترهای یک شکاف V شکل، کنترل ردیابی شکاف

<sup>۱</sup> Laser Based System

<sup>۲</sup> Vision

و تنظیم پارامترهای جوشکاری به صورت بر خط نشان داده می شود. این سیستم قابلیت ردیابی شکافهای V شکل، لبه دار و جفت شده سطحی<sup>۱</sup> را با دقت کمتر از ۰.۴ mm را دارد.

پارامترهای جوش اغلب نیاز به کنترل و تنظیم بر طبق مشخصات شکاف جوش دارند، بنابراین در میان روشهای گوناگون ردیابی کردن شکاف استفاده از حسگرهای تصویری<sup>۲</sup> این امید را به ما می دهد تا بتوانیم به دقت مورد نظر و نیز مقاوم بودن سیستم در محیط جوشکاری برسیم. هر چند که حسگرهای تصویری بر پایه لیزر نسبت به نور بازگشتی از سطح شفاف فلز که در شکل (۵-۵) نمایان است حساس می باشند.



شکل (۵-۵) نور بازگشتی از سطح شفاف فلز

در این مقاله نویسندگان در آزمایشی با دو حسگر لیزری psd<sup>۳</sup> که به طور همزمان بر روی انبر جوش نسب شده است شکل شکاف جوش را بدست می آورند و نشان می دهند که با وجود نور شدید بازگشتی از سطح فلز می توان مشخصات شکاف جوش را بدست آورد. سپس نقطه شروع جوشکاری را استخراج می کنند و با به کارگیری یک الگوریتم ردگیری شکاف مناسب، جوشی با کیفیت را انجام می دهند.

در مقاله [۴۲] استفاده از یک حسگر لیزری، برای ردیابی یک شکاف جفت شده سطحی را مورد بررسی قرار می دهد. این سیستم شامل یک دوربین CCD و یک دیود لیزری خطی با لنز استوانه ای و یک فیلتر میان گذر برای غلبه بر پایین آمدن کیفیت تصاویر به علت وجود ترشحات و نور شدید قوس می باشد. به منظور به دست آوردن تصاویر با کیفیت بالا با تنظیم سرعت دیافراگم بر روی ۱/۱۰۰۰ sec می توانیم اثر ترشحات ناشی از جوشکاری را در تصاویر به حداقل برسانیم، بنابراین عکسهایی با کمترین اثر از ترشحات بدست می آید.

<sup>۱</sup> Butt

<sup>۲</sup> visual

<sup>۳</sup> position-sensitive-detector

حال ناحیه خاکستری بدست آمده از پردازش تصویر دوربین با مسیر از قبل تعلیم داده شده به ربات مقایسه شده و تفاوت بین این ناحیه خاکستری و نقطه ای که از مسیر جوش مطلوب گرفته شده برای تصحیح خطای ردیابی استفاده می شود. نتایج نشان می دهد که با استفاده از این حسگر هنگامی که خطا در حد (۱۵، +۱۵-) درجه باشد الگوریتم کنترلی به راحتی می تواند با آن مقابله کند و ربات شکاف اصلی را ردیابی کند. در این مقاله طی آزمایشات انجام شده می توان به این موضوع پی برد که بین شدت نور یا همان قدرت لیزر و میزان باز شدگی لنز دوربین<sup>۱</sup> باید یک مصالحه برقرار کرد تا بتوانیم به بهترین تصویر ممکن برسیم. اثر افزایش قدرت سیگنال لیزر در تصاویر درست مانند افزایش باز شدگی لنز دوربین عمل می کند. مشاهده می شود که در میزان باز شدگی لنز بالا و پایین، ناحیه خاکستری وضوح خود را از دست می دهد اما در میزان باز شدگی لنز دوربین میانی به راحتی سطح خاکستری قابل روئیت است. بنابراین واضح است که میزان باز شدگی لنز دوربین مناسب بنا به شدت نور لیزر انتخاب می شود.

در مقاله [۲۲] با استفاده از یک حسگر تصویری بر پایه لیزر سه بعدی، ردیابی شکاف سیستم جوشکاری را مورد بررسی قرار می دهد. نویسندگان در این مقاله بر اساس آزمایشاتی که بر روی یک ربات جوشکار انجام می شود، به دنبال اثبات این مسئله هستند که با استفاده از یک معماری بر پایه زبان RAPID، VISUAL-C و با استفاده از سیگنال پروسسینگ می توان اندازه گیر لیزر سه بعدی را برای پیدا کردن شکاف، مشاهده سطح، بدست آوردن مشخصات هندسی شکاف و ردیابی شکاف با دقت بسیار خوبی به کار برد. در این مقاله با بیان مشکلاتی که از نظر حجم بودن در لیزر نقطه ای وجود دارد و با توجه به اینکه در جوشکاری به ناچار قسمت‌های متحرکی داریم که حسگر ناگزیر از حرکت نیست، استفاده از حسگر تصویری دو بعدی را سودمند دانسته، سپس حسگر لیزری سه بعدی مورد استفاده خود را که ارتقایی از همین لیزر نقطه ای و خطی است را معرفی می کند. عکسهایی که از حسگر تصویری گرفته می شود، توسط یک مدار دیجیتالی سریع<sup>۲</sup> پردازش می شوند تا یک تصویر سه بعدی از شکاف به دست آید و نیز محاسبات مکان جوش نسبت به حسگر تصویری انجام شود. این محاسبات به منظور جبران تغییرات در پارامترهای شکاف به کار می رود تا کنترلر ربات بتواند مسیر را اصلاح کند.

#### ۴-۵- حسگرهای نوری<sup>۳</sup>

در طی فرآیند جوشکاری، قوس الکتریکی قطعه کار را گرم و سپس ذوب می کند و تولید سرباره می کند. وقتی که جریان جوشکاری برقرار می شود، توزیع و شدت سرباره های مذاب، می تواند با توجه به کنترل طول قوس الکتریکی کنترل شود. اندازه گیری و کنترل طول قوس الکتریکی در رباتیک و جوشکاری اتوماتیک امری پایه ای و اساسی است. طول قوس جوشکاری، توزیع و پخش انرژی قوس و به طبع آن گرمای ورودی و پهنای جوش را تعیین می کند. برای کنترل طول قوس، ابتدا باید به روشی طول قوس را اندازه گیری کنیم. یکی از شیوه های اندازه گیری

<sup>۱</sup> F-stop

<sup>۲</sup> Image grabber card

<sup>۳</sup> Ligth Sensor

طول قوس استفاده از حسگر نوری می باشد. این روش برای اولین بار در سال ۱۹۹۶ توسط M.Jhnsn به ثبت رسید و همچنین پس از انجام بررسی های عملی مشخص شد این متد در اندازه گیری طول قوس، در باند ماوراء بنفش به خوبی کار می کند.

در بررسی اینگونه از حسگرها به بررسی مقالات فراوانی پرداختیم که همگی آنها با کمی تفاوت در روش کار، از نور قوس برای تخمین طول قوس استفاده می کنند. در این قسمت به بررسی مقاله [۴۴] می پردازیم که نویسندگان آن توانسته اند با ارائه راهکاری دقت سیستم را بسیار بالا ببرند. هدف اصلی در این مقاله بهبود بخشیدن دقت اندازه گیری طول قوس الکتریکی با استفاده از طیف نور قوس الکتریکی در یک طول موج خاص در طی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن در پناه گاز محافظ آرگون می باشد. در این نوع جوشکاری، جریان جوشکاری گرمای ورودی به قطعه کار را تعیین می کند و طول قوس، توزیع این گرما را بر روی قطعه کار تعیین می کند. که این دو فاکتور حیاتی در کیفیت جوش می باشند. به علت سختی در اندازه گیری طول قوس در فرآیندهای عملی، دقت اندازه گیری و کنترل طول قوس در رسیدن به جوش با کیفیت به عنوان یک معضل مطرح می شود. اگرچه حسگرهای تصویری [۴۱،۴۲،۲۲]، ممکن است طول قوس را به طور دقیق اندازه گیری کنند، اما قیمت بالا و مقاومت پایین آنها نسبت به محیط سخت و خشن جوشکاری قدرت رقابت اینگونه از حسگرها را در برابر انواع دیگر کاهش می دهد. اگر چه روش  $AVC$ ، [۴۰] در جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن بر پایه ولتاژ قوس الکتریکی، طول قوس را اندازه گیری می کند اما ولتاژ طول قوس به طور اجتناب ناپذیری نسبت به شرایط جوشکاری تغییر کرده و این روش پتانسیل لازم برای بدست آوردن دقیق طول قوس را ندارد. اندازه گیری طول قوس با استفاده از حسگر جریان در روش TAST می تواند به خطای کمتر از  $0.5 \text{ mm}$  برسد، در حالی که در بسیاری از کاربردهای جوشکاری، می بایست طول قوس در کمتر از  $2 \text{ mm}$  ثابت نگاه داشته شود. تحقیقات نشان می دهد که با اندازه گیری نور قوس الکتریکی نتایج بسیار دقیقتری برای اندازه گیری طول قوس الکتریکی هم در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی و هم در جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن بدست می آید [۴۵،۴۶]. اگر چه اندازه گیری سیگنال نور قوس قابلیت رسیدن به دقت بالاتر را در اندازه گیری طول قوس را دارد، اما نتایج اولیه قبلی رضایتبخش نبوده و هنوز مشکلاتی بر سر راه این روش وجود داشت.

مشکل از اینجا نشأت می گرفت که تمام تحقیقات قبلی با انتگرالگیری از طول طیفهای نور قوس قصد پیدا کردن طول قوس را داشتند، در حالیکه نور قوس شامل یک سری خط های طیفی پیوسته از المانهای مختلف در ستون قوس می باشد. پاسخ هر یک از این المانها به تغییرات طول قوس مختلف است که این اختلاف از توزیع فضایی مختلف المانهای نور قوس الکتریکی و ارتباط آنها با فرآیند جوشکاری ایجاد می شود. برای بهبود دقت حسگر نور قوس در بدست آوردن طول قوس نویسندگان در مقاله [۴۴] توزیع طیفی نور را آنالیز کرده و فاکتورهای مختلف آن را تعیین کرده اند.

این کار را به این دلیل انجام دادند تا بفهمند که کدامیک از المانهای نور قوس مستقیماً با تغییر طول قوس اثر می پذیرد که در مجموع بتوانند سیستم عملی را توسعه داده و به بالاترین دقت بین روشهای موجود برسند. در انتها پس از انجام تحقیقات و پیاده سازی این حسگر در جوشکاری به این نتیجه دست پیدا کردند که استفاده از حسگرهای نور قوس بسیار دقیقتر از حسگرهای ولتاژ و جریان قوس می تواند عمل کنند. اما اگر طول قوس کمتر از ۱ mm باشد شدت نور توانای اندازه گیری طول قوس با دقت بالا را ندارند. این عدم دقت در فواصل کم به علت حضور بخارهای حاصل از جوشکاری و حساسیتی که حسگر نور قوس نسبت به پارامترها و شرایط جوشکاری دارد ایجاد می شود. روشی که برای غلبه بر این بخارهای پیشنهاد می شود، اندازه گیری شدت نور قوس در باند باریکی حول خط طیفی اتم آرگن (۶۹۶.۵) nm می باشد که این کار با پیوستن یک فیلتر میان گذر ۱۵ nm صورت می پذیرد. با پیوستن این فیلتر خروجی حسگر نور قوس می تواند تخمین دقیقی از طول قوس را در رنج (0.5 - 5) mm دهد. اما در عمل نتایج یک سیستم آزمایشگاهی نشان می دهد که می توان در هنگامی که سرعت جوشکاری نرمال است با دقتی در بازه (0.2, +0.2) mm طول قوس را به راحتی کنترل کرد.

### ۵-۵- حسگرهای القایی<sup>۱</sup>

حسگر مغناطیسی بر پایه ایجاد یک جریان گردابی در سطحی که در زیر یک سیم پیچ تحریک قرار گرفته کار می کند. انواع گوناگونی از این حسگر وجود دارد که در سطح گسترده ای در صنعت از آنها استفاده می شود [۴۷،۴۸]. این حسگرها همچنین برای ردیابی شکاف در فرآیند جوشکاری مورد استفاده قرار می گیرند [۴۹] اما تمامی این حسگرها برای ردیابی شکاف در یک ارتفاع ثابت نسبت به انبر جوش استفاده می شدند. در حالیکه در فرآیند جوشکاری به منظور رسیدن به کیفیت جوش خوب و نیز به خاطر استفاده از قطعه کارهای گوناگون به ناچار مجبور به کنترل این فاصله در اندازه های مختلف می باشیم. بنابراین در راهکارهای جدیدتر، به طور مثال در [۵۰] با استفاده از یک سیم پیچ تحریک و چهار سیم پیچ دریافت کننده، که دو تا در زیر هسته و دو تای دیگر در وسط هسته پیچیده قرار داده شده اند، سعی در کنترل ارتفاع و ردیابی شکاف به طور همزمان دارند که این منظور در مقاله [۵۱] نیز دنبال می شود. راهکارهای قبلی همگی برای عرض شکاف ثابت به کار می رفت، اما باید به این نکته توجه کرد که تغییر در عرض شکاف حتی در طول قوس ثابت باعث تغییر در خروجی حسگر طراحی شده در [۵۰] می شود. علاوه بر این برای استفاده از حسگر مغناطیسی در کنترل طول قوس با کارایی بالا (یعنی با داشتن تغییر در عرض شکاف و همچنین تغییر در قطعه کار) می بایست مطالعاتی در این زمینه صورت می گرفت. با در نظر گرفتن مواردی که در بالا اشاره شد در مقاله [۵۲] نویسندگان با در نظر گرفتن این نیازها حسگری طراحی کرده اند که در این قسمت طراحی این حسگر و کارایی بالای آن در ردیابی شکاف، بدست آوردن ارتفاع نسبت به شکاف و نیز بدست

<sup>1</sup> Inductive Sensor

آوردن عرض شکاف را با هم مرور می کنیم. حسگر طراحی شده در این مقاله از یک سیم پیچ تحریک و سه سیم پیچ مشاهده گر به طور همزمان استفاده می کند.

سیم پیچهای دریافت کننده چپ و راست به طور متقارن برای پیدا کردن شکاف در دو طرف شکاف قرار گرفته اند و با استفاده از مشخصه متقارن خود شکاف را مشخص کرده و آن را ردیابی می کنند. دریافت کننده جلویی و دریافت کننده سمت راست، به وسیله کوپل کردن خروجی خود برای بدست آوردن طول قوس به کار می روند. وقتی که سیم پیچ تحریک توسط یک جریان متناوب تحریک می شود، میدان مغناطیسی به واسطه القاء الکترومغناطیسی باعث به وجود آمدن جریان گردابی در هادی می شود [۵۳] که بزرگی این جریان گردابی بنا به تغییر فاصله بین سیم پیچ تولید کننده شار و هادی تغییر می کند، که این تغییر جریان می تواند بدون آنکه مشاهده گر با سطح تماس پیدا کند توسط القای ولتاژ در سیم پیچ دریافت کننده حس شود. حسگر مغناطیسی خروجی آنالوگ دارد، ساختار این حسگر بسیار ساده است و در سطح وسیعی از کاربردهای صنعتی مانند تست لوله، ورق، روکش مواد، یکنواختی سطح و غیره می تواند به کار رود. بنابراین رابطه بین ولتاژ القایی و شرایط کار، با میزان هدایت الکتریکی، نفوذپذیری و شکل هندسی قطعه کار تغییر می کند [۵۴] که تعیین کردن این رابطه به روش تئوری بسیار دشوار است. علاوه بر این در فاصله های بزرگتر حساسیت م دریافت کننده پایین آمده و عملکرد سیستم پایین می آید و عملکرد ضعیفتری از خود نشان می دهد.

به منظور مشاهده شکاف در قطعه کار حسگر الکترومغناطیسی، دو دریافت کننده چپ و راست با حرکت کردن در اطراف شکاف و ثبت خروجی هر یک، هنگامی که خروجی هر دو دریافت کننده به تقارن رسیدند یعنی انبر جوش جوشکاری درست در وسط شکاف قرار گرفته است. در همین زمان دریافت کننده جلویی با کمک دریافت کننده راست برای تعیین فاصله تا قطعه کار و همچنین تعیین عرض شکاف مورد استفاده قرار می گیرند. سیستم حسگر مورد بحث، نیاز به یک مدار تحریک برای تولید جریان متناوب فرکانس بالا برای تحریک سیم پیچ و نیز نیاز به یک مدار پردازش سیگنال برای تحلیل خروجی های دریافت کننده ها دارد. برای مدار تحریک می توان از چیپ A Max038 استفاده کرد، در این چیپ با تغییر ناگهانی مقاومت و خازن مدار می توان شکل موجهای سینوسی با فرکانس بالا را به منظور تغذیه سیم پیچ تحریک بدست آورد [۵۵]. با تغییر مقاومت و ظرفیت خازن می توان فرکانس خروجی را تغییر داد. خروجی این چیپ در رنج ۷ تا ۲۰ است، برای رساندن رنج ولتاژ به ۷ تا ۱۰ از یک تقویت کننده استفاده می شود. مدار پردازشگر سیگنال تشکیل شده از یک یکسو کننده و یک فیلتر پایین گذر با فرکانس قطع ۱۰ HZ، که برای بدست آوردن یک خروجی مناسب از هر دریافت کننده استفاده می شود. خروجی هر دریافت کننده توسط یک برد پردازشگر سریع<sup>۱</sup> (در این آزمایش از (PCL-818H) که یک پردازشگر ۱۲ بیتی است استفاده شده) پردازش می شود و در یک PC اجرا می شود.

<sup>1</sup> Data acquisition board

در مقاله [۵۲] به منظور انتخاب فرکانس تحریک مناسب برای حسگر، تا اینکه بتواند با بالاترین حساسیت فاصله تا قطعه کار را بدست آورد، یک سری آزمایش در فرکانس های تحریک مختلف انجام شد. که ماکزیم حساسیت در فرکانس ۶۰۰ KHZ اتفاق می افتد، بنابراین در به کار گیری این حسگر فرکانس تحریک را در این رنج انتخاب می کنیم. جزئیات بیشتر را می توانید در مقاله مذکور جستجو کنید. حسگر ذکر شده بر روی یک سیستم عملی برای ردیابی یک شکاف خمیده در راستاس محور Z و Y پیاده سازی شده است. با بررسی نتایج این پیاده سازی مشاهده می شود که سیستم پیاده سازی شده توانسته شکاف جوش را با دقت (۰.۳، ۰.۳) mm به خوبی ردیابی کند. و نیز با بررسی نتایج پیدا کردن عرض شکاف، این حقیقت آشکار می شود که سیستم توانایی اندازه گیری شکاف را هنگامی که شکاف جوشکاری در حال تغییر می باشد را نیز دارا می باشد.

### ۵-۶- حسگرهای مافوق صوت<sup>۱</sup>

استفاده از حسگر مافوق صوت در قسمت‌های مختلف صنعت نظیر جاگذاری قطعه، بازرسی نهایی، جوشکاری و غیره مرسوم می باشد. با این تفاوت که در هر یک از این سیستمها عملکرد حسگر مافوق صوت متفاوت است، مثلاً در جوشکاری وظیفه حسگر استخراج مشخصات شکاف جوش و ردیابی آن است. در محیط ایده ال ربات می تواند با برنامه ریزی، مسیر شکاف را ردیابی کند. اما در عمل، به دلیل وجود اغتشاش های پیشبینی نشده و تolerانس های صنعتی، دیگر شکاف در جای واقعی خود قرار نمی گیرد. اگر حسگر مافوق صوت بتواند موقعیت شکاف را اندازه گیری کند، آنگاه کنترلر ربات می تواند با تطبیق شکاف را ردگیری نماید.

انواع مختلفی از حسگرهای غیر تماسی در دسترس می باشد که هر کدام از آنها دارای محدودیت ها و مزیت هایی می باشند. در استفاده از حسگرهای مافوق صوت، سیستم اندازه گیری صوت با استفاده از تکنیک پالس، دایره اطلاعات را از پالس اکو بازگشتی استخراج می کند. یک پالس الکتریکی سینوسی، فرستنده پیزوالکتریک را برانگیخته می کند تا پالس مافوق صوت را تولید کند و از طریق هوای بین حسگر و قطعه کار انتقال دهد. جزئی از موج صوتی تولید شده، بازگشته و توسط گیرنده مشاهده می شود. تأخیر زمانی بین تولید پالس تا بازگشت موج در نصف سرعت انتشار موج صوتی ضرب شده تا فاصله حسگر تا قطعه کار بدست آید. از این پس فاصله اندازه گیری شده برای بدست آوردن اطلاعات لازم از حسگر به کار گرفته می شود. در عمل مسائل عملی پیچیده ای وجود دارد، نویزها در محیط جوشکاری در فرکانس کمتر از ۱۰۰۰ KHZ تمرکز دارند. برای به حداقل رساندن تداخل بین نویز تولیدی توسط جوشکاری قوس الکتریکی و سیستم اندازه گیری، سیستم اندازه گیری صوتی در فرکانس بالای ۰/۵ MHZ کار می کند. مسئله تضعیف و پالس صوتی بازگشتی که به خاطر هوای میان حسگر و قطعه کار اتفاق می افتد به وسیله استفاده از یک سطح عمودی مقعر متمرکز کننده در فرستنده، حل می شود. با اینکار انرژی انتقال در یک نقطه متمرکز می شود. در [۵۶] نویسندگان بر روی این مسئله کار کرده اند و طی بررسی هایی که بر روی سطح متمرکز

<sup>1</sup> Ultrasonic Sensor



انجام شده، دامنه موج فرستاده شده و کوپلینگ بین فرستنده با هوای اطراف انجام داده اند کارایی سیستم را بهبود بخشیدند. سیستمهای ردیابی شکاف به مشخصه شکاف احتیاج دارند. در ضمن برای داشتن یک کنترل اتوماتیک کامل سیستم باید توانایی مشاهده شکاف و تعیین جهت آن را داشته باشد. با داشتن این اطلاعات می توان پارامترهای جوش را برای هر شرایطی تنظیم کرد. برای بدست آوردن این اطلاعات می توان از حسگر مافوق صوت استفاده کرد. تنها مشکل بکارگیری حسگرهای مافوق صوت میزان بازشدگی دهانه آنهاست که محدود می باشد. بنابراین در کارگذاری اینگونه از حسگرها باید دقت لازم به عمل آید. اگر دهانه اینگونه از حسگرها بیشتر از حد مجاز باز شود دایره اطلاعات اندازه گیری شده توسط حسگر کافی نمی باشد. بنابراین در این حالت باید از یک استراتژی خاص برای بدست آوردن مشخصه های لازم از روی این اطلاعات ناقص استفاده کرد. تأثیر استفاده از حسگرهای مافوق صوت، در کیفیت جوش می تواند با داشتن اطلاعات اولیه ای از شکاف جوش بهبود بخشیده شود.

در مقاله [۶۲] یک سیستم دریافت کننده موقعیت، تشخیص جهت و بدست آوردن شکل هندسی اتوماتیک شکاف با به کارگیری حسگر مافوق صوت بر روی ربات بررسی می شود. حسگرهای مافوق صوت برای تشخیص [۶۳] و ردیابی شکاف [۶۱] استفاده می شوند. اما برای رسیدن به یک سیستم کاملاً اتوماتیک به یک سری اطلاعات اولیه از مکان شکاف و شکل هندسی آن نیاز داریم. حال این اطلاعات می تواند یا به صورت خارج خط به سیستم داده شود یا به کمک حسگر به صورت روی خط<sup>۱</sup> در اختیار سیستم قرار گیرد. در این روش سیگنالهای موج بازگشتی دیجیتال می شوند و با آنالیز این سیگنالها، می توان اطلاعات مربوط به پوش سیگنال و اندازه حرکت را به طور دقیق محاسبه کرد. دامنه سیگنال بازگشتی از طریق محاسبه ماکزیمم پوش سیگنال و فاصله با توجه به زمان شروع سیگنال بازگشتی به دست می آید.

مقاله [۶۲] از دو جفت حسگر مافوق صوت برای بالا بردن کارایی سیستم و تشخیص شکاف جوش استفاده می کند. جفت حسگر (Model MA-40 of murata) ۴۰ KHZ که یکی به عنوان گیرنده و دیگری به عنوان فرستنده عمل می کند و بر روی گریپر ربات (PUMA 741) در یک ارتفاع ثابت به صورت متصل و ثابت قرار گرفته اند. این جفت جهت درست شکاف را با دقت بسیار خوبی از روی دامنه سیگنال موج بازگشتی نسبت به تغییر زاویه بدست می آورند و همچنین از برخورد ربات با موانع در سر راه قرار گرفته جلوگیری می کنند و قابلیت اسکن ۳۶۰° را دارند. سپس از یک جفت حسگر (Model E-188/220 of Massa Products Corporation) 220 KHZ برای مشاهده و بدست آوردن شکل هندسی شکاف به وسیله نمونه برداری متناوب و آنالیز دامنه سیگنال بازگشتی استفاده می کند. فرستنده حسگر ۲۲۰ KHZ پرتو را بصورت واگرا ۱۰° ارسال می کند، سیگنال بازگشتی توسط گیرنده دریافت می شود و سپس دیجیتال شده و با توجه به اصل فیزیکی تغییر در موج، آنالیز می شود. پس از انجام این عملیات شکل هندسی شکاف بدست می آید. کار حسگر مافوق صوت قبل از شروع جوشکاری به اتمام می

<sup>1</sup> On\_line

رسد. زیرا هنگام برقراری قوس، محیط خشن جوشکاری بر روی عملکرد این نوع حسگر تأثیر گذاشته و خطا را افزایش می دهد. بنابراین در اینجا به بررسی نحوه ردیابی ربات جوشکار بعد از برقراری قوس الکتریکی در محیط جوشکاری می پردازیم. در محیط ایدال ربات می تواند با برنامه ریزی، مسیر شکاف را ردیابی کند. اما در عمل، به دلیل وجود اغتشاش های پیش بینی نشده و تولرانس های صنعتی، دیگر شکاف در جای واقعی خود قرار نمی گیرد. اگر حسگر مافوق صوت بتواند موقعیت شکاف را اندازه گیری کند. آنگاه کنترلر ربات می تواند با تطبیق خود، شکاف را ردگیری نماید. سیستم اندازه گیری کردن صوتی می تواند از پیشرفتهایی که در تکنیک پالس ارائه شده استفاده کرده تا بتواند اطلاعات مورد نیاز برای داشتن یک سیستم جوشکاری کاملاً اتوماتیک را از سیگنال موج بازگشتی استخراج کند [۶۴].

یکی از اهداف سیستم اندازه گیری در اندازه گیری صوتی، ساخت یک مشخصه سه بعدی از سطح قطعه کار می باشد. این سیستم با یک نمونه برداری دو بعدی مشخصات سطح را برای الگوریتم ردیابی شکاف، آماده می کند. چنین اطلاعات پایه ای می تواند توسط نمونه گیری متناوب از سطح انجام شود. فاصله عمودی تا سطح قطعه کار، عرض و طول قطعه کار می تواند در رسیدن به مشخصه سه بعدی از شکاف، به ما کمک کند. به این صورت که ارتفاع در هر نمونه از ارتفاع حسگر تفریق می شود، بنابراین ارتفاع در هر نمونه به راحتی بدست می آید. در رسیدن به این هدف دو راه پیش روی ما قرار دارد.

۱. به کارگیری حسگرها به صورت برداری: یعنی باید یک فرستنده برای هر نمونه استفاده کرد، آنگاه به درستی می توان در زمان لازم اندازه گیری ها را انجام داد.

در اینجا سطح قطعه کار که باید به وسیله برداری از حسگرها نمونه برداری شود محدود به زاویه های خاص می شود، به این علت که میزان بازشدگی دهانه حسگر مافوق صوت محدود است.

۲. استفاده از یک حسگر، در سیستم تک حسگر اگرچه باید روی هر نمونه مراحل مختلفی انجام گیرد، اما این سیستم قابلیت بالاتری دارد و می توان انواع گوناگونی از سطح را با آن نمونه برداری کرد.

با در نظر گرفتن آزادی حرکت، حسگر می تواند مشخصات قطعه کارهای مختلف را با وجود شیب های مختلف در سطح معلوم کند.

در اینجا مراحل مختلف یک الگوریتم تشخیص سطح را با هم بررسی می کنیم.

- جلو بردن نقطه نمونه گرفته شده در سطح در یک ارتفاع ثابت
- تغییر دادن وضعیت حسگر نسبت به نمونه در همان نقطه با تغییر زاویه حسگر نسبت به سمپل قبل
- محاسبه ارتفاع سطح و سپس تفریق آن از فاصله حسگر
- ذخیره کردن ارتفاع حسگر

برای جارو کردن سطح، باید بتوانیم حسگر را به نمونه بعدی ببریم، در استفاده از هر یک از روشهای ذکر شده نگاه داشتن فاصله افقی ثابت بین هر سمپل بسیار مهم می باشد، که این کار با پیاده سازی الگوریتم های مختلفی بسته به شرایط قرارگیری سطح و حسگر انجام می پذیرد.

در صنعت امروز سعی می شود که به ردیابی شکاف به صورت بر خط بدون استفاده از مدل هندسی قطعه کار و آموزش [۶۵] دست پیدا کنند. در راستای رسیدن به این هدف از فرستنده که به سر انبر جوش متصل است برای بازرسی قطعه کار و اندازه گیری جهت شکاف استفاده می شود تا با بدست آوردن این انحراف افقی بتوان ربات را بدون خطا درست در مسیر شکاف راهنمایی کرد. اندازه گیری دامنه سیگنال اکو بازگشتی و زمان انتقال، در ترکیب با وضعیت قرار گرفتن انبر جوش و مکان حسگر برای بدست آوردن پارامترهای نامعلوم استفاده می شود. اطلاعات وابسته به جهت شکاف جوش و انحراف افقی، به وسیله نمونه گیری افقی از سر تا سر شکاف بدست می آید. در هر نمونه اطلاعات به میکروپروسسور فرستاده می شود تا الگوریتم مسیر را اجرا کرده و اطلاعات مناسب برای ردگیری شکاف را بدست آورد. بدین ترتیب ردیابی به صورت بر خط با اجرای یک سری تبدیل فضا انجام می پذیرد. هدفی که ما در این قسمت دنبال می کنیم، چگونگی استفاده از تک حسگر مافوق صوت است که بتوانیم تنها با استفاده از یک حسگر اطلاعات مورد نیاز برای ردگیری شکاف را استخراج کنیم، که در مقاله [۶۶] این الگوریتم بر روی یک شکاف V شکل و یک شکاف سطحی لبه دار پیاده سازی شده است. در مجموع این بررسی ها هدف این مقاله، حذف اسکن های روتین است که به صورت متناوب بر روی سطح صورت می گیرد. با استفاده از یک حسگر واگرا که با زاویه  $45^\circ$  نسبت به شکاف نصب شده، می توان به راحتی با بررسی دامنه سیگنال موج بازگشتی، انبر جوش را در راستای شکاف راهنمایی کرد. می توان با استفاده از یک لنز مقعر سیگنال آگوستیک ارسالی را متمرکز کرده، سپس نمونه گیری دو بعدی را انجام داد [۶۱]. در نمونه گیری با تک حسگر، فرستنده ابتدا در نقطه ای در امتداد بردار عمود بر سطح قرار دارد. اما جهت فرستنده در هر نقطه از نمونه گیری نسبت به جهت قبلی باید تغییر کند. در ضمن این تغییر، فاصله سمپل گیری باید ثابت نگاه داشته شود.

حال به بررسی این مورد می پردازیم که چرا زاویه  $45^\circ$  در مقاله [۶۱] برای نصب حسگر در نظر گرفته شده است.

- یک اسکن ساده سه بعدی برای ردیابی کردن شکاف می باشد. اطلاعات نمونه گیری شده و محاسبات، با اینگونه اسکن کردن سطح ساده می شود و می توان محاسبات را به سرعت انجام داد.
- هم زمان مسیر و هم دامنه موج اکو بازگشتی اندازه گیری شده، در الگوریتم ردیابی شکاف به کار می روند. بنابراین به علت اینکه اندازه گیری با اسکن یک بعدی، ساده انجام می شود. اطلاعات لازم به سرعت بدست می آیند.

• عملکرد سیستم در برابر تنظیم محور فرستنده نسبت به قطعه کار غیر حساس می شود. یعنی سیگنال موج بازگشتی در جهت نسبتاً مناسبی دریافت می شود و سیگنال موج بازگشتی قدرت کافی را بعد از بازگشت از لبه دارا می باشد.

در صفحه افقی، فرستنده به طور پیوسته سطح را با زوایای بالای  $45^\circ$  اسکن می کند. زیرا در این زوایا سیگنال موج بازگشتی دامنه بالایی، در حد انتظار دارد. حسگرهای آگوستیک، هم جهت و هم فاصله [۶۱] را بدست می آورند. این اطلاعات می تواند از دامنه پالس موج بازگشتی و زمان طی مسیر بدست آید. هنگامی که سیگنال های موج مختلف را که از آزمایشات مختلف بدست آمده با هم مقایسه می کنیم مشاهده می شود که سیگنالها نسبت به روزنه فرستنده، جهت قرار گرفتن شکاف نسبت به حسگر، فاصله عمودی سطح نسبت به حسگر، شکل هندسی شکاف جوش، سایز و ناهمواری های سطح قطعه کار تغییر می کنند. علاوه بر اینها تغییرات دامنه سیگنال اکو به صورت متقارن، در تشخیص اینکه حسگر در کدام سمت و در چه زاویه ای نسبت به خط عمود قرار دارد دچار مشکل می شویم. علی رقم این ابهامات، می دانیم که هر گاه که محور حسگر نسبت به سطح، عمود باشد آنگاه ماکزیمم دامنه را در سیگنال اکو بازگشتی داریم. این هنگامی اتفاق می افتد که حسگر در وضعیت میانی قرار دارد.

در پیاده سازی ها، تنها یک دریافت کننده ماکزیمم پیک و یک کرنومتر ساده برای بدست آوردن اطلاعات مربوط به جهت و وضعیت شکاف کفایت می کند. سیستم اکتساب اطلاعات شامل یک LS 320 به عنوان فرستنده و یک LAM 80/8 به عنوان فاصله متر، با در نظر گرفتن وضعیت قرار گرفتن حسگر به راحتی کار خود را انجام می دهد. این ترکیب به منظور بدست آوردن اطلاعات لازم برای الگوریتم تولید مسیر ایجاد شده است. این الگوریتم از اطلاعات جهت شکاف و انحراف سر انبر جوش استفاده کرده و مسیر مطلوب را برای ردگیری شکاف تولید می کند. این سیستم قابلیت ردیابی شکاف را با قرار دادن حسگر با زاویه  $45^\circ$  را دارد، که در مقاله [۶۱] بر روی یک شکاف V شکل و lap پیاده سازی شده و با توجه به نتایج قابلیت تصحیح انحراف  $15^\circ$  از شکاف را در ربات جوشکار دارد.

کنترل دامنه پالس موج بازگشتی، به این منظور صورت می گیرد که حسگر همیشه در وضعیت عمود نسبت به لبه شکاف حتی هنگامی که به گوشگی و خمیدگی می رسیم باقی بماند. زیرا این بهینه ترین وضعیت برای سیگنال موج بازگشتی می باشد تا بتوانیم یک سیگنال اکو با دامنه قوی داشته باشیم. دقت اندازه، به دامنه پالس اکو بازگشتی وابستگی زیادی دارد. اگرچه با انحراف از شکاف به دلیل ضعیف شدن پالس اکو بازگشتی، دامنه پالس کاهش پیدا می کند. از همین رفتار در مقاله [۶۱] برای تصحیح خطا استفاده می شود. به این صورت که حسگر در بالای زاویه  $45^\circ$  در محدوده  $5^\circ$  شروع به نوسان می کند. آنگاه سیگنال اکوبازگشتی مورد بررسی قرار می گیرد به این صورت که در کجای سیگنال اکو ماکزیمم دامنه اتفاق افتاده است. آنگاه با توجه به الگوریتم کنترلی مناسب، حسگر را همواره در وضعیتی نسبت به انبر جوش نگاه داشت که بتواند بهترین اطلاعات را از شکاف در اختیار ما قرار دهد. به این صورت است که می توانیم انبر جوش را درست در راستای شکاف هدایت کنیم.

۷-۵- مشاهده گر تصویری<sup>۱</sup>

حال در مورد ردیابی شکاف در زمان واقعی با استفاده از یک حسگر بینایی بحث می کنیم. در این راستا به یک الگوریتم پردازشگر تصویر برای استخراج مسیر شکاف و جبران خطای انبر جوش نیاز داریم. در مقاله [۶۷] این الگوریتم با استفاده از تصاویری که از حوضچه جوش گرفته می شود بر روی یک شکاف V شکل پیاده سازی شده است. استفاده از بینایی کارایی بسیار خوبی برای حذف آموزش و برنامه ریزیهای پی در پی ربات که برای جوشکاریهای مختلف باید صورت گیرد را دارد. همچنین تماس نداشتن با حوضچه جوش و دادن رنج وسیعی از اطلاعات مورد نیاز از مزایای این سیستم اندازه گیری می باشد. مطالعات زیادی در راستای استفاده از حسگر تصویر در ردیابی شکاف و مشاهده حوضچه جوش صورت گرفته است [۶۸، ۶۹] اگرچه دستاوردهای مهمی در این زمینه برای ردیابی شکاف [۷۰، ۷۱] انجام شده است، اما هنوز نیاز به تکنیکهای کاربردی مطمئن تری احساس می شود. در صنعت سیستم ردیابی شکاف بر پایه لیزر در سطح وسیعی مورد استفاده قرار می گیرد اما با وجود هزینه بالا شکافهای با خمیدگی را به سختی ردیابی می کند، که همین مسئله باعث محدودیت در کاربرد این دسته از حسگرها می شود. در عوض ردیابی شکاف بر پایه اندازه گیری تصویر با وجود ارزانتر بودن می تواند اطلاعات لازم از شکاف را در اختیار ما قرار دهد. از این نظر حسگر تصویری می تواند ضعفی که در ردیابی لیزری هست را جبران کند و به راحتی شکافهای با خمیدگی و پیچیدگی زیاد را ردیابی کند.

در مقاله [۶۷] که در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است، دو شیوه مرسوم که در استفاده از حسگر تصویری در جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن در پناه آرگون وجود داشت را بهبود بخشیده است. نویسندگان در این مقاله الگوریتم پردازش تصویری ارائه کرده اند که به راحتی می تواند شکاف و میزان انحراف از آنرا استخراج کند و نیز الگوریتم کنترلی ردیابی مسیری ارائه داده اند که در زمان واقعی عمل می کند.

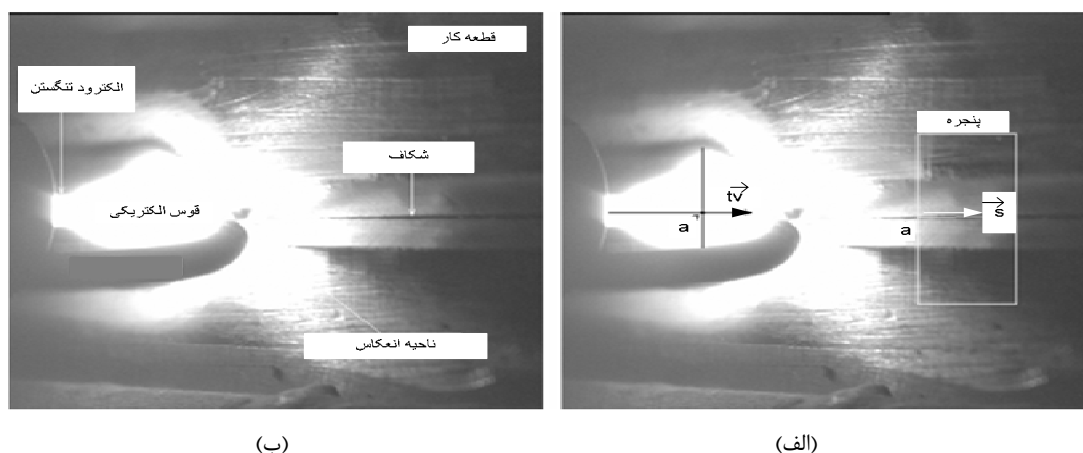
**اصل و قاعده تکنولوژی ردیابی شکاف در حسگرهای تصویر:** حسگر تصویر شامل یک دوربین CCD<sup>۲</sup> می باشد که در انتهای مفصل ربات نصب شده و تصویرهایی از حوضچه جوش را از بالا در جهت حرکت ضبط می کند. به راحتی می توان در این تصاویر حوضچه جوش و شکاف را مشاهده کرد. می دانیم که حسگر در طی فرآیند جوشکاری با ربات در حال حرکت می باشد. بعد از تنظیم مکان حسگر و مجری نهایی ربات، مسئله کلیدی که در اینجا مطرح می شود این است که ما چگونه از روی این تصاویر خطا را جبران کنیم. مراحل انجام این فرایند در زیر آمده است:

۱- مشخص کردن شکاف جوش: ابتدا یک ناحیه از تصاویر همانطور که در شکل (۵-۶-الف) مشاهده می شود، را انتخاب کرده که آنرا پنجره می نامند. این کار برای استخراج مرکز شکاف با استفاده از تکنولوژی پردازش تصویر دیجیتال انجام می گیرد. سپس شکاف جوش<sup>۳</sup> با استفاده از روش حداقل مربعات خطا بدست می آید.

<sup>۱</sup>Vision<sup>۲</sup> Charge couple Device

۲- محاسبه میزان انحراف انبر جوش: در شکل (۵-۶-ب) نقطه a تصویر الکتروود تنگستن بالای قطعه کار و خط  $t\vec{v}$  جهت الکتروود تنگستن می باشد. بعد از انجام تنظیمات، نقطه a ثابت می شود و انحراف از طریق مقایسه محور نقطه a و خط مسیر  $\vec{s}$  بدست می آید.

حال با استفاده از الگوریتم تصحیح خطا می توان انبرجوش را درست در مسیر شکاف حرکت داد. این روش در مقاله [۶۷] پیاده سازی شده است و نتایج خطا را در محدوده  $\pm 0.2\text{mm}$  را نشان می دهد. جزئیات بیشتر را می توانید در مقاله مربوط جستجو کنید.



شکل (۵-۶) تصویر گرفته شده از استخر جوش

## ۵-۸- مقایسه بر روی انواع روشهای موجود اندازه گیری

یک سیستم اندازه گیری ایده ال باید دارای ویژگی های زیر باشد [۶۱]:

۱. اطلاعات شکاف را داشته باشد.
۲. تطبیق پذیر بوده و توانایی جوشکاری انواع شکاف را با انواع تکنیکهای جوشکاری را داشته باشد.
۳. در زمان واقعی عمل کند.
۴. محدودیت حرکتی برای انبر جوش ایجاد نکند.
۵. هزینه اندازه گیری باید جزء کوچکی از هزینه سیستم جوشکاری باشد.

حال با آگاهی از این موضوع به مقایسه روشهای موجود می پردازیم. در بالا بردن کارایی جوشکاری اتوماتیک با استفاده از رباتها، نگاه داشتن کیفیت جوش تا حدودی ثابت با وجود اغتشاشها و خطاهای موجود در کار بسیار حیاتی است. یک تکنیک کلیدی برای بهبود کیفیت جوش، تکنولوژی بکار رفته در آن می باشد. همین امر، صنعت و علم را به سمت اجرای جوشکاری هوشمند با کمترین استفاده از مشاهده و قدرت انسان سوق می دهد. در کتابهایی که تا کنون در مورد جوشکاری اتوماتیک ارائه شده مشخص می شود که از هیچ یک از حسگرها برای تمام اهداف و بر

روی انواع فرآیندها نمی توان استفاده کرد و به طور کاملاً واضح روشن است که از هر حسگر بسته به شرایط محیط و محدودیتها برای اهداف خاصی می توان استفاده کرد. در سالهای اخیر با افزایش سرعت پردازش توسط کامپیوتر و تکنولوژی پیشرفته IT، سعی در بهبود بخشیدن عملکرد حسگرها برای بهبود سیستم کنترل و همچنین پایین آوردن هزینه شده است. بنابراین حسگرهای کاربردی در سیستم های جوشکاری اتوماتیک در سطح وسیعی گسترش یافته اند. هم اکنون حسگرهای طول قوس در سطح وسیعی استفاده می شوند در ضمن امید است حسگرهای نوری در کنار حسگر طول قوس در آینده ای نزدیک عملکرد جوشکاری را بهبود بخشند.

در کل در جوشکاری اتوماتیک این امر معمول است که با انتخاب پارامترهایی که برای یک جوشکاری، مطلوب (که از طریق آزمایشات تعیین شده است) است هدایت و کنترل فرآیند جوشکاری صورت می پذیرد. حال اگر پارامترهای تنظیم شده در همان مقدار تنظیم شده باقی بمانند و همچنین شرایط محیطی مساعد باشد، حتی می توان کنترل را بر پایه صدای جوشکاری کنترل کرد. اما با وجود اغتشاشهای که در خود قطعه کار و همچنین در محیط اطراف وجود دارد، بازگشت به پارامترهایی که از قبل به علت وجود اغتشاشات و اختلالات خارجی، نگاه داشتن پارامترهای تنظیم شده روی مقدار مطلوب کاری بسیار دشوار و غیر ممکن است. در جدول (۵-۲) لیستی از این اغتشاشها و اختلالات در کنار هم آورده شده اند. بنابراین در این زمینه لزوم تصحیح پارامترهای جوش احساس می شود. برای رسیدن به این هدف، ابتدا نیاز به یک حسگر داریم تا بتواند این اغتشاشهای خارجی را مشاهده کند. بنابراین در تعیین نوع حسگر به منظور اندازه گیری متغیر مورد نظر برای کنترل فرآیند، باید دقت کافی را به عمل آورد. در جدول (۵-۳) متغیرهای اساسی که باید کنترل شوند در کنار متغیرهای قابل اندازه گیری مرتبط با آنها، که پایه اطلاعات اندازه گیری قرار داده می شوند، جمع آوری شده است.

متغیرهایی که برای اندازه گیری کردن انتخاب می شوند عبارت از شکل شکاف، شکل دانه جوش، حوضچه جوش، الکتروود، درجه حرارت و غیره می باشند. این متغیرها بر پایه اطلاعات گرفته شده از حسگر کنترل می شوند. در این راستا کنترل پارامترهای جوشکاری در مواجهه با اغتشاشهای موجود و چک کردن اتوماتیک کیفیت جوش در طی جوشکاری و بعد از آن، برای بالا بردن کارایی سیستم و هوشمند کردن آن امر مهمی می باشد. تعداد زیادی از حسگرها که در صنعت جوشکاری مورد استفاده قرار می گیرند از انواع حسگرهای طول قوس می باشند. با استفاده از این اصل اساسی که تغییر طول قوس منجر به تغییر در جریان و ولتاژ قوس می شود، این گونه از حسگرها مکان شیار را توسط نوسان دادن و یا چرخاندن انتهای انبر جوش در عرض شکاف، و مشاهده تغییرات متقارن جریان نسبت تغییر مکان انتهای انبر جوش تشخیص می دهند.

جدول (۵-۲) اغتشاشات به وجود آمده در طی جوشکاری

|    | ناهنجاری های فرایند جوشکاری               | ناهنجاری های قطعه کار                |
|----|---|--------------------------------------|
| ۱  | نور قوس                                   | در شکل قطعه کار                      |
| ۲  | حرارت قوس                                 | در تنظیمات قطعه کار                  |
| ۳  | ترشحات ناشی از جوشکاری                    | تغییر در شکل شکاف                    |
| ۴  | الکترومغناطیس                             | دانه های جوش پهن                     |
| ۵  | خمیدگی و یا شکستگی الکتروود               | بد شکلی حرارتی در آهننگ انجام فرآیند |
| ۶  | نوسان در نرخ تغذیه الکتروود               |                                      |
| ۷  | فرسایش منبع تغذیه                         |                                      |
| ۸  | نوسان در منبع ولتاژ                       |                                      |
| ۹  | تغییر در شرایط جوشکاری و شکل قوس الکتریکی |                                      |
| ۱۰ | وزش باد                                   |                                      |

توانایی اصلی این گونه از حسگرها برای ردیابی شکاف جوش می باشد و بالا بردن کارایی این گونه از حسگرها محدود است. بنابراین در کنترل تطبیقی هوشمند جوشکاری، کاربرد این گونه از حسگرها در مقابل پیشرفت هایی که در حسگرهای تصویری (از این نظر که رنج وسیعی از اطلاعات مورد نیاز را می توان توسط آنها بدست آورد) محدود می شود. تحقیقات در مورد حسگرهای تصویری در جوشکاری قوس الکتریکی از دهه ۱۹۶۰ شروع شد. اما اولین نمونه کاربردی آن در سال ۱۹۹۸ ارائه شد. حسگرهای تصویری که نور مرئی و پرتو لیزری را اندازه گیری می کنند، خود انواع گوناگونی دارند. در یک سری از آنها نور لیزر بازگشتی از سطح روی یک پرده نازک اثر می گذارد یا مستقیماً توسط یک دوربین CCD از سطح فیلمبرداری می شود.

در جدول (۵-۴) مقایسه ای بین متغیرهای اندازه گیری شده توسط حسگرهای لیزری و تصویری آورده شده است. همانطور که در جدول مشاهده می شود کاربرد حسگرهای لیزری تنها به مشاهده شکل شکاف محدود می شود اما اطلاعات مربوط به کیفیت جوش را نمی توان به خوبی بررسی کرد. بنابراین پردازش کردن ساده شده و با سرعت بیشتری می توان جوشکاری را انجام داد. از این رو از حسگرهای لیزری تنها برای ردیابی شکاف استفاده می شود.



جدول (۵-۳) ستون سمت چپ متغیرهای که باید کنترل شوند در دو گروه متغیرهای اساسی و متغیرهای قابل اندازه گیری مرتبط با آنها می باشد و ستون سمت راست شیوه های کنترل پیشنهادی برای کنترل آنها آورده شده است.

| موارد اندازه گیری              |                               | حسگر                  | مواردی که تحت کنترل قرار می گیرند  |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| مواردی که باید اندازه گیری شود | مواردی که اندازه گیری می شوند |                       |  |
| شکل شکاف                       | ابعاد شکاف جوشکاری            | →                     | تشخیص نقطه شروع و پایان جوشکاری  |
|                                | شرایط شکاف                    |                       |  |
|                                | میزان نفوذ                    |                       |  |
|                                | خط در حال جوشکاری             |                       |  |
| دانه جوش                       | شکل دانه ها                   |                       | کنترل تطبیقی جوشکاری شامل <ul style="list-style-type: none"> <li>• شرایط</li> <li>• نفوذ</li> <li>• نفوذ دانه جوش</li> <li>• میزان رسوب</li> </ul> |
|                                | ابعاد دانه ها                 |                       |  |
|                                | شرایط سطح                     |                       |  |
|                                | نقصهای سطح                    |                       |  |
| الکتروود                       | شکل الکتروود                  |                       | چک کردن کیفیت  |
|                                | درجه حرارت الکتروود           |                       |  |
|                                | میزان نفوذ                    |                       |  |
|                                | میزان نفوذ دانه جوش           | ردگیری شکاف جوشکاری   |  |
|                                | شکل دانه ها                   |                       |  |
|                                | ابعاد دانه ها                 |                       |  |
| ماده پایه                      | درجه حرارت                    | کنترل موقعیت انبر جوش |  |
|                                | خصوصیات متالورژیکی            |                       | تشخیص موارد غیر عادی   |

دوربین های CCD با توجه به قدرت تفکیک رنگ و روشنایی بالا، توانایی مشاهده انواع تغییرات در کیفیت جوش را از روی اطلاعات مربوط به روشنایی و رنگ دارند. به طور مثال بدست آوردن ابعاد قطعه کار، ابعاد شکاف، عیب های شکاف و درجه حرارت حوضچه جوش و غیره از توانایی های دوربین های CCD می باشد. و اکنون با پیشرفت تکنولوژی فیلترینگ و پردازش تصویر، می توان با به کار گرفتن کارایی های اینگونه از حسگرها تصاویر با کیفیت بالا برای اهداف مختلف در جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن با گاز خنثی<sup>۱</sup> و جوشکاری قوس الکتریکی در پناه گاز محافظ<sup>۲</sup> استفاده کرد.

جدول (۴-۵) مقایسه بین متغیرهای قابل اندازه گیری در حسگر لیزری و تصویری

| مورد اندازه گیری | مواردی که اندازه گیری می شوند                                       | حسگر           |                |
|------------------|---|----------------|----------------|
|                  |   | لیزری          | تصویری         |
| شکاف             | ابعاد هندسی شکاف  | عملی           | عملی           |
|                  | فاصله با شکاف   | عملی           | عملی           |
|                  | شرایط سطح (آلوده ، روغنی ، رنگی)                                    | غیر عملی       | عملی           |
| دانه جوش         | شکل هندسی   | عملی           | عملی           |
|                  | شرایط سطح (بی شکل ، اکسید شده ، ضخامت)                              | غیر عملی       | عملی           |
|                  | موارد غیر عادی بودن سطح (روی هم آمدن لبه دو ورقه ، قوسدار بودن سطح) | عملی           | عملی           |
|                  | موارد غیر عادی بودن سطح (چاله دار ، شکستگی)                         | عملی اما محدود | عملی           |
| الکتروود و سیم   | شکل هندسی   | غیر عملی       | عملی           |
| استخر جوش        | شکل هندسی   | غیر عملی       | عملی           |
|                  | توزیع حرارتی  | غیر عملی       | عملی اما محدود |
| قوس الکتریکی     | شکل و شرایط   | غیر عملی       | عملی           |

<sup>1</sup> Tungsten inert gas (TIG)

<sup>2</sup> Metal inert gas (MIG)

به دنبال این پیشرفت ها، اکنون به نقطه ای رسیده ایم که اطلاعات بدست آمده از تکنولوژی اندازه گیری را نه تنها برای ردگیری شکاف بلکه در کنترل تطبیقی پارامترهای جوش و کنترل کیفیت جوش به کار ببریم. مخصوصاً از وقتی که در سالهای اخیر دوربین های CCD کوچکتر شده و قیمت آنها پایین تر آمده است. علاوه بر آن سیستم پردازشگر تصویر آنها بسیار سریعتر شده است. بنابراین کاربرد حسگرهای تصویری برای کنترل پارامترهای جوشکاری اتوماتیک و چک کردن کیفیت جوش در طی جوشکاری گسترش یافته است.

اگرچه هر دو این حسگرها یعنی لیزری و تصویری اطلاعات مورد نیاز را با مشاهده خارجی یعنی بدون تماس فیزیکی با قطعه کار بدست می آورند، توانایی چک کردن کیفیت جوش را در طی فرآیند جوشکاری دارند. و این امر بسیار مهم خواهد بود که با توسعه روش های موجود، اطلاعات داخلی پدیده جوشکاری (نفوذ جوش، زمان وقوع قوس، وجود نقصانها و معایت در جوش) را در زمان واقعی و به طور مستقیم بدست آوریم.

در جدول (۵-۵) دو نوع از مهمترین حسگرهای لیزری که در جوشکاری استفاده می شوند، آورده شده است که نوع نقطه ای آن به دو دسته اسکن مکانیکی و اسکن آینه ای تقسیم می شود. اولی از روش اندازه گیری شکل سطح مقطع عرضی قطعه کار، با به کارگیری لیزر نقطه ای برای بدست آوردن تغییر فاصله از قطعه استفاده می کند و خود به دو گونه تقسیم می شود که عملکرد هر یک متفاوت از دیگری می باشد. دومی در طول شکاف حرکت می کند و از لیزر خطی برای بدست آوردن انحراف شکاف استفاده می کند.

جدول (۵-۵) مقایسه دو نوع از حسگرهای لیزری

|                    | حسگر لیزری نقطه ای |                        | حسگر لیزری خطی |
|--------------------|--------------------|------------------------|----------------|
|                    | نوع اسکن مکانیکی   | نوع اسکن آینه ای       |                |
| اجزاء اندازه گیری  | PSD , MOS , CCD    | دوربین CCD خطی         | دوربین CCD     |
| نوع اسکن           | حرکت مکانیکی       | چرخش آینه اسکنر و غیره | لازم ندارد     |
| سرعت اسکن          | آرام               | سریع                   | سریع           |
| سرعت پردازش        | آرام               | سریع                   | سریع           |
| تأثیر از شرایط سطح | کم                 | کم                     | زیاد           |
| قیمت               | پایین              | بالا                   | متوسط          |

# فصل ششم

## کنترل ربات بر مبنای خطی سازی فیدبکی

### ۱-۶- روش های کنترل ربات در فضای دکارتی

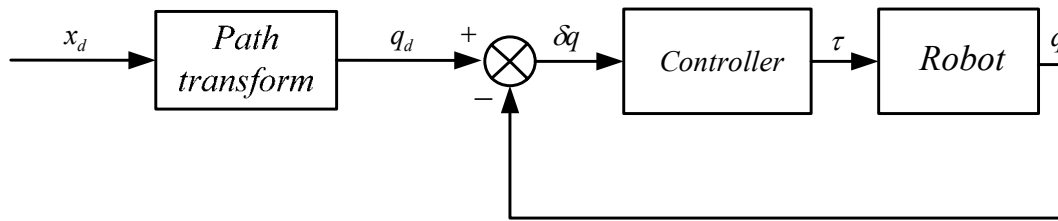
در روش های کنترل بازوی ماهر مکانیکی، معمولاً فرض می شود که مسیر مورد نظر برحسب توابع زمانی موقعیت، سرعت و شتاب مفصل معلوم است. با داشتن این ورودی های مورد نظر، روش های کنترل ربات در فضای مفصلی که بر اساس تفاضل موقعیت و سرعت اندازه گیری شده با موقعیت و سرعت مفصلی مطلوب می باشند، قابل پیاده سازی هستند. اما در بسیاری موارد می خواهیم که مجری نهایی خط مستقیم و یا مسیر هایی با شکل توصیف شده در فضای کار ربات را دنبال کند. شکل (۱-۶) نحوه ساده تبدیل مسیرهای طراحی شده در فضای دکارتی به مسیرهای فضای مفصلی را بیان می کند. مزیت این روش در به کار بردن قوانین کنترل فضای مفصلی برای ردگیری مسیر مطلوب دکارتی خواهد بود. محاسبات لازم برای این تبدیل، بصورت زیر است [۳۵].

$$q_d = IKin(x_d) \quad (1-6)$$

$$\dot{q}_d = J^{-1}\dot{x}_d \quad (2-6)$$

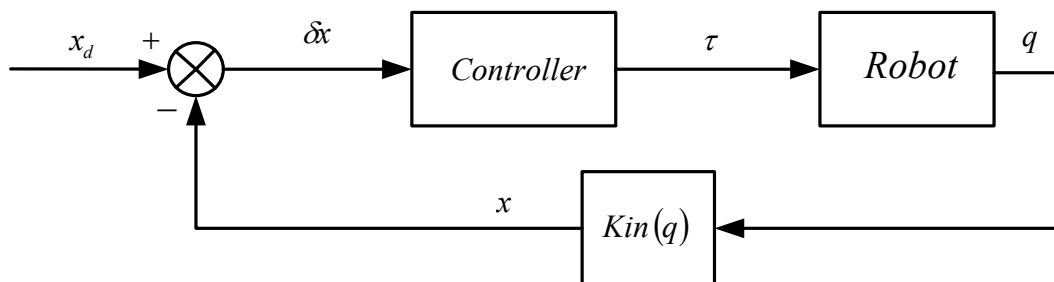
$$\ddot{q}_d = J^{-1}\ddot{x}_d - J^{-1}\dot{J}J^{-1}\dot{x}_d \quad (3-6)$$

که در آن  $x_d$  بردار متغیرهای مطلوب در فضای دکارتی است. در این روش موقعیت مفصلی مطلوب معمولاً توسط سینماتیک معکوس بدست می آید اما سرعت و شتاب مفصلی مطلوب به طور عددی به وسیله تفاضل های اول و دوم محاسبه می شوند (تعریف مشتق  $f \cong \frac{f(t) - f(t - \Delta t)}{\Delta t}$ ) محاسبه می شوند، ولی چنین مشتقگیری عددی باعث تقویت نویز و ایجاد تاخیر می شود. همچنین به علت وجود عدم قطعیت در سینماتیک و ژاکوبین حتی اگر کنترلر مفصلی،  $q$  را به موقعیت مفصلی مطلوب برساند نمی توان ادعا کرد که به نقطه مورد نظر در فضای دکارتی رسیده ایم.



شکل (۱-۶) روش کنترل فضای مفصلی با ورودی مسیر دکارتی

در نتیجه دو راه پیش رو خواهیم داشت، پیدا کردن روشی که محاسبات را ساده تر کند یا روش کنترلی متفاوتی که نیاز به اطلاعات فوق نداشته باشد. یکی از زمینه های کاری در این پایان نامه اصلاح مشکلات موجود در این شیوه کنترلی، و ارائه یک روش جدید برای از بین بردن خطای وارد شده به سیستم است که به طور کامل در فصل بعد به آن می پردازیم. در شکل بسیار ساده تر روشی که به ذهن می رسد تبدیل موقعیت و سرعت مفصلی اندازه گیری شده و تبدیل آنها به موقعیت و سرعت دکارتی و فیدبک آن به سیستم می باشد که با این کار می توان خطای فضای دکارتی را ایجاد کرده و سیستم کنترل بر مبنای آن موقعیت و سرعت مجری نهایی را اصلاح کند.



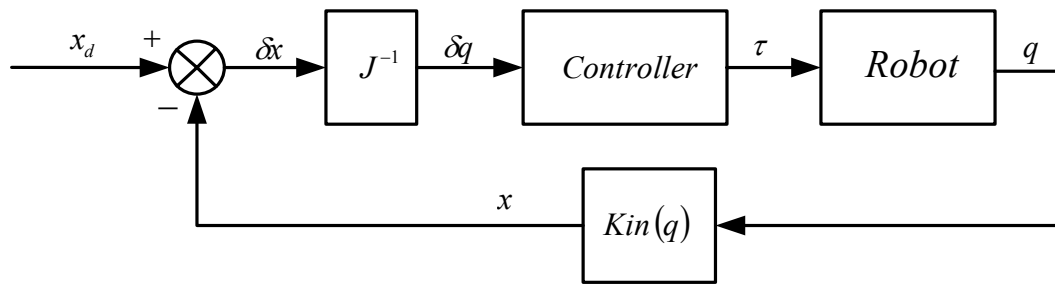
شکل (۲-۶) مفهوم روش کنترل مبتنی بر مختصات دکارتی

در شکل (۲-۶)، بردار متغیرهای فضای دکارتی  $[x \ y \ z]^T$  مربوط به موقعیت مجری نهایی است. با توجه به این که ورودی های ربات از جنس فضای مفصلی می باشند بنابراین باید به گونه ای فرمان های فضای دکارتی را به فرمان های مفصلی تبدیل کرد. برای انجام این کار، دو شیوه کنترل وجود دارد که به نام های کنترل کننده ژاکوبین وارون و کنترل کننده ژاکوبین ترانهاد می باشند. در کنترل ژاکوبین وارون که بلوک دیاگرام کنترلی آن را در شکل (۳-۶) مشاهده می کنید با تقریبی که از رابطه بین سرعت های فضای مفصلی و دکارتی بدست می آوریم می توانیم خطای دکارتی را به خطای مفصلی تبدیل کنیم (اگر خطا کم باشد تقریب مناسب خواهد بود).

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (۴-۶)$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = J \frac{\partial q}{\partial t} \approx \frac{\delta x}{\delta t} = J \frac{\delta q}{\delta t} \quad (۵-۶)$$

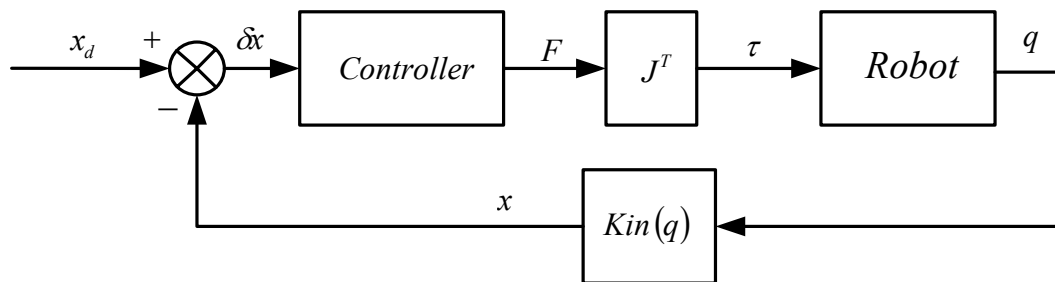
$$\Rightarrow \delta q = J^{-1} \delta x \quad (۶-۶)$$



شکل (۳-۶) روش کنترل دکارتی با ژاکوبین وارون

در کنترل ژاکوبین ترانهاده که بلوک دیاگرام کنترلی آن را در شکل (۴-۶) مشاهده می کنید با توجه به این که کار انجام شده توسط نیروی خطی با کار انجام شده توسط نیروی دورانی باهم برابرند می توان رابطه بین نیرو و گشتاور را به صورت زیر بدست آورد که جزئیات بدست آوردن آن را می توانید در [۳۵] جستجو کنید.

$$\tau = J^T F \quad (۷-۶)$$



شکل (۴-۶) روش کنترل دکارتی ژاکوبی ترانهاده

## ۲-۶- خطی سازی فیدبکی

یک ربات  $n$  - رباط دارای معادلات دینامیکی کاملاً غیرخطی است که با چند ورودی بیان می شود. تعیین شرایط خطی سازی فیدبکی برای سیستم های چند ورودی نسبت به یک ورودی سخت تر است اما ایده آن همان است که در حالت یک ورودی به کار می رود. سیستم مختصات را می توان آنچنان دید که غیرخطی ها بتوانند به طور کامل با یک یا چند ورودی ، کاملاً حذف شوند. همچنین در سیستم های چند ورودی می توانیم سیستم را مجزا کنیم و خطی سازی سیستم به طریقی انجام شود که سیستم خطی حاصل، شامل چند سیستم داخلی باشد و هر کدام به وسیله یکی از ورودی های کنترل حلقه بیرونی تحریک شوند. اغلب نیازی به نتایج کلی در خطی سازی فیدبکی چند ورودی نخواهیم داشت زیرا فقط علاقمند به کاربرد این ایده ها برای کنترل بازوی ماهر هستیم. در عوض از مفهوم فیزیکی حاکم بر دستاوردهای این نتیجه، در حالت تک ورودی برای بدست آوردن یک کنترل خطی سازی فیدبکی برای بازو ماهر اسکارا استفاده خواهیم کرد.

## ۶-۲-۱- خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی

در این قسمت برای سادگی، خطی سازی را در فرم کلی معادلات دیفرانسیل ربات که در (۳-۱۷) بدست آمد

[۳۶].

$$M(q)\ddot{q}+h(q,\dot{q})=v \quad (۸-۶)$$

انجام می دهیم و با انتخاب قانون کنترل زیر و اعمال آن در معادله (۸-۶) خواهیم داشت

$$v = M(q)v' + h(q,\dot{q}) \quad (۹-۶)$$

$$\ddot{q} = v' \quad (۱۰-۶)$$

حال می توان با انتخاب قانون کنترل حلقه خارجی به صورت یک قانون کنترل خطی و انتخاب مناسب گین ها به صورت میرایی بحرانی برای هر مفصل به صورت  $K_{Di} = 2\sqrt{K_{pi}}$  به پایداری مجانبی رسید.

$$v' = \ddot{q}_d + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q) \quad (۱۱-۶)$$

$$\ddot{q} = \ddot{q}_d + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q) \quad (۱۲-۶)$$

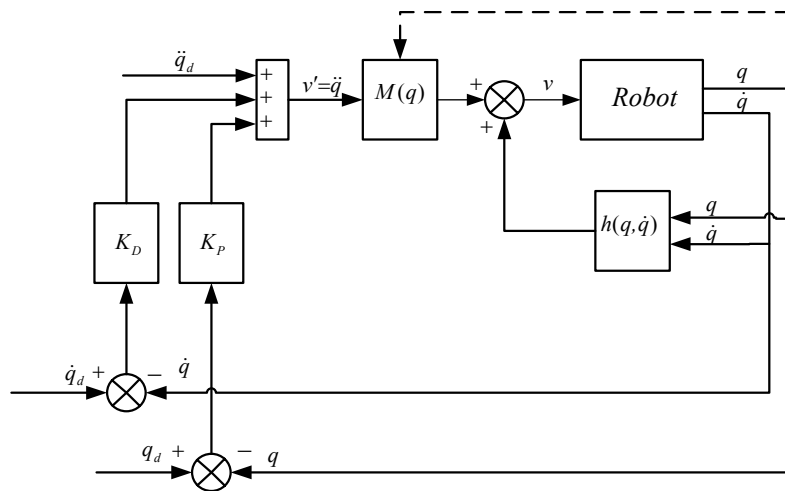
با تعریف خطا به صورت

$$e = (q - q_d) \quad (۱۳-۶)$$

داریم

$$\ddot{e} + K_D\dot{e} + K_P e = 0 \quad (۱۴-۶)$$

که در آن  $K_D$  و  $K_P$  ماتریس های قطری هستند که گین های روی قطر اصلی متناظر با گین های تناسبی و مشتق گیر برای هر مفصل ربات است. بنابراین در  $t$  به سمت بی نهایت خطا صفر می شود. در شکل (۶-۵) بلوک دیاگرام کنترل ربات به شیوه خطی سازی فیدبکی در فضای مفصلی نمایش داده شده است.



شکل (۵-۶) خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی

### ۲-۲-۶- خطی سازی فیدبکی فضای دکارتی

با توجه به این که معادلات ربات در فضای مفصلی می باشد اگر بخواهیم خطی سازی فیدبکی را در فضای دکارتی انجام دهیم، باید معادلات دینامیکی را در فضای دکارتی بدست آوریم. با توجه به رابطه بین سرعت های مفصلی و دکارتی که همان ژاکوبین سرعت خطی است می توانیم بنویسیم.

$$\dot{x} = J\dot{q} \Rightarrow \dot{q} = J^{-1}\dot{x} \quad (۱۶-۶)$$

$$\ddot{x} = \dot{J}\dot{q} + J\ddot{q} \quad (۱۷-۶)$$

$$\Rightarrow \ddot{q} = J^{-1}(\ddot{x} - \dot{J}\dot{q}) \quad (۱۸-۶)$$

توجه داشته باشید که ماتریس ژاکوبین برای ربات اسکارا با سه مفصل  $3 \times 3$  می باشد، بنابراین به جز نقاط تکین معکوس پذیر خواهد بود.

با توجه به معادله دینامیکی ربات در (۸-۶) و استفاده از تبدیل زیر

$$v = J^T v_x \quad (۱۹-۶)$$

و جایگزینی (۱۸-۶) در (۸-۶) داریم

$$M(q)J^{-1}\ddot{x} - M(q)J^{-1}\dot{q} + h(q, \dot{q}) = J^T v_x \quad (۲۰-۶)$$

و با پیش ضرب  $J^{-1}$  در (۲۰-۶) بدست می آید



$$J^{-T}M(q)J^{-1}\ddot{x} - J^{-T}M(q)J^{-1}J\dot{q} + J^{-T}h(q, \dot{q}) = v_x \quad (21-6)$$

حال با انتخاب  $M_x(q) = J^{-T}M(q)J^{-1}$  و  $h_x(q, \dot{q}) = J^{-T}M(q)J^{-1}J\dot{q} + J^{-T}h(q, \dot{q})$  معادلات دینامیکی ربات در فضای دکارتی را به صورت زیر می توان نوشت

$$M_x(q)\ddot{x} + h_x(q, \dot{q}) = v_x \quad (22-6)$$

حال با انتخاب قانون کنترل به صورت زیر، می توان خطی سازی فیدبکی در فضای دکارتی را انجام داد

$$v_x = M_x(q)v'_x + h_x(q, \dot{q}) \quad (23-6)$$

$$\ddot{x} = v'_x \quad (24-6)$$

در این حالت با انتخاب قانون کنترل خطی در فضای دکارتی به صورت

$$v'_x = \ddot{x}_d + K_D(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_P(x_d - x) \quad (25-6)$$

و اعمال آن در (۲۴-۶) خواهیم داشت

$$\ddot{x} = \ddot{x}_d + K_D(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_P(x_d - x) \quad (26-6)$$

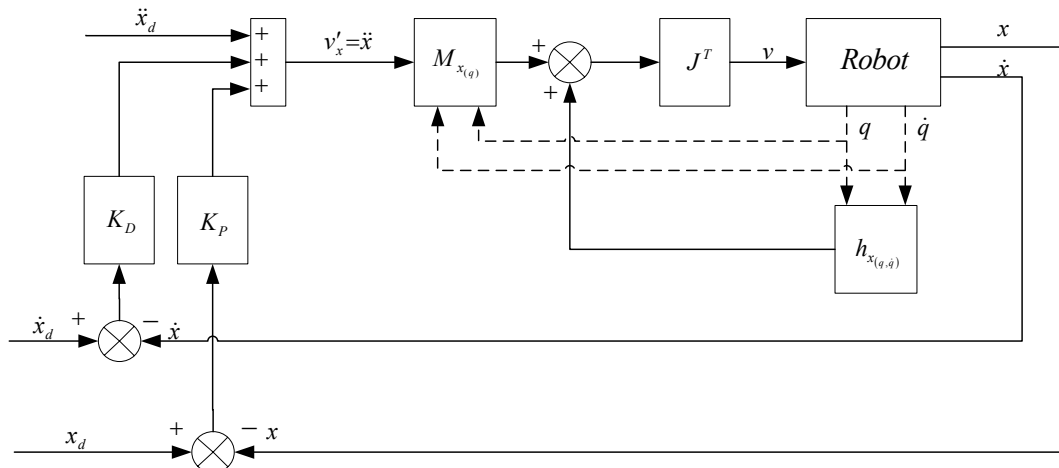
با تعریف خطای ردگیری در فضای دکارتی به صورت

$$e_x = (x - x_d) \quad (27-6)$$

نتیجه می شود

$$\ddot{e}_x + K_D\dot{e}_x + K_P e_x = 0 \quad (28-6)$$

که در آن  $K_D$  و  $K_P$  ماتریس های قطری هستند که گین های روی قطر اصلی متناظر با گین های تناسبی و مشتق گیر است. بنابراین در  $t$  به سمت بی نهایت خطا صفر می شود. در شکل (۶-۶) بلوک دیاگرام کنترل ربات به شیوه خطی سازی فیدبکی در فضای دکارتی نمایش داده شده است.



شکل (۶-۶) خطی سازی در فضای دکارتی

### ۳-۶- بررسی عدم قطعیت های موجود در سیستم کنترل

#### ۱-۳-۶- عدم قطعیت ناشی از مدل کردن ربات

با توجه به اینکه شیوه خطی سازی فیدبکی یک روش کنترل بر مبنای مدل می باشد بنابراین بنا به قوانین کنترلی (۹-۶) نیاز به دانستن دینامیک دقیق ربات، که همان پارامترهای  $M(q)$  و  $h(q, \dot{q})$  هستند، داریم. اما به دلیل وجود عدم قطعیت هرگز به طور دقیق نمی توانیم آنها را بدست بیاوریم. بنابراین باید آنها را تخمین بزنیم که به دو گونه انجام می شود. در حالت اول با روش های تقریبی  $M(q)$  و  $h(q, \dot{q})$  را تخمین می زنند که به عدم قطعیت غیر ساختاری یا دینامیک های مدل نشده در سیستم ها معروف است که از جمله آنها می توان به اثر اصطکاک در مفصل ها  $F(\dot{q})$  اشاره کرد. در حالت دوم با دانستن دینامیک  $M(q)$  و  $h(q, \dot{q})$  فقط پارامترهای آنها تخمین می زنند که به عدم قطعیت ساختاری یا پارامتری در سیستم ها معروف است. از طرفی سیستم کنترل با اغتشاش های خارجی مواجه است که از جمله آنها وجود لقی و خلاصی در چرخ دنده ها می باشد. بنابراین مدل دینامیکی ربات در (۸-۶) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + T_d = v \quad (۲۹-۶)$$

که در آن  $T_d$  مجموع تمامی اغتشاش های خارجی و دینامیک های مدل نشده در ربات می باشد. حال قانون کنترل (۹-۶) با توجه به وجود عدم قطعیت پارامتری به صورت زیر بازنویسی می شود

$$v = \hat{M}(q)v' + \hat{h}(q, \dot{q}) \quad (۳۰-۶)$$

که در آن  $\hat{M}(q)$  و  $\hat{h}(q, \dot{q})$  تخمین های در نظر گرفته شده برای  $M(q)$  و  $h(q, \dot{q})$  هستند. در این صورت با اعمال (۳۰-۶) در (۲۹-۶) خواهیم داشت

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + T_d = \hat{M}(q)v' + \hat{h}(q, \dot{q}) \quad (۳۱-۶)$$

$$\Rightarrow \ddot{q} = M^{-1}(q)\hat{M}(q)v' + M^{-1}(q)(\hat{h}(q, \dot{q}) - h(q, \dot{q}) - T_d) \quad (۳۲-۶)$$

حال با کمی ساده سازی در (۳۲-۶)، آنرا به صورت زیر مرتب می کنیم

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)\hat{M}(q)v' + M^{-1}(q)(\hat{h}(q, \dot{q}) - h(q, \dot{q}) - T_d) + v' - v' \quad (۳۳-۶)$$

$$\ddot{q} = v' + (M^{-1}(q)\hat{M}(q) - I)v' + M^{-1}(q)(\hat{h}(q, \dot{q}) - h(q, \dot{q}) - T_d) \quad (۳۴-۶)$$

$$\Rightarrow \ddot{q} = v' + \eta \quad (۳۵-۶)$$

که در آن  $\eta$  مجموع تمامی عدم قطعیت ها بوده و به صورت زیر می باشد

$$\eta = (M^{-1}(q)\hat{M}(q) - I)v' + M^{-1}(q)(\hat{h}(q, \dot{q}) - h(q, \dot{q}) - T_d) \quad (۳۶-۶)$$

همان طور که دیده می شود معادله (۳۵-۶) در مقایسه با (۶-۱۰) یک ترم دیگر علاوه بر ورودی کنترلی دارد که ناشی از همان عدم قطعیت در تخمین دینامیک ربات، دینامیکهای مدل نشده و اغتشاشات خارجی می باشد. در ادامه با استفاده از قانون کنترل حلقه خارجی که یک قانون کنترل خطی تناسبی، مشتقی (PD) می باشد، می توان معادلات دینامیکی خطا را بدست آوریم.

$$v' = \ddot{q}_d + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q) \quad (۳۷-۶)$$

$$\ddot{q} = \ddot{q}_d + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q) + \eta \quad (۳۸-۶)$$

$$e = (q - q_d) \quad (۳۹-۶)$$

$$\Rightarrow \ddot{e} + K_D\dot{e} + K_P e = \eta \quad (۴۰-۶)$$

به علت ظاهر شدن ترم  $\eta$  ناشی از عدم قطعیت ها در  $t$  به سمت بینهایت خطا صفر نمی شود. خطی سازی فیدبکی در فضای دکارتی با حضور عدم قطعیت های ناشی از تخمین مدل، اغتشاشات خارجی و دینامیک های مدل نشده نیز نتیجه ای مشابه خواهد داشت.

در نتیجه همان طور که دیده می شود با وجود عدم قطعیت در مدل کردن دینامیک های ربات و اغتشاشات خارجی خطای ردگیری حتی با انتخاب مقادیر مناسب ماتریس های  $K_D$  و  $K_P$  به گونه ای که قطب های معادلات

دینامیکی خطا در سمت چپ محور  $j\omega$  باشد، صفر نمی شود و چون  $\eta$  یک اغتشاش متغیر با زمان و است ممکن است سیستم را ناپایدار کند که البته بستگی به میزان عدم قطعیت دارد که اگر خطای تخمین و اغتشاشات خارجی کم باشد باعث می شود که نرم  $\eta$  کم شده و کنترل کننده خطی بتواند سیستم را پایدار نگه دارد. ولی اگر خطای تخمین و اغتشاشات خارجی زیاد باشد و ربات هم بخواهد در سرعت های بالا کار کند آنگاه مقدار نرم  $\eta$  زیاد شده و کنترل کننده خطی نمی تواند به تنهایی سیستم را پایدار کند. همان طور که دیده می شود خطای ناشی از عدم قطعیت در مدل زمانی اتفاق می افتد که قوانین کنترل استفاده شده بر مبنای مدل<sup>۱</sup> سیستم تحت کنترل باشند که ما را ناگزیر از استفاده مدل دینامیکی سیستم در قانون کنترل کند. بنابراین استفاده از کنترل کننده های مقاوم، چه کنترل کننده های بر مبنای مدل [۷۷، ۷۸] و چه کنترل کننده های آزاد از مدل<sup>۲</sup> مانند فازی [۲۹]، شبکه عصبی [۸۱] و غیره، برای تضمین پایداری سیستم ضرورت پیدا می کند.

### ۶-۳-۲- اغتشاش ناشی از عدم قطعیت در سینماتیک و ژاکوبین

ماتریس های سینماتیک و ژاکوبین خود متشکل از پارامترهای ساختاری ربات می باشند (مانند طول و جرم بازوها)، بنابراین اگر تخمین پارامترهای ربات با خطا همراه باشد این ماتریس ها هم به صورت غیر دقیق بدست می آیند. اغتشاش ناشی از این سینماتیک و ژاکوبین در سیستم کنترل ربات زمانی ظاهر می شوند که قصد کنترل ربات را در فضای دکارتی داشته باشیم. چرا که معادلات دینامیکی ربات کاملاً در فضای مفصلی می باشند و اگر بخواهیم موقعیت و جهت مجری نهایی را مستقیماً در فضای دکارتی کنترل کنیم، بسته به نوع قانون کنترل ماتریس ها سینماتیک و ژاکوبین ظاهر خواهند شده که وجود عدم قطعیت در آنها باعث انتشار خطا در کل سیستم می شود. مانند فرمول بندی که در قسمت قبل انجام دادیم می توان معادلات دینامیکی خطای سیستم را در فضای دکارتی با توجه به نوع قانون کنترل و بلوک دیاگرام استفاده شده به دست آورد و نشان داد که اگر ماتریس های سینماتیک و ژاکوبین دارای عدم قطعیت باشند آنگاه خطای ردگیری موقعیت و جهت مجری نهایی در  $t \rightarrow \infty$  صفر نخواهد شد. برای مقابله با عدم قطعیت در ژاکوبین روش هایی ارائه شده است [۲۴، ۷۳، ۲۳].

<sup>۱</sup> Model Base

<sup>۲</sup> Model Free

# فصل هفتم

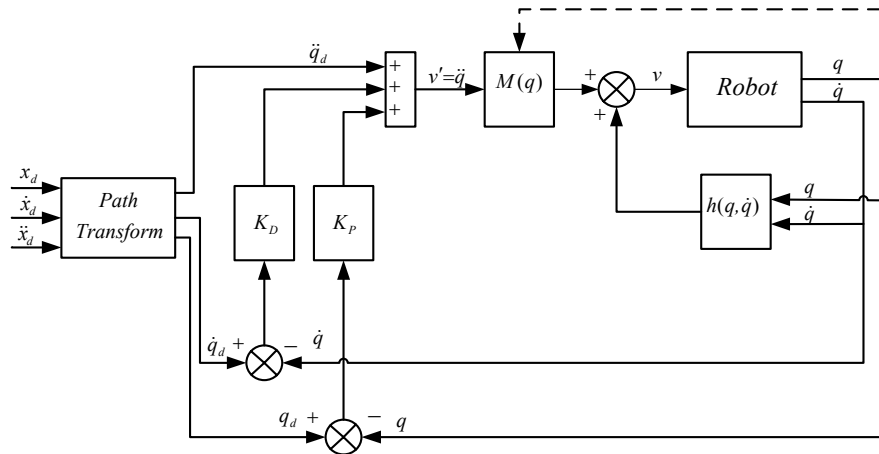
## شبیه سازی سیستم کنترل ربات

حال با توجه به این که سیگنال های مرجع برای ردگیری توسط مجری نهایی در فضای دکارتی هستند، روشهای کنترل ربات در فضای دکارتی که در بخش (۱-۶) مطرح شدند را می توان با استفاده از روش خطی سازی فیدبکی و کنترل فازی پیاده سازی کرد که هر یک را بررسی می کنیم. در شبیه سازی ها از یک ربات اسکارای صنعتی به نام Bosch-SR60 [۸۴] برای جوشکاری بر روی سطح افق استفاده شده است که جزئیات آن در پیوست آورده شده است.

### ۱-۷- خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی و کنترل خطی در فضای مفصلی با ورودی مسیر دکارتی

با توجه به شکل (۱-۶) برای کنترل ربات در فضای دکارتی با استفاده از خطی سازی فیدبکی و کنترل خطی در فضای مفصلی می توان سیستم کنترل را به صورت شکل (۱-۷) پیاده سازی کرد. در این روش با استفاده از (۶-۱) تا (۳-۶) سیگنال های مرجع دکارتی را به مفصلی تبدیل می کنیم.

بنا به بازدید از بخش جوشکاری رباتیک شرکت ایران خودرو روش کنترل فضای مفصلی با ورودی مسیر دکارتی که در شکل (۱-۶) مطرح شد در ربات های صنعتی جوشکار استفاده می شود با توجه به اینکه ربات های صنعتی بسیار دقیق و با کمترین خطای تخمین ساخته می شوند، این شیوه کنترلی در عین سادگی عملکرد بسیار خوبی دارد. اگر عدم قطعیت ها در ساخت ربات زیاد باشد با استفاده از کنترل کننده های مقاوم می توانیم خطای ایجاد شده در حلقه کنترل را کاهش دهیم. در اینجا با توجه به (۱-۶) تا (۳-۶) این عدم قطعیت خود را در سینماتیک وارون نیز ظاهر می کند. بنابراین به فرض که بتوانیم به خوبی سیگنال های مرجع مفصلی را با کمترین خطای ممکن با وجود عدم قطعیت ردگیری کنیم، به دلیل نبود فیدبک از موقعیت و سرعت مجری نهایی قطعاً به نقطه مورد نظر در فضای کار نخواهیم رسید.

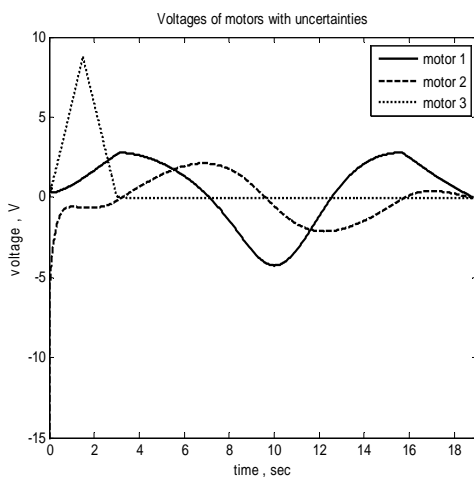


شکل (۷-۱) خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی و کنترل خطی در فضای مفصلی با فرمان دکارتی

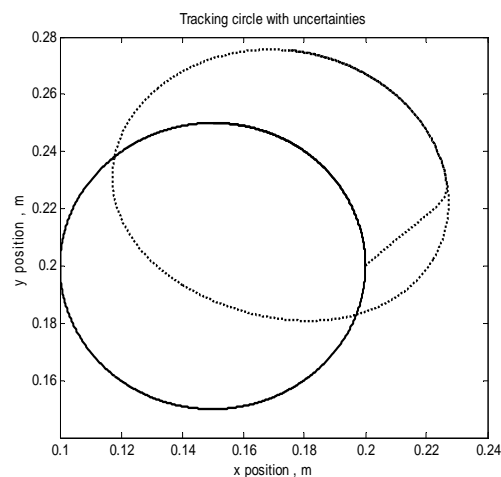
نتایج شبیه سازی: به منظور در نظر گرفتن تأثیر عدم قطعیتها در کار سیستم کنترل عدم قطعیت پارامتری را به صورت  $\hat{h} = 0.95h$ ،  $\hat{M} = 0.95M$  برای مدل دینامیکی،  $\hat{q}_{dd} = 0.95q_{dd}$ ،  $\hat{q}_{d\dot{}} = 0.95q_{d\dot{}}$  و  $\hat{q}_d = 0.95q_d$  را برای مدل سینماتیکی و  $\hat{J} = 0.95J$  را برای مدل ژاکوبین در مبدل مسیر فرض می کنیم. همچنین برای اثر اغتشاش خارجی و اصطکاک از مدل های زیر استفاده کرده ایم [۸۱].

$$\text{disturbances} = [2 \sin(5t) + 1 \quad \sin(5t) + 1 \quad 2\sin(5t) + 1]^T \quad (۷-۱)$$

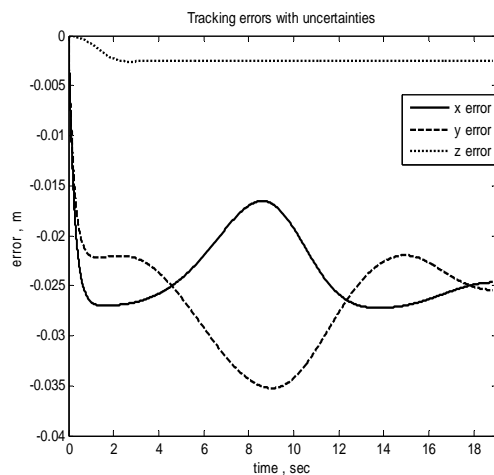
$$\text{friction} = [20q_1 + .8\text{sgn}(q_1) \quad 4q_2 + 0.16\text{sgn}(q_2) \quad 20q_1 + .8\text{sgn}(q_1)]^T \quad (۷-۲)$$



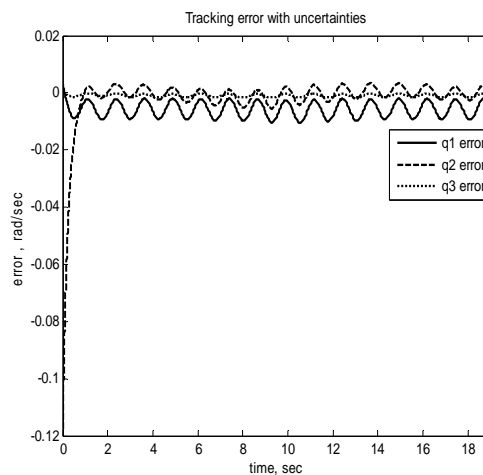
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۲-۷) رفتار سیستم با وجود عدم قطعیت، (الف) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ب) ولتاژ موتورها، (ج) خطای ردیابی متغیرهای مفصلی، (د) خطای ردیابی متغیرهای دکارتی

این نتایج با  $K_p = 800$  و  $K_d = 200$  بدست آمده است.

**نتیجه گیری:** خطای ردگیری در فضای مفصلی در شکل (۲-۷-ج) نمایش داده شده است. همانطور که دیده می شود به خاطر وجود عدم قطعیت ها و ضعف کنترلر تناسبی، مشتقی PD ردگیری مناسبی در فضای مفصلی انجام نشده است. این مسئله خود باعث ایجاد خطا در ردگیری مسیر مطلوب در فضای دکارتی می شود که در شکل (۲-۷-الف) و (۲-۷-د) مشاهده می شود. در بخش بعدی برای رفع این مشکل کنترل مقاوم به روش مود لغزشی را طراحی و پیاده سازی می کنیم.

### ۲-۷- طراحی کنترل مقاوم

پس از انجام خطی سازی به صورتی که در پیش آورده شده است به معادلاتی به فرم

$$\ddot{q} = v' + \eta \quad (3-7)$$

می رسیم که  $\eta$  شامل تمامی عدم قطعیت های موجود در خطی سازی می باشد که در (۶-۳۶) آورده شده است. حال می خواهیم با استفاده از شیوه کنترل مود لغزشی که به عنوان یک روش کنترل مقاوم در نظر گرفته می شود [۳۴]، پایداری سیستم را در برابر وجود عدم قطعیت های بیان شده بررسی کنیم. بنابراین با تعریف خطا به صورت زیر خواهیم داشت.

$$e = q - q_d \quad (4-7)$$

$$S = \dot{e} + \lambda e \quad (5-7)$$

که در آن  $S$  سطح لغزش و  $\lambda$  شیب سطح لغزش بوده و عددی مثبت است و در سرعت صفر شدن خطا موثر است [۳۴]. حال با استفاده از تغییر متغیر زیر

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d - \lambda e \quad (6-7)$$

سطح لغزش را می توان به فرم زیر بازنویسی کرد.

$$S = \dot{e} + \lambda e = \dot{q} - \dot{q}_r \quad (7-7)$$

بنابراین ورودی کنترل معادل را می توان با مشتقگیری از  $S$  و مساوی صفر قرار دادن (شرط ماندن بر روی سطح) آن به صورت زیر بدست آورد.

$$\dot{S} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} \quad (8-7)$$

$$\dot{S} = 0 \Rightarrow \ddot{q} - \ddot{q}_r = 0 \quad (9-7)$$

با جایگذاری  $\ddot{q}$  از (۷-۳) داریم.

$$\widehat{v}' = \ddot{q}_r \quad (10-7)$$

توجه شود که  $\eta$  به عنوان یک اغتشاش نامعلوم در سیستم بعد از خطی سازی فیدبکی می باشد و به همین دلیل در محاسبه  $\widehat{v}'$  نباید استفاده شود.

با توجه به وجود عدم قطعیت ورودی کنترل معادل در (۷-۱۰) به تنهایی قادر به پایدار سازی سیستم نمی باشد. بنابراین با اضافه کردن یک جمله سوئیچینگ، ورودی کنترلی را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$v' = \widehat{v}' - k_s \operatorname{sgn}(S) \quad (11-7)$$

که در آن  $k_s$  بهره سوئیچینگ می باشد و مقدار آن را می توان با استفاده از شرط پایداری لیپانوفی که تعبیر دیگری از شرط لغزشی می باشد محاسبه کرد. بنابراین تابع منتخب لیپانوف را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$V = 1/2 S^T M S \quad (12-7)$$

حال با توجه به شرط پایداری لیپانوفی یا همان شرط لغزشی مشتق تابع لیپانوف باید منفی باشد [۳۴]



$$\dot{V} \leq - \sum_{i=1}^n \psi_i |S_i| \quad (۱۳-۷)$$

که در آن  $\psi$  عددی مثبت است که در رسیدن مسیرها به سطح لغزش موثر است. بنابراین مشتق تابع لیاپانوف به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\dot{V} = S^T M \dot{S} + 1/2 S^T \dot{M} S \quad (۱۴-۷)$$

با جایگذاری  $\dot{S}$  از (۹-۷) و  $M$  از (۱۶-۳) و استفاده از (۳۱-۶) در (۱۴-۷) داریم

$$\dot{V} = S^T (\hat{M} v' + \hat{h} - h - T_d - M \ddot{q}_r) + 1/2 S^T K^{-1} \dot{D} S \quad (۱۵-۶)$$

حال با استفاده از (۱۱-۷) و (۱۳-۶) داریم

$$\begin{aligned} \dot{V} = S^T [\Delta M \ddot{q}_r + \hat{K}^{-1} (\hat{B} \dot{q} + \hat{g}) + \hat{K}^{-1} \hat{C} \dot{q} - K^{-1} (B \dot{q} + g) - K^{-1} C \dot{q} \\ - \hat{M} k_s \operatorname{sgn}(S) - T_d] + 1/2 S^T \dot{D} S \end{aligned} \quad (۱۶-۷)$$

با جایگذاری  $\dot{q}$  از (۷-۷) در  $K^{-1} C \dot{q}$  و داخل کردن شرط  $S = 0$  داریم

$$\begin{aligned} \dot{V} = S^T [\Delta M \ddot{q}_r + \hat{K}^{-1} (\hat{B} \dot{q}_r + \hat{g}) + \hat{K}^{-1} \hat{C} \dot{q}_r - K^{-1} (B \dot{q}_r + g) - K^{-1} C \dot{q}_r \\ - K^{-1} C S - \hat{M} k_s \operatorname{sgn}(S) - T_d] + 1/2 S^T \dot{D} S \end{aligned} \quad (۱۷-۷)$$

با تعریف  $h(q, \dot{q}_r)$  و  $\hat{h}(q, \dot{q}_r)$  به صورت

$$h(q, \dot{q}_r) = K^{-1} (B \dot{q}_r + g) - K^{-1} C \dot{q}_r \quad (۱۸-۷)$$

$$\hat{h}(q, \dot{q}_r) = \hat{K}^{-1} (\hat{B} \dot{q}_r + \hat{g}) + \hat{K}^{-1} \hat{C} \dot{q}_r \quad (۱۹-۷)$$

داریم

$$\dot{V} = S^T [\Delta M(q) \ddot{q}_r + \Delta h(q, \dot{q}_r) - \hat{M} k_s \operatorname{sgn}(S) - T_d] + 1/2 \dot{D} S - K^{-1} C S \quad (۲۰-۷)$$

از آنجایی که ماتریس  $(\dot{D} - 2C)$  یک ماتریس پادمتقارن است

$$1/2 S^T \dot{D} S - K^{-1} C S = 0 \quad (۲۱-۷)$$

بنابراین

$$\dot{V} = S^T [\Delta M(q)\ddot{q}_r + \Delta h(q, \dot{q}_r) - \hat{M}k_s \operatorname{sgn}(S) - T_d] \quad (۲۲-۷)$$

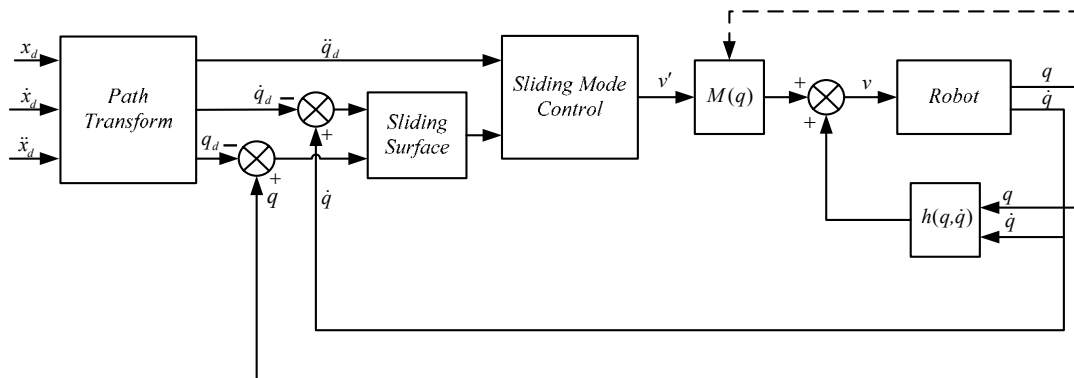
در این صورت با اعمال (۲۲-۷) در شرط لغزشی (۱۳-۷) داریم

$$S^T [\Delta M(q)\ddot{q}_r + \Delta h(q, \dot{q}_r) - T_d] - \sum_{i=1}^n \hat{M}_i k_{si} |S_i| \leq - \sum_{i=1}^n \psi_i |S_i| \quad (۲۳-۷)$$

بنابراین اندازه بهره سوئیچینگ را برای مقابله با عدم قطعیت به صورت زیر بدست آورد

$$k_{si} \geq |\hat{M}_i^{-1}| |\Delta M(q)\ddot{q}_r + \Delta h(q, \dot{q}_r)|_i + \|T_d\| + \psi_i \quad (۲۴-۷)$$

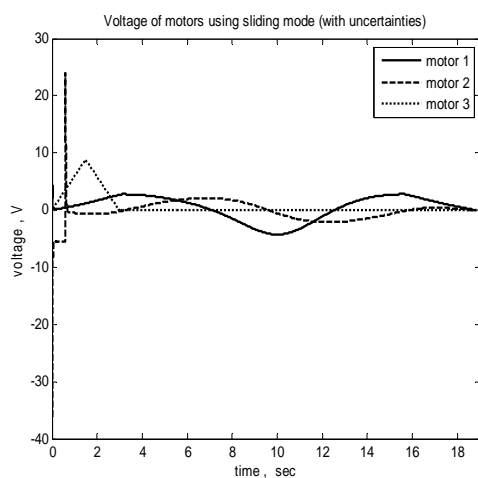
در شکل (۳-۷) بلوک دیاگرام کنترلی بر مبنای کنترل مقاوم نمایش داده شده است.



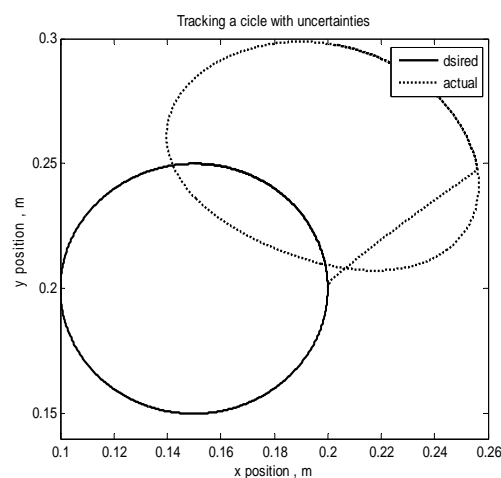
شکل (۳-۷) خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی، کنترل مقاوم در فضای مفصلی با ورودی مسیر دکارتی

نتایج شبیه سازی: در شبیه سازی از عدم قطعیت هایی که در بخش قبل در نظر گرفته شد استفاده می کنیم. با

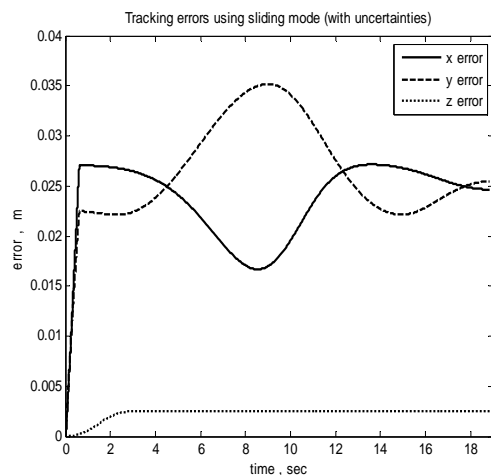
توجه به محدود بودن اغتشاش خارجی و اصطکاک در (۷-۱) و (۷-۲)،  $\|T_d\|=۲۵$  در نظر می گیریم.



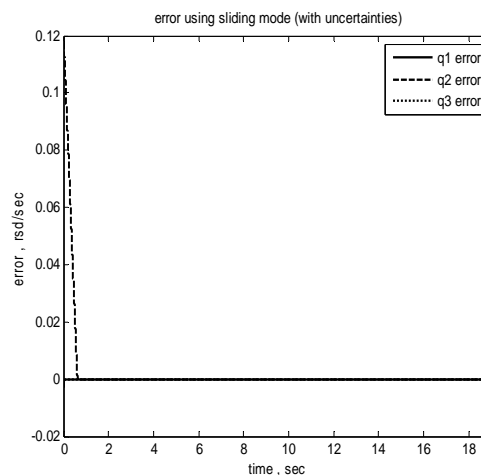
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۳-۷) با وجود عدم قطعیت و به کارگیری کنترلر مد لغزش (الف) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ب) ولتاژ موتورها، (ج) خطای ردگیری متغیرهای مفصلی، (د) خطای ردگیری متغیرهای دکارتی

**نتیجه گیری:** همانطور که در شکل (۳-۷-ج) مشاهده می کنید کنترل مقاوم به راحتی خطای مفصلی را به سمت صفر می برد ولی به دلیل اغتشاشی که در مبدل مسیر وجود دارد،  $q_d$  تولید شده متناظر با  $x_d$  واقعی نخواهد بود و چون کنترلر فیدبک مستقیمی از موقعیت و سرعت مجری نهایی ندارد هرگز کنترل کننده مقاوم فضای مفصلی این اغتشاش را حس نمی کند تا در صدد رفع آن برآید. که این مسئله در نتایج شبیه سازی به وضوح نمایان است. سیستم های کنترل فازی به عنوان یکی از شیوه های کنترل غیر خطی و همچنین به عنوان کنترل کننده های مستقل از مدل در مقابله با عدم قطعیت های غیر ساختاری و ساختاری و دفع اغتشاشات خارجی چه بر روی ربات ها و چه بر روی دیگر سیستم ها به صورت مقاوم عمل می کنند. بنابراین با توجه به ایده ای که در [۲۸] پیشنهاد دادیم، این مشکل را برطرف می کنیم.

### ۳-۷- دفع اغتشاش توسط هماهنگ کننده فازی<sup>۱</sup>

با استفاده از کنترل کننده فازی علاوه بر تطبیق فضای کنترلی می توان به دفع اغتشاش در روش کنترل فضای مفصلی با ورودی مسیر دکارتی در بخش (۳-۷) پرداخت.

**طراحی کنترلر:** در این قسمت قصد داریم تا با ارائه یک سری روابط ریاضی نشان دهیم که چرا سیستم کنترل فضای مفصلی با ورودی مسیر دکارتی در حضور عدم قطعیت ها و اغتشاشات قادر به ردگیری مسیر مطلوب در فضای دکارتی نمی باشد. با توجه به عدم قطعیت ها در مبدل مسیر رابطه بین متغیرهای مفصلی و متغیرهای دکارتی متناظر با آنها را می توان به صورت زیر تعریف کرد.

<sup>۱</sup> Fuzzy coordinator

$$q = \hat{I}kin(x) + \phi \quad (۲۵-۷)$$

$\hat{I}kin(x)$  تقریب سینماتیک معکوس ربات است و  $\phi$  ترمی است که به علت عدم قطعیت به وجود آمده است. بنابراین  $q_d$  به صورت

$$q_d = \hat{q}_d + \phi \quad (۲۶-۷)$$

می باشد. که  $\hat{q}_d = \hat{I}kin(x_d)$  می باشد و  $q_d = Ikin(x_d)$  می باشد که  $Ikin(x_d)$  سینماتیک معکوس دقیق ربات است.

با اعمال قانون کنترل خطی سازی فیدبکی به (۶-۳۵) می رسیم. اگر قانون کنترل خطی زیر را برای این سیستم به کار ببریم.

$$V' = \ddot{\hat{q}}_d + K_d(\dot{\hat{q}}_d - \dot{q}) + K_p(\hat{q}_d - q) \quad (۲۷-۷)$$

با قرار دادن (۲۵-۷) در (۲۷-۷) سپس با قرار دادن (۲۷-۷) در (۳۵-۷) داریم.

$$\ddot{q}_d - \ddot{q} + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q) = \eta + \ddot{\phi} + K_d\dot{\phi} + K_p\phi \quad (۲۸-۷)$$

حال دینامیک ردگیری خطا به صورت زیر بدست می آید.

$$\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e = \eta + \ddot{\phi} + K_d\dot{\phi} + K_p\phi \quad (۲۹-۷)$$

همانطور که مشاهده می کنید خطا نمی تواند صفر شود و این به این معناست که  $q$  نمی تواند به  $q_d$  برسد و متناظر با آن  $x$  به  $x_d$  نخواهد رسید. به وضوح مشخص است که  $\eta$  خطای تولید شده از انتقال فضای کنترل از یک سیستم غیر خطی به یک سیستم خطی می باشد و  $\ddot{\phi} + K_d\dot{\phi} + K_p\phi$  خطای تولید شده از انتقال فضای کنترلی از دکارتی به مفصلی با استفاده از سینماتیک معکوس است. علاوه بر آن با توجه به بخش (۷-۲) شیوه های کنترل مقاوم فضای مفصلی قادر به رفع خطای به وجود آمده از این انتقال فضا نمی باشند. در این قسمت برای رفع این مشکل، کنترل فازی را در یک کاربرد کاملاً جدید در ساختار کنترل اضافه می کنیم. در این حالت برای هر متغیر دکارتی یک سیستم فازی در نظر می گیریم و در حالت کلی قانون کنترل فازی را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$U_{FCi} = K_{ui} FC(K_{ei} e_{xi}, K_{\Delta i} \Delta e_{xi}) \quad (۳۰-۷)$$

که در آن  $e_{xi}$  خطای دکارتی می باشد که از  $e_{xi} = x_{di} - x_i$  به دست می آید، تأخیر  $\Delta e_{xi}$ ،  $FC(.)$  کنترلر فازی،  $K_{ei}$ ،  $K_{di}$  و  $K_{ui}$  به ترتیب ضرایب تصحیح  $e_{xi}$ ،  $\Delta e_{xi}$  و  $U_{FCi}$  می باشند. با اضافه کردن (۳۰-۷) به قانون کنترل (۲۷-۷) و اعمال آن در (۳۵-۶) معادلات دینامیکی خطا به صورت زیر بدست می آید.

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = \eta + \ddot{\phi} + K_d \dot{\phi} + K_p \phi - U_{FC} \quad (۳۱-۷)$$

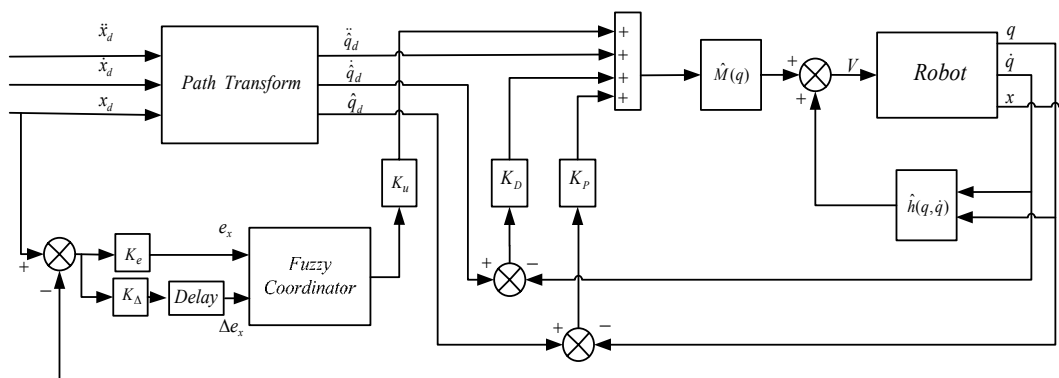
همانطور که از رابطه (۳۱-۷) مشخص است برای رسیدن به یک ردگیری کامل کافیت

$$U_{FC} = \eta + \ddot{\phi} + K_d \dot{\phi} + K_p \phi \quad (۳۲-۷)$$

باشد. در نتیجه

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = 0 \quad (۳۳-۷)$$

بنابراین با طراحی مناسب کنترل کننده فازی می توانیم علاوه از بین بردن خطای فضای مفصلی، خطای ردگیری مسیر مطلوب مجری نهایی را با وجود تمام عدم قطعیت ها به صفر برسانیم. سیستم فازی انتقال فضای کنترلی را با وجود عدم قطعیت‌های موجود به بهترین نحو ممکن انجام می دهد. همچنین در مقابل خطاهای موجود در خطی سازی فیدبکی به صورت مقاوم عمل می کند. با توجه به نقشی که فازی در بهبود این شیوه کنترلی بازی می کند نام هماهنگ کننده فازی را برای آن انتخاب کردیم. قانون کنترل فازی به صورت زیر است. در شکل (۵-۷) بلوک دیاگرام کنترلی پیشنهادی با استفاده از هماهنگ کننده فازی نمایش داده شده است.

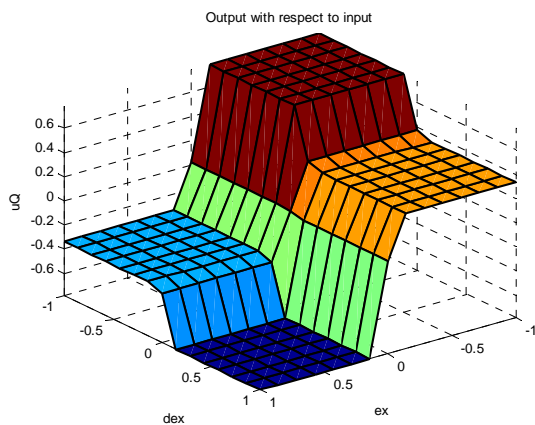


شکل (۵-۷) بلوک دیاگرام سیستم کنترل با استفاده از هماهنگ کننده فازی

همانطور که در شکل (۵-۷) نمایان است ورودیهای فازی خطای موقعیت مجری نهایی  $e_x$  و تأخیر آن  $\Delta e_x$  می باشد. قوانین فازی به صورت

If  $e_x$  is  $MF_i$  and  $\Delta e_x$  is  $MF_j$  then  $U_{fc}$  is  $MF_{i,j}$ , for  $i=1,\dots,3$  and  $j=1,\dots,3$

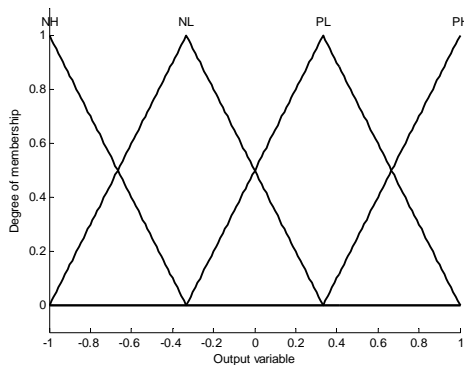
تعریف می شوند که در جدول (۱-۷)، آورده شده اند. سطح مشخصه سه بعدی ورودی نسبت به خروجی در شکل (۶-۷) و توابع تعلق های ورودیها و خروجی در شکل (۷-۷) آورده شده است. در تمامی شبیه سازیهای این فصل از روش فازی ساز ممدانی و غیر فازی ساز مرکز جرم استفاده شده است.



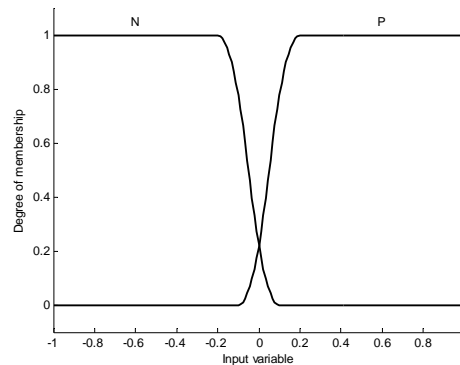
شکل (۶-۷) سطح مشخصه سه بعدی ورودی نسبت به خروجی

جدول (۱-۷) قوانین فازی

|                 |   |                 |    |
|-----------------|---|-----------------|----|
| U <sub>fc</sub> |   | Δe <sub>x</sub> |    |
|                 |   | P               | N  |
| e <sub>x</sub>  | P | NH              | NL |
|                 | N | PL              | PH |



(ب)

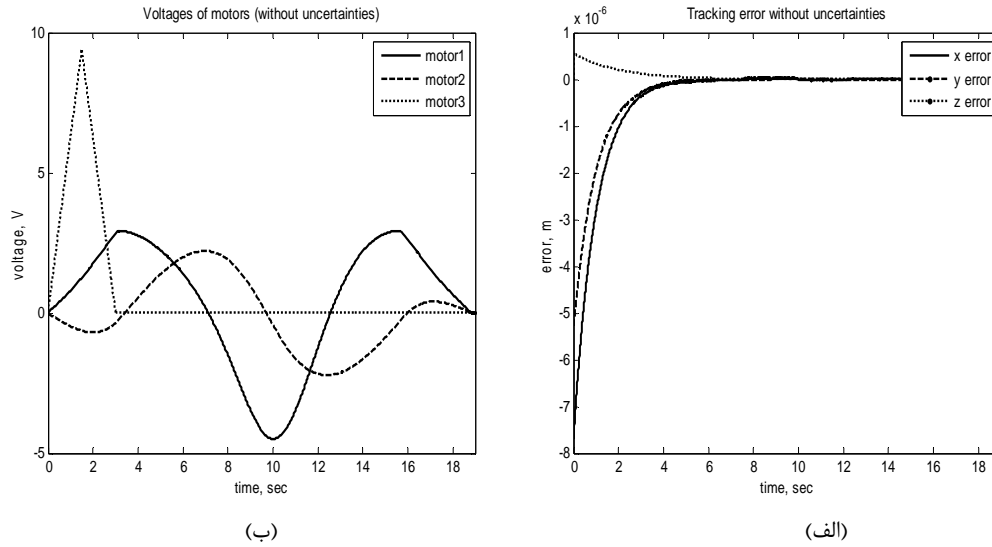


(الف)

شکل (۷-۷) توابع تعلق، (الف) ورودی، (ب) خروجی

**نتایج شبیه سازی:** نتایج شبیه سازی سیستم بدون وجود عدم قطعیت در شکل (۸-۷) آورده شده است. به صورتی که مشاهده می کنید سیستم کنترل قادر است خطای دکارتی را از بین برده و ردگیری مسیر دایره ای مطلوب را به خوبی انجام دهد. این مسئله نشان از طراحی صحیح قوانین کنترل کننده فازی دارد. چرا که در نبود عدم قطعیت ها

کنترل کننده خطی به تنهایی قادر به صفر کردن خطای مفصلی و به دنبال آن صفر کردن خطای دکارتی می باشد. بنابراین خروجی کنترل کننده فازی بنا به (۳۲-۷) باید صفر باشد تا تأثیری بر روی عملکرد کنترل کننده خطی نداشته باشد. گین ها در شبیه سازی بدون عدم قطعیت به صورت زیر در نظر گرفته شده اند.



شکل (۸-۷) بدون وجود عدم قطعیت (الف) خطای ردگیری ، (ب) ولتاژ موتورها

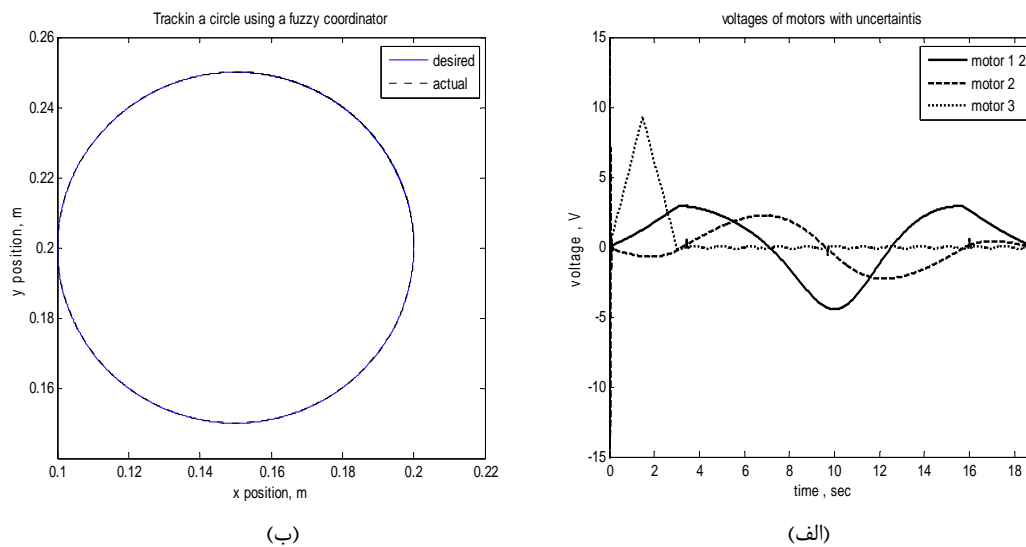
گین ها در شبیه سازی با حضور عدم قطعیت به صورت زیر در نظر گرفته شده اند.

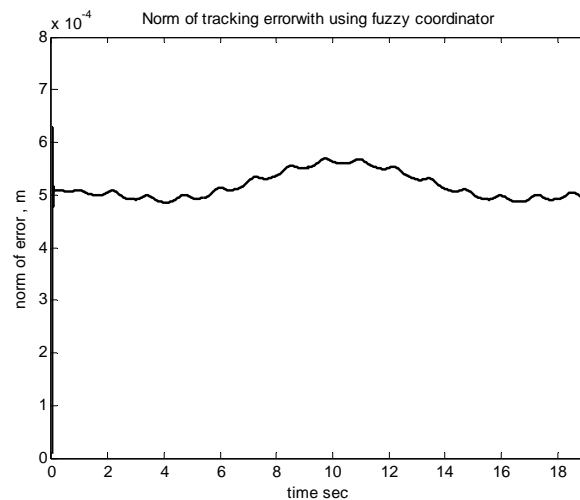
$$.K_{\Delta} = \text{diag}[200 \quad 200 \quad 200] , K_e = \text{diag}[4000 \quad 4000 \quad 4000]$$

$$.K_p = \text{diag}[100 \quad 100 \quad 100] , K_u = \text{diag}[500 \quad 500 \quad 500]$$

$$K_v = \text{diag}[20 \quad 20 \quad 20]$$

برای نشان دادن قدرت هماهنگ کننده فازی، عدم قطعیت ها را مشابه بخش (۷-۱) در نظر می گیریم. نتایج شبیه سازی در زیر آورده شده است.





(ج)

شکل (۷-۹) با وجود عدم قطعیت و حضور هماهنگ کننده فازی، (الف) ولتاژ موتورها، (ب) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ج) نرم خطای ردیابی

گین ها در شبیه سازی با حضور عدم قطعیت به صورت زیر در نظر گرفته شده اند.

$$.K_{\Delta} = \text{diag}[200 \quad 200 \quad 200] .K_e = \text{diag}[4000 \quad 4000 \quad 4000]$$

$$.K_p = \text{diag}[600 \quad 600 \quad 100] .K_u = \text{diag}[500 \quad 500 \quad 500]$$

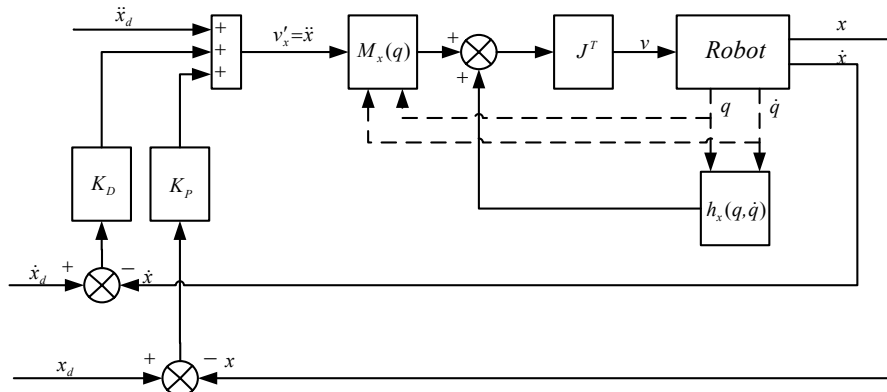
$$K_v = \text{diag}[600 \quad 600 \quad 200]$$

**نتیجه گیری:** همانطور که در شکل (۷-۱۰-ج) آورده شده است ماکزیمم نرم خطای ردگیری با حضور هماهنگ کننده فازی  $6.277e-4 \text{ m}$  می باشد. با مشاهده نتایج در می یابیم که قوانین کنترل بر مبنای مدل در برابر عدم قطعیت های ساختاری، غیر ساختاری و اغتشاشات خارجی بسیار حساس می باشند و نیز دریافتیم که خطی سازی فیدبکی به همراه کنترلر فازی این توانایی را دارد که حتی در حضور عدم قطعیت های موجود در سینماتیک معکوس و اغتشاشات خارجی، انتقال فضای کنترل را با کمترین خطا انجام دهد و به صورت یک مقاوم عمل کند. این سیستم کنترلی برای کنترل ربات جوشکار مناسب بوده و تمامی ملزومات آن را فراهم می کند. باید به این نکته توجه کرد که استفاده از فقط چهار قانون در پایگاه قوانین فازی و مقاوم عمل کردن سیستم کنترل، نشان از قدرت هماهنگ کننده فازی دارد. این امر به عنوان یک مزیت بزرگ در پیاده سازی سیستم کنترل در صنعت می باشد چرا که اکثر کارهای انجام شده در این زمینه [۸۰] با تعداد قوانین بسیاری همراه است که خود نیاز به پردازنده های با سرعت بالا برای پردازش بر روی سیگنالهای ورودی و انتخاب خروجی مناسب بر مبنای آن قوانین دارد. بنابراین این دستاورد در طراحی کنترل کننده ربات جوشکار در فضای دکارتی به عنوان شیوه ای جدید بسیار ساده و با کارایی بالا می تواند مورد استفاده قرار بگیرد.



## ۴-۷- خطی سازی فیدبکی فضای دکارتی و کنترل خطی در فضای دکارتی

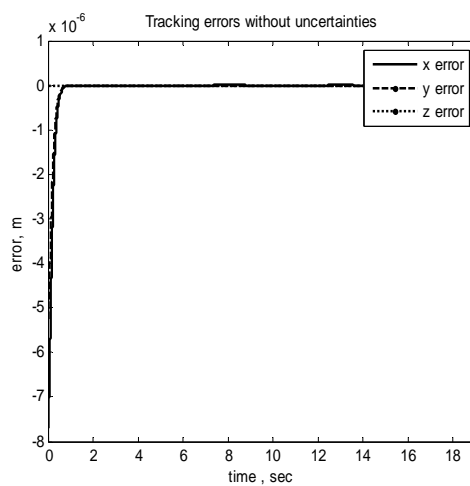
در این قسمت روش کنترل خطی سازی فیدبکی در فضای دکارتی که منطبق با روش کنترل دکارتی ژاکوبین ترانهاده در شکل (۴-۶) می باشد را بررسی می کنیم. در شکل (۷-۱۰) بلوک دیاگرام کنترلی خطی سازی فضای دکارتی که در شکل (۶-۶) مطرح شد، مجدداً نمایش داده می شود.



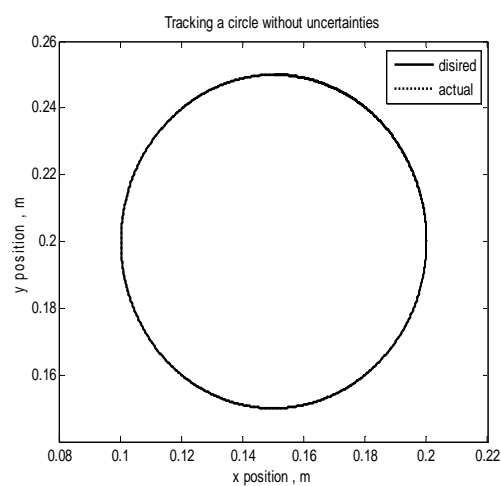
شکل (۷-۱۰) خطی سازی فیدبکی فضای دکارتی و کنترل خطی در فضای دکارتی

همان طور که دیده می شود ساختار این بلوک دیاگرام دارای پیچیدگی زیادی می باشد اما در برابر اغتشاشات ناشی از مدل کردن و ژاکوبین با به کار بردن قوانین کنترل مقاوم [۷۵، ۷۸]، پایدار خواهد شد.

**نتایج شبیه سازی:** در دو حالت حضور و عدم حضور عدم قطعیت ها عملکرد سیستم کنترل به ترتیب در شکل های (۷-۱۱) و (۷-۱۲) نمایش داده شده است.



(ب)



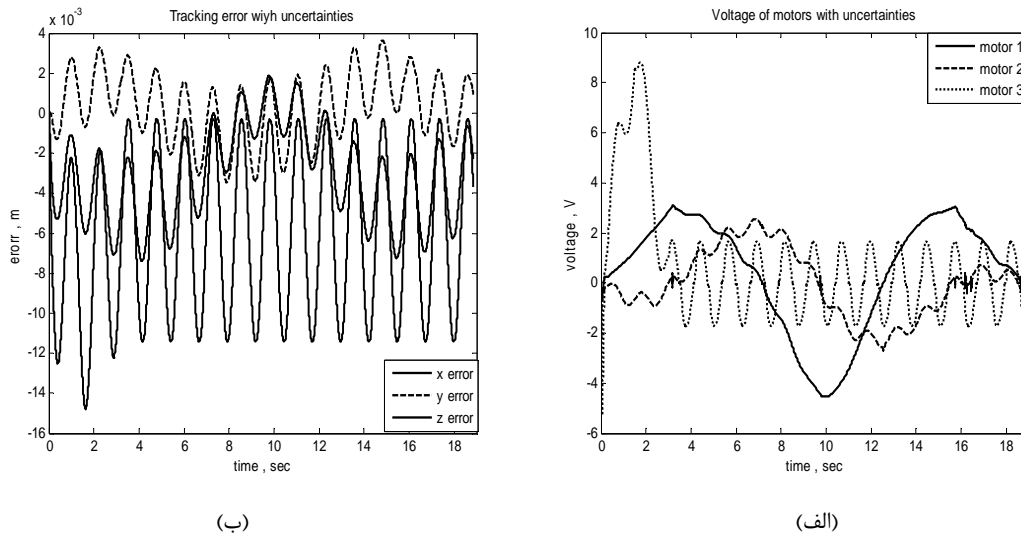
(الف)

شکل (۷-۱۱) عملکرد کنترلر بدون حضور عدم قطعیت، (الف) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی،

(ب) خطای ردیابی

ضرایب کنترل  $K_p = 100$  و  $K_d = 20$

با فرض حضور عدم قطعیت ها مشابه بخش (۷-۱) نتایج شبیه سازی به صورت زیر می باشد.



شکل (۷-۱۲) عملکرد سیستم کنترل با وجود عدم قطعیت، (الف) ولتاژ موتورها، (ب) خطای ردیابی

ضرایب کنترل  $K_p = 600$  و  $K_d = 30$  است.

**نتیجه گیری:** همانطور که در نتایج شکل (۷-۱۱) مشاهده می کنید و در بخش (۶-۲-۲) هم اثبات شد این سیستم کنترل بدون عدم قطعیت به صورت مجانبی پایدار است زیرا طرف دوم معادلات خطا صفر می باشد. به علت اینکه سیستمها در عمل ضریب لختی بی نهایت ندارند و انعطاف پذیر می باشند. بنابراین در انتخاب ضرایب باید دقت داشته باشیم زیرا انتخاب نادرست ضرایب ممکن است باعث تحریک مدهای فرکانس بالای سیستم شود. سیستم کنترل در مواجهه با عدم قطعیت، نمی تواند پایداری مجانبی سیستم را تضمین کند و بسته به میزان عدم قطعیت با اعمال گین های بالایی می تواند سیستم را پایدار نگاه دارد. همچنین سیستم کنترل در مقابل مسیر سریع سریع به علت بزرگ شدن  $\dot{q}$  در ترم عدم قطعیت عملکرد ضعیفی از خود نشان می دهد. به دلیل استفاده از معکوس ماتریس ژاکوبین در محاسبه  $M_x(q), h_x(q, \dot{q})$  که باعث ظاهر شدن نقاط تکین و همچنین انتشار خطای ژاکوبین در کل سیستم می شود، فضای کاری ربات را محدود می شود. بنابراین در طراحی مسیرهای دکارتی باید نقاط تکین را در نظر گرفت. به صورتی که در شکل (۷-۱۲-ب) مشاهده می کنید که خطای ردگیری بالاست و این شیوه با حضور عدم قطعیت گزینه مناسبی برای کنترل ربات جوشکار نمی باشد.

## ۵-۷- خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی و کنترل خطی در فضای دکارتی

با توجه به پیچیدگی موجود در خطی سازی فیدبکی در فضای دکارتی، شیوه ساده تری را برای کنترل مستقیم در فضای دکارتی مبتنی بر روش ژاکوبین معکوس در شکل (۷-۱۳) می توان ارائه داد.

بعد از اعمال خطی سازی فیدبکی در فضای مفصلی معادلات به فرم  $\ddot{q} = v'$  در می آید. با توجه به آنکه می خواهیم خطی سازی در فضای دکارتی انجام گیرد، مایلیم معادلات سیستم به فرم  $\ddot{x} = v'_x$  در بیاید. بنا به رابطه بین سرعت های مفصلی و دکارتی در (۶-۱۶) خواهیم داشت.

$$\ddot{q} = J^{-1}(\ddot{x} - \dot{J}\dot{q}) \quad (۷-۳۴)$$

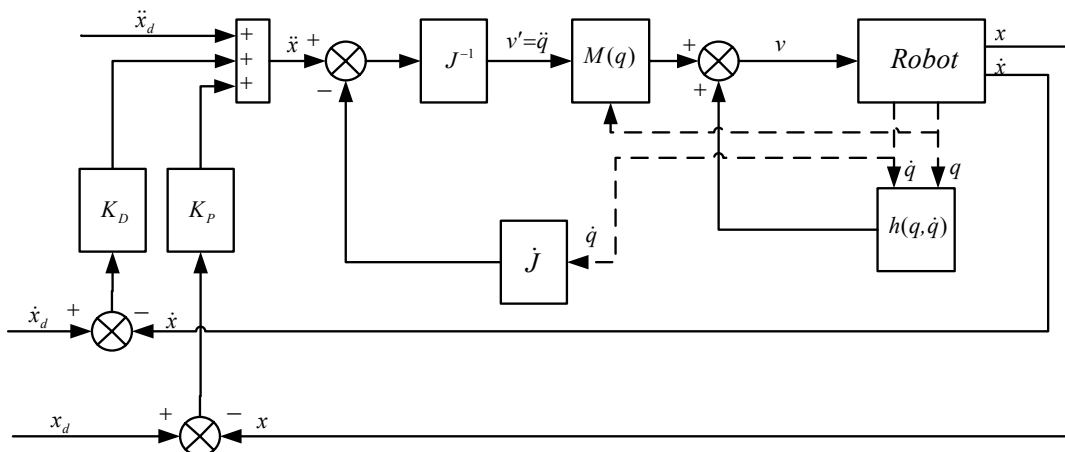
در این صورت کفایت قانون کنترل واسطه ای به صورت

$$v' = J^{-1}v'_x - J^{-1}\dot{J}\dot{q} \quad (۷-۳۵)$$

تعریف کرد تا به هدف خود برسیم. حال با انتخاب  $v'_x$  به صورت زیر

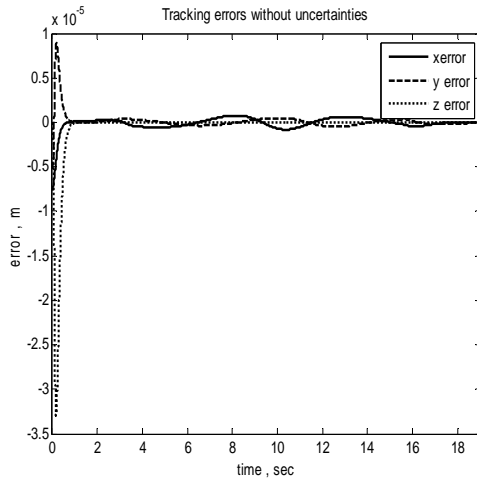
$$v'_x = \ddot{x}_d + K_D(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_P(x_d - x) \quad (۷-۳۶)$$

و با تعریف ردگیری در فضای دکارتی به صورت  $e_x = (x_d - x)$ ، ردگیری مسیر مطلوب در فضای دکارتی تضمین می شود.

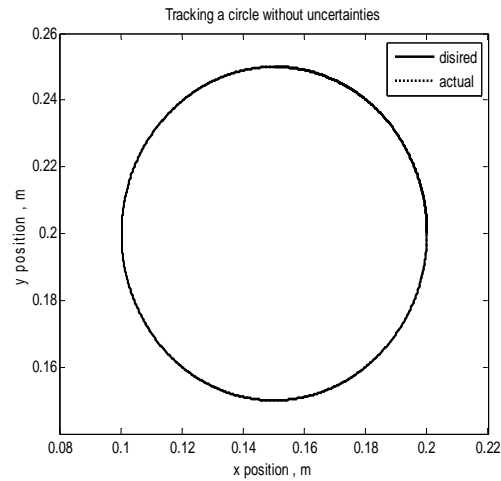


شکل (۷-۱۳) خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی و کنترل خطی در فضای دکارتی

نتایج شبیه سازی: در دو حالت حضور و عدم حضور عدم قطعیت ها عملکرد سیستم کنترل به ترتیب در شکل های (۷-۱۴) و (۷-۱۵) نمایش داده شده است.



(ب)

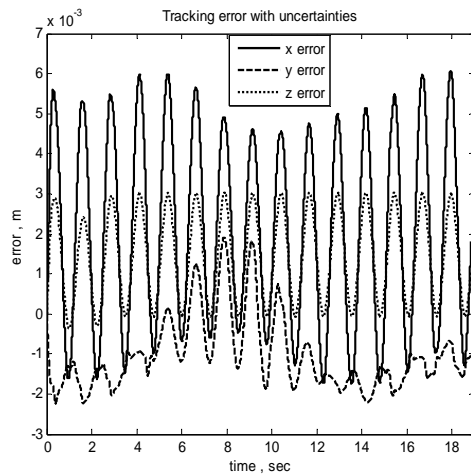


(الف)

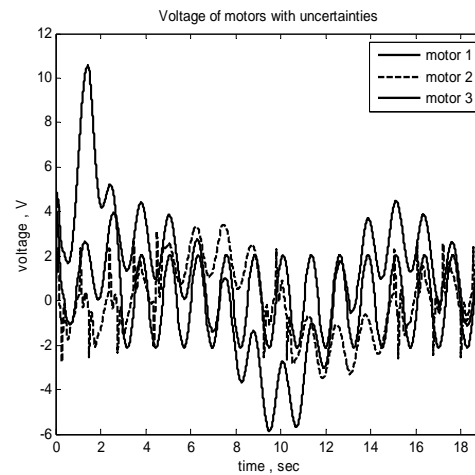
شکل (۷-۱۴) عملکرد کنترلر بدون حضور عدم قطعیت، (الف) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ب) خطای ردیابی

$$\text{ضرایب کنترلر } K_d = 20 \text{ و } K_p = 100$$

با فرض حضور عدم قطعیت ها مشابه بخش (۷-۱) نتایج شبیه سازی به صورت زیر می باشد.



(ب)



(الف)

شکل (۷-۱۵) عملکرد سیستم کنترل با وجود عدم قطعیت، (الف) ولتاژ موتورها، (ب) خطای ردیابی

$$\text{ضرایب کنترلر } K_d = 30 \text{ و } K_p = 600$$

نتیجه گیری: همانطور که در نتایج شکل (۷-۱۴) مشاهده می کنید این سیستم کنترل بدون عدم قطعیت به صورت مجانبی پایدار است زیرا طرف دوم معادلات خطا صفر می باشد. تنها در انتخاب ضرایب باید دقت داشته باشیم به

علت اینکه سیستمها در عمل ضریب لختی بی نهایت ندارند و انعطاف پذیر می باشند و انتخاب نادرست ضرایب ممکن است باعث تحریک مدهای فرکانس بالای سیستم شود. قانون کنترل (۳۶-۷) در مواجهه با عدم قطعیت دیگر نمی تواند پایداری سیستم را تضمین کند. همچنین سیستم کنترل در مقابل اعمال مسیر سریع به علت بزرگ شدن  $q'$  در ترم عدم قطعیت که پیشتر در (۳۶-۶) به دست آورده شد عملکرد ضعیفی از خود نشان می دهد. در این شیوه نیز به علت وجود ماتریس ژاکوبین مشکل نقاط تکین وجود دارد. برتری این شیوه کنترل نسبت به شیوه ارائه شده در بخش (۴-۷)، سادگی روابط در اجرای خطی سازی در فضای دکارتی است و نیز انتشار خطای ژاکوبین نسبت به شیوه پیشنهاد شده در بخش (۴-۷) کمتر صورت گرفته که با توجه به شکل (۷-۱۵-ب) به خطای کمتری در فضای کار منجر می شود.

### ۶-۷- کنترلر فازی فضای دکارتی با خطی سازی فیدبکی

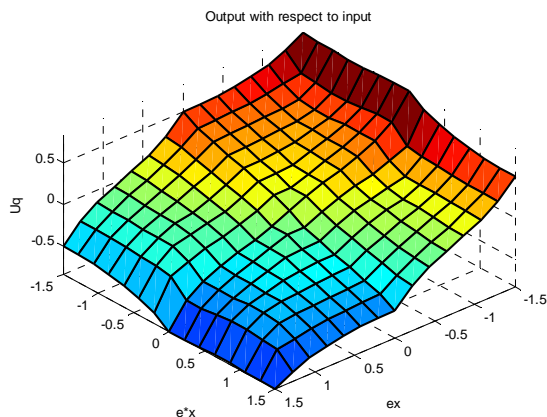
**طراحی کنترلر:** با توجه به اینکه در بخش ۳-۷ نشان دادیم که با استفاده از سیستم فازی می توان تطبیق فضای کنترلی را انجام داد، در این بخش با طراحی یک کنترلر فازی شبه  $PD$  در فضای دکارتی و گرفتن فیدبک از موقعیت مجری نهایی، می توانیم ربات را کنترل کنیم. قانون کنترل پیشنهادی زیر را در نظر بگیرید.

$$V_i = K_{vi}FC(K_{pi}e_{xi}, K_{di}\dot{e}_{xi}) \quad (۳۷-۷)$$

که در آن  $e_{xi}$  خطای موقعیت  $e_{xi} = p_{di} - p_i$  است که ورودی اول فازی،  $\dot{e}_{xi}$  ورودی دوم فازی و  $FC(.)$  خروجی فازی می باشد.  $K_{vi}$  و  $K_{di}$ ،  $K_{pi}$  به ترتیب ضرایب تصحیح  $e_{xi}$ ،  $\dot{e}_{xi}$  و  $FC(.)$  می باشند. قوانین فازی به صورت

If  $e_x$  is  $MF_i$  and  $\dot{e}_x$  is  $MF_j$  then  $V_i$  is  $MF_{i,j}$ , for  $i=1,\dots,3$  and  $j=1,\dots,3$

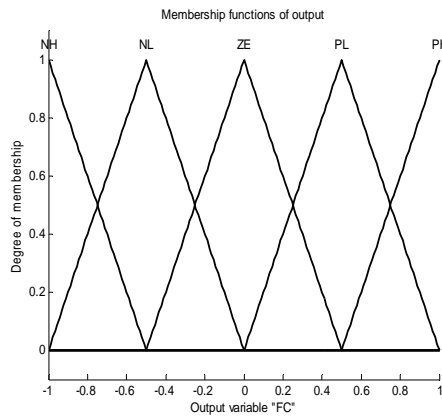
تعریف شده که در جدول (۲-۷)، آورده شده است. سطح مشخصه سه بعدی ورودی نسبت به خروجی در شکل (۷-۱۶) و توابع تعلق های ورودیها و خروجی در شکل (۷-۱۷) آورده شده است.



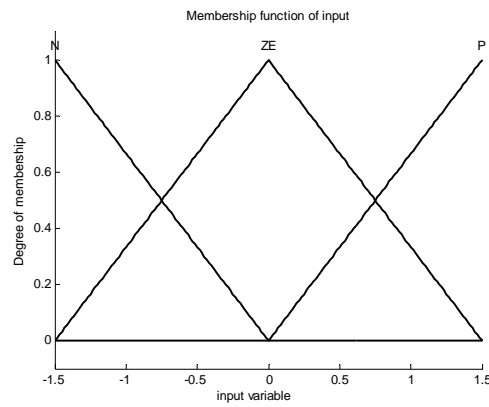
جدول (۲-۷) قوانین فازی

| V  |   | Dex |    |    |
|----|---|-----|----|----|
|    |   | P   | ZE | N  |
| ex | P | NH  | NH | NL |
|    | Z | NL  | ZE | PL |
|    | N | PL  | PH | PH |

شکل (۷-۱۶) سطح مشخصه سه بعدی ورودی نسبت به خروجی

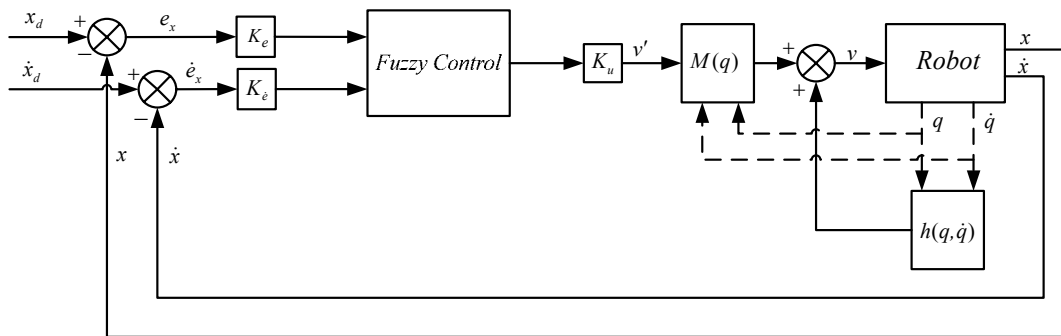


(ب)



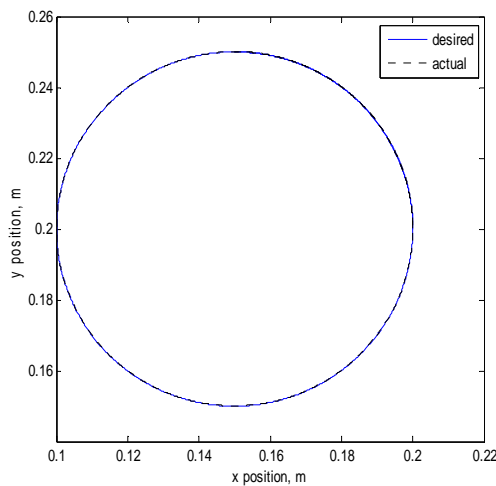
(الف)

شکل (۱۷-۷) توابع تعلق، (الف) ورودی، (ب) خروجی

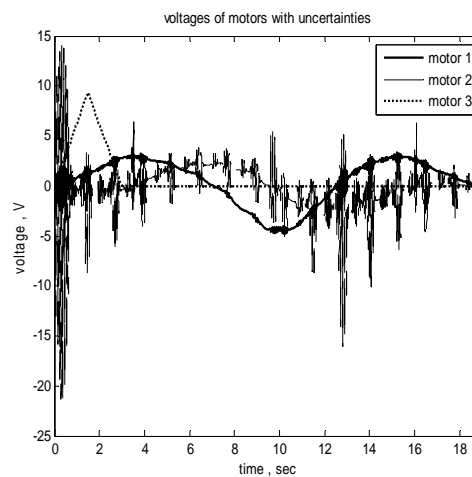


شکل (۱۸-۷) خطی سازی فیدبکی فضای مفصلی، کنترلر فازی در فضای دکارتی

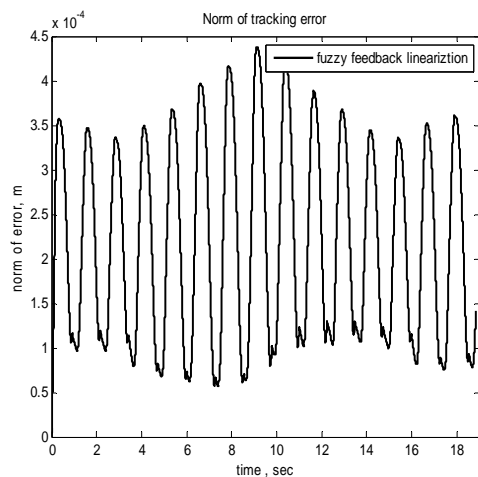
نتایج شبیه سازی: با فرض حضور عدم قطعیت ها مشابه بخش (۱-۷) نتایج شبیه سازی به صورت زیر می باشد.



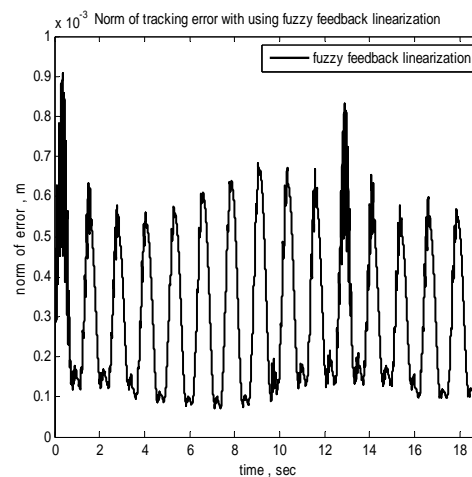
(ب)



(الف)



(د)



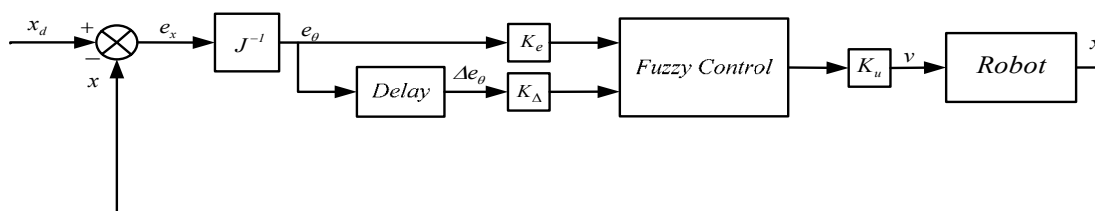
(ج)

شکل (۷-۱۹) با وجود عدم قطعیت (الف) ولتاژ موتورها، (ب) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ج) نرم خطای ردیابی با حضور کنترلر،  $K_{pi} = 1000$ ،  $K_{di} = 20$ ،  $K_{vi} = 50$ ، (د) نرم خطای ردیابی با  $K_{pi} = 1500$ ،  $K_{di} = 200$ ،  $K_{vi} = 50$

**نتیجه گیری:** همانطور که در شکل (۷-۱۹-ج) مشهود است ماکزیمم نرم خطا  $8.997e-4$  می باشد. با افزایش ضرایب تصحیح به صورتی که در شکل (۷-۱۹-د) مشاهده می کنید به جواب بهتری در حد  $4.384e-4$  می رسیم. از مزایای این روش کنترلی رفع مشکل نقاط تکین است زیرا در قانون کنترل از ژاکوبین استفاده نشده است. این نتیجه بسیار مناسبی برای کنترل یک ربات جوشکار می باشد با این وجود بلوک دیگران کنترلی شکل (۷-۱۸) قابلیت اصلاح را دارد به این صورت که برای وارد نشدن خطای مدل، کنترلر فازی را به صورت مستقیم برای کنترل ربات به کار بگیریم. پیاده سازی این ایده را در بخش (۷-۸) دنبال می کنیم.

### ۷-۷- کنترلر فازی در فضای مفصلی و استفاده از $J^{-1}$ و $J^T$ برای تبدیل فضای کنترل

یکی دیگر از شیوه های کنترل در فضای دکارتی می تواند به صورت بلوک دیگران شکل (۷-۲۱) پیاده سازی شود که کنترلر فازی را بعد از تبدیل فضا در فضای مفصلی به کار بگیریم. این ساختار کنترلی همان روش کنترل دکارتی با ژاکوبین وارون در شکل (۶-۳) است. بعد از شبیه سازی به بررسی مزایا و معایب این شیوه کنترلی می پردازیم.



شکل (۷-۲۰) کنترلر فازی در فضای مفصلی و استفاده از  $J^{-1}$  برای تبدیل فضای کنترل

طراحی کنترلر: در این شیوه ابتدا با استفاده از  $J^{-1}$  خطای موقعیت را به خطای مفصلی تبدیل کرده

$$e_x = J(q)e_q \quad (38-7)$$

در نتیجه

$$\delta \dot{x} = J(q)\delta \dot{q} \quad (39-7)$$

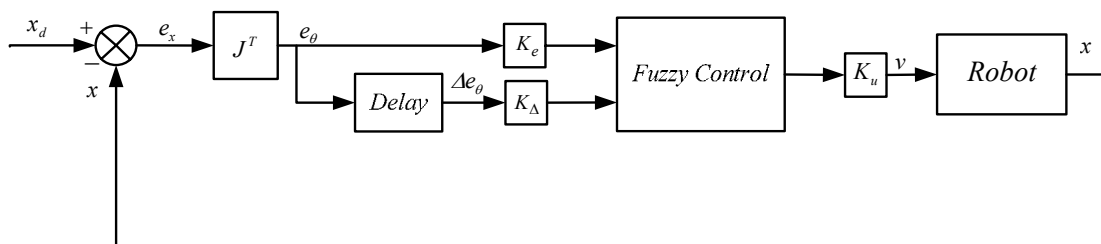
که در آن  $\delta \dot{x}$  تغییرات کوچک  $\dot{x}$  و  $\delta \dot{q}$  تغییرات کوچک  $\dot{q}$  می باشد. در شرایط ردیابی مناسب

$$e_q = J^{-1}e_x \quad (40-7)$$

که در آن  $e_x = \dot{x}_d - \dot{x}$  بردار خطای موقعیت مجری نهایی،  $\dot{x}_d$  موقعیت مطلوب مجری نهایی،  $e_q = q_d - q$  بردار خطای زاویه مفاصل،  $q_d$  بردار زاویه مطلوب مفاصل می باشد. سپس کنترلر فازی کار کنترل سیستم در فضای مفصلی را انجام می دهد که قانون کنترل فازی به صورت

$$V_i = K_{vi}FC(K_{pi}e_{qi}, K_{di}\dot{e}_{qi}) \quad (41-7)$$

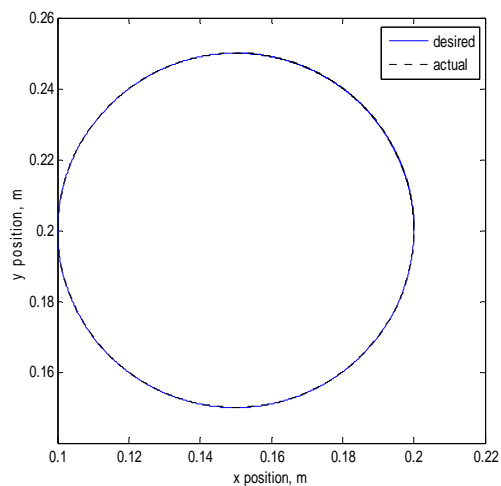
که در آن  $e_{qi}$  خطای زاویه مفاصل  $e_{qi} = q_{di} - q_i$  است که ورودی اول فازی،  $\dot{e}_{qi}$  ورودی دوم فازی،  $FC(.)$  خروجی فازی می باشد. با استناد به مقاله [۲۷] همانطور که در شکل (۷-۲۱) مشاهده می کنید از  $J^T$  به جای  $J^{-1}$  برای انتقال فضای کنترل از فضای دکارتی به فضای مفصلی می توانیم استفاده کنیم. یکی از بزرگترین مزایای این جایگزینی، فرار از نقاط تکین و رسیدن به سرعت پاسخ بالاتر می باشد. برای طراحی کنترلر فازی از همان کنترلر فازی استفاده شده در سیستم کنترل بخش (۷-۶) استفاده کرده ایم تنها تفاوت عوض کردن منطق فازی می باشد.



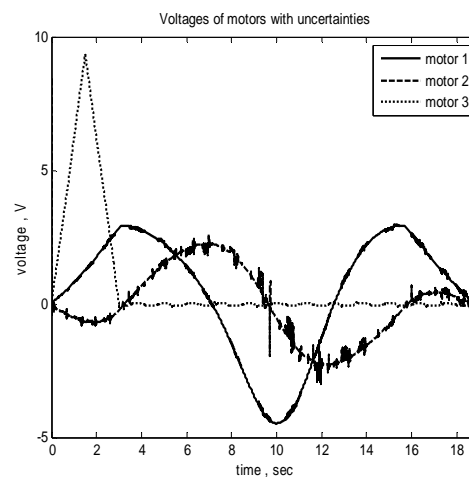
شکل (۷-۲۱) کنترلر فازی در فضای مفصلی و استفاده از  $J^T$  برای تبدیل فضای کنترل



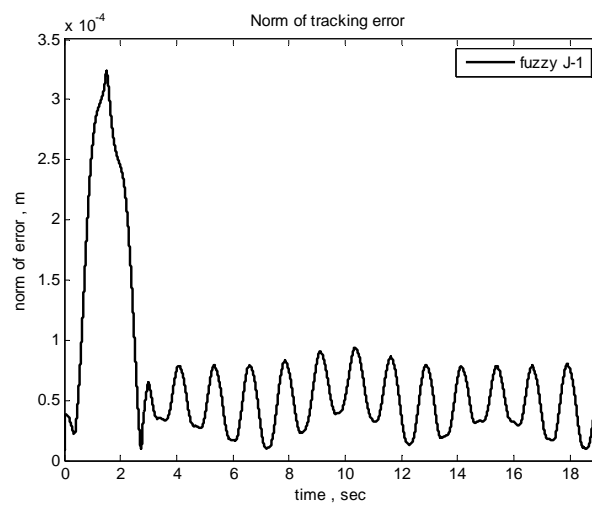
نتایج شبیه سازی: با فرض حضور عدم قطعیت ها مشابه بخش (۷-۱) نتایج شبیه سازی به صورت زیر می باشد. در شکل (۷-۲۲) نتایج مربوط به کنترلر  $J^{-1}$  فازی و در شکل (۷-۲۳) نتایج مربوط به  $J^T$  فازی آورده شده است.



(ب)



(الف)

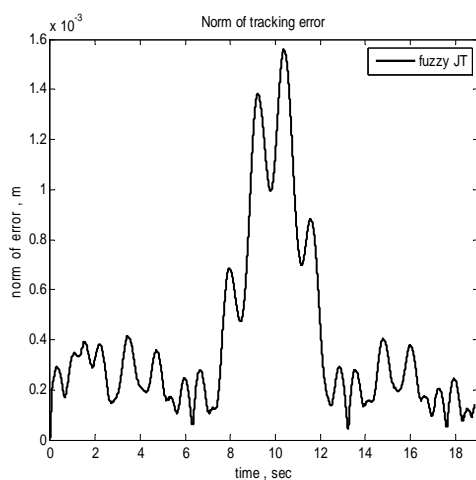


(ج)

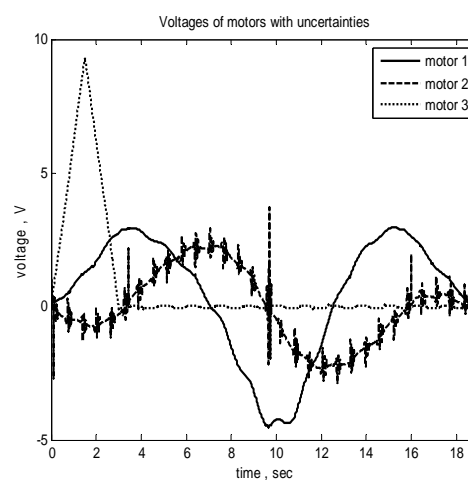
شکل (۷-۲۲) با وجود عدم قطعیت (الف) ولتاژ موتورها، (ب) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ج) نرم

خطای ردیابی با حضور کنترلر  $J^{-1}$  فازی

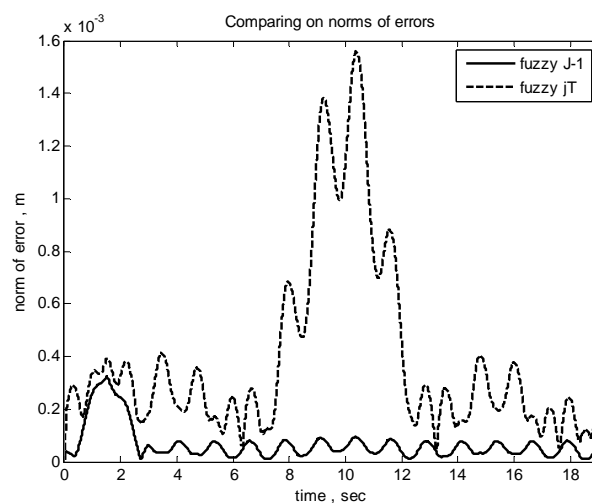
ضرایب تصحیح با حضور کنترلر  $J^{-1}$  فازی،  $K_{pi} = 1000$ ،  $K_{di} = 30$ ،  $K_{vi} = 50$



(ب)



(الف)



(ج)

شکل (۷-۲۳) با وجود عدم قطعیت (الف) ولتاژ موتورها، (ب) نرم خطای ردیابی با حضور کنترلر  $J^T$  فازی، (ج) مقایسه نرم خطا در استفاده

از  $J^T$  و  $J^{-1}$

ضرایب تصحیح با حضور کنترلر  $J^T$  فازی،  $K_{pi} = 1100$ ،  $K_{di} = 50$ ،  $K_{vi} = 50$

نتیجه گیری: همانطور که در نتایج مشهود است ماکزیمم نرم خطا برای کنترلر  $J^{-1}$  فازی  $3.239e-4 m$  و برای  $J^T$  فازی  $1.477e-3 m$  می باشد. همانطور که در شکل (۷-۲۳-ج) مشاهده می کنید با وجود اینکه ماکزیمم نرم خطا در کنترلر  $J^T$  فازی بیشتر است اما دارای سرعت پاسخدهی بالاتر می باشد و از همه مهمتر اینکه در طراحی مسیر مطلوب دیگر با مشکل نقاط تکین مواجه نمی شود. هر دو کنترلر از موقعیت مجری نهایی فیدبک می گیرند بنابراین وجود خطا در موقعیت توسط کنترلر حس می شود. بنابراین کنترلر به راحتی می تواند خطای دکارتی را از بین ببرد. این شبیه سازی را با افزایش میران عدم قطعیت برای ۱۰٪ عدم قطعیت در ژاکوبین تکرار کردیم برای  $J^{-1}$  فازی به ماکزیمم نرم خطای  $3.418e-4 m$  رسیدیم و برای  $J^T$  فازی به  $1.559e-3 m$  رسیدیم. با توجه به

نتایج بدست آمده این موضوع مشهود است که هر دو سیستم کنترل در برابر عدم قطعیت به صورت مقاوم عمل می کنند.

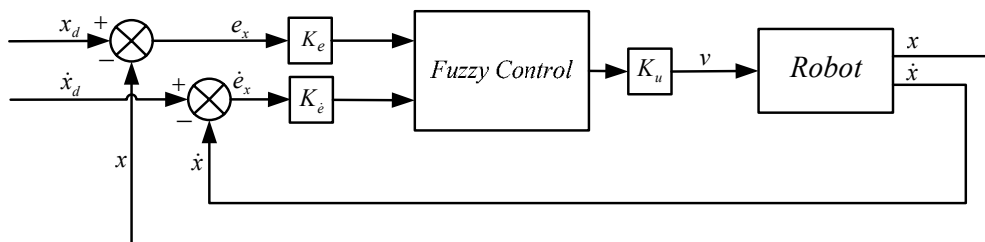
### ۷-۸- کنترل فازی در فضای دکارتی

از دیگر شیوه های کنترل در فضای دکارتی می توان به استفاده از کنترلر فازی به طور مستقیم بر روی سیستم ربات اشاره کرد. تا کنون مقالات بسیاری در کنترل نقطه تنظیم<sup>۱</sup> [۷۹] و ردگیری [۸۰] و [۸۱] در فضای مفصلی به شیوه فازی انجام شده است ولی از این شیوه کنترلی برای کنترل ربات در فضای کار استفاده نشده است. بنابراین مقالات منتشر شده را مبنای کار خود قرار دادیم تا کنترل فازی را در فضای کار طراحی کنیم. بلوک دیاگرام کنترلی این روش را در شکل (۷-۲۴) مشاهده می کنید.

**طراحی کنترلر:** با توجه به اینکه  $q_i$  با افزایش مقدار مثبت  $V_i$  افزایش می یابد با طراحی یک کنترلر فازی شبیه  $PD$  و گرفتن فیدبک از موقعیت مجری نهایی، می توانیم ربات را کنترل کنیم. قانون کنترل پیشنهادی زیر را در نظر می گیریم:

$$V_i = K_{vi}FC(K_{pi}e_{xi}, K_{di}\dot{e}_{xi}) \quad (۷-۴۲)$$

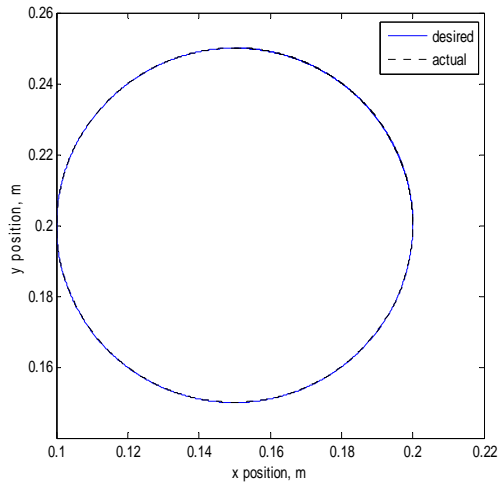
که در آن  $e_{xi}$  خطای موقعیت  $p_{di} - p_i$  است که ورودی اول فازی،  $\dot{e}_{xi}$  ورودی دوم فازی و  $FC(.)$  خروجی فازی می باشد.  $K_{vi}$  و  $K_{di}$ ،  $K_{pi}$  به ترتیب ضرایب تصحیح  $e_{xi}$ ،  $\dot{e}_{xi}$  و  $FC(.)$  می باشند. کنترلر فازی در این قسمت درست همان کنترلر استفاده شده در بخش (۷-۶) می باشد.



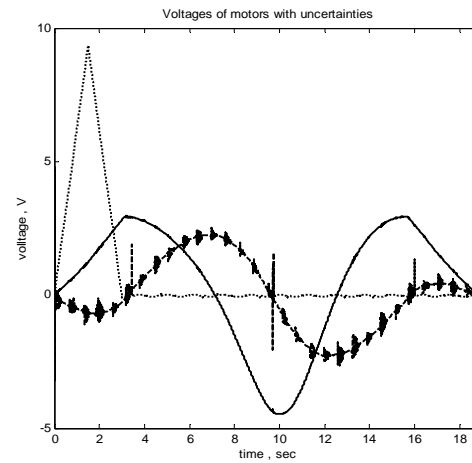
شکل (۷-۲۴) کنترل ربات با استفاده از کنترلر فازی

<sup>1</sup> Set point

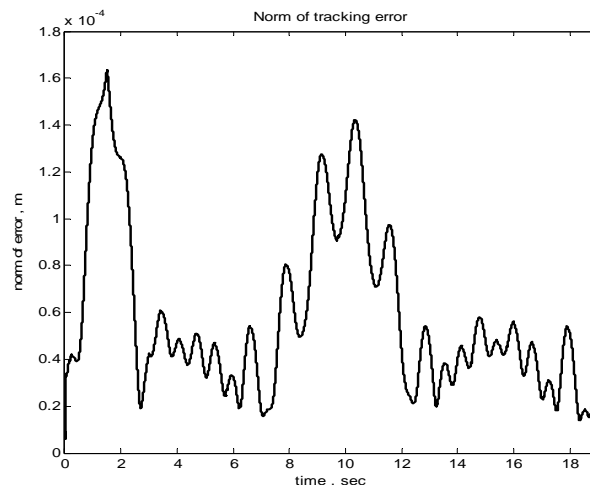
نتایج شبیه سازی: با فرض حضور عدم قطعیت ها مشابه بخش (۷-۱) نتایج شبیه سازی به صورت زیر می باشد.



(ب)



(الف)



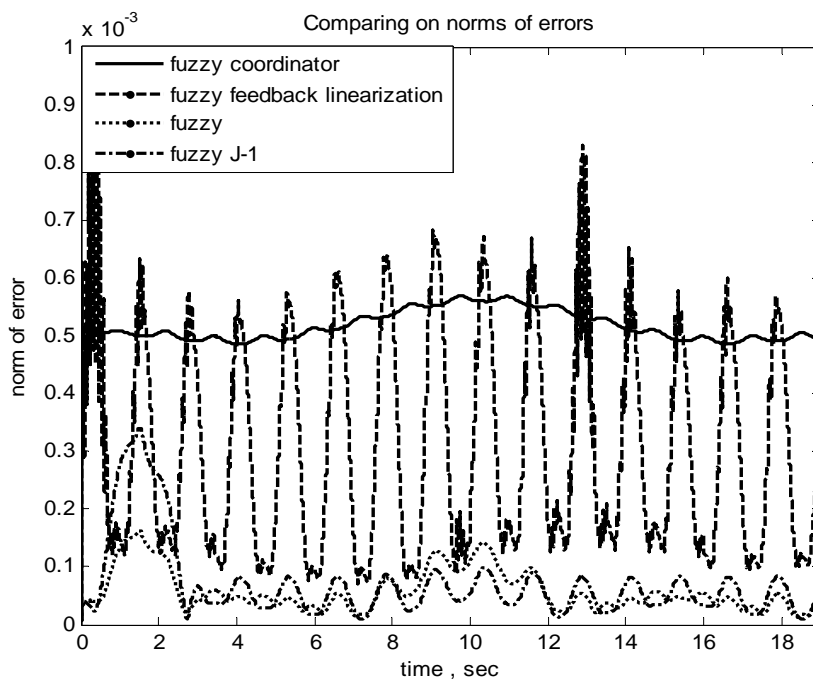
(ج)

شکل (۷-۲۵) با وجود عدم قطعیت (الف) ولتاژ موتورها، (ب) مقایسه بین مسیر مطلوب با مسیر طی شده توسط مجری نهایی، (ج) نرم خطای ردیابی با حضور کنترلر فازی مستقیم

در شبیه سازی ضرایب  $K_{pi} = 1000$ ،  $K_{di} = 20$ ،  $K_{vi} = 50$  قرار داده شده است.

نتیجه گیری: همانطور که در نتایج مشهود است ماکزیمم نرم خطا برای کنترلر فازی مستقیم  $1.631e-4$  می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده بیش از پیش به قدرت کنترلر فازی پی می بریم. به صورتی که نتایج شبیه سازی سیستم نشان می دهد کنترلر فازی به تنهایی علاوه بر اینکه کار خطی سازی فیدبکی را انجام می دهد با وجود تمامی عدم قطعیت های موجود به صورت مقاوم عمل می کند. در ضمن، مزیت عمده در به کارگیری فازی به صورت مستقیم در کنترل فضای دکارتی، رفع مشکل نقاط تکین است که اکثر شیوه های کنترل فضای دکارتی با آن مواجه هستند.

## ۷-۹- مقایسه روشهای کنترل فازی



شکل (۷-۲۶) مقایسه بین چهار روش کنترل فضای دکارتی به کمک فازی

در شکل (۷-۲۶) مقایسه ای بین انواع روشهای کنترل فازی شبیه سازی شده را مشاهده می کنید. هر چهار کنترلر از موقعیت مجری نهایی فیدبک می گیرند بنابراین وجود خطا در موقعیت توسط کنترلر حس می شود. همانطور که مشاهده می کنید علاوه بر آنکه نرم خطا در کنترلر فازی پایین تر است. طراحی کنترلر ساده تر بوده و دارای سرعت پاسخدهی بالا می باشد و از همه مهمتر این دستاورد کنترلی بر عکس سه روش دیگر که نیاز به اطلاع از سینماتیک و دینامیک سیستم دارند مدل آزاد است و نیز در برابر عدم قطعیت به صورت مقاوم عمل می کند. در ضمن با توجه به این موضوع که محدوده قابل قبول خطا در انواع جوشکاری متفاوت است می توان از تمامی شیوه های ارائه شده در این فصل برای کنترل ربات جوشکار استفاده کرد.

# فصل هشتم

## نتیجه گیری

در این پایان نامه پس از بیان پیشینه ای از رباتهای جوشکار به طور خلاصه به بررسی سیستم جوشکاری قوس الکتریکی، معرفی مدل و نحوه ارتباط آن با ربات پرداختیم. سپس در فصل سوم سینماتیک و دینامیک ربات اسکارا را بررسی کردیم و در فصل چهارم به بررسی انواع مسیرهای مطلوب جوشکاری پرداختیم و چند مسیر نمونه را طراحی نموده که ربات اسکارا به ردگیری آنها برای جوشکاری می پردازد. طی مسیر باشد را طراحی شد. در فصل پنجم با توجه به بررسی مقالات منتشر شده در زمینه اندازه گیری پارامترهای مورد نیاز در جوشکاری رباتیک به بیان انواع حسگرهای موجود و انواع شیوه های اندازه گیری پرداخته شد. در فصل ششم کنترل ربات در فضای کار بر مبنای خطی سازی فیدبکی ارائه گردید با استناد به نتایج شبیه سازی در فصل هفت مزایا و معایب هر یک از شیوه های کنترلی را بیان کردیم. در راستای کارهای انجام شده علاوه بر آگاهی از چگونگی انجام جوشکاری رباتیک به این نتیجه رسیدیم که کارایی سیستم های کنترل مدل مرجع تا چه حد در برابر عدم قطعیت های ساختاری و اغتشاشات خارجی تأثیر پذیر است. بنابراین رباتهای صنعتی را با صرف هزینه سنگینی با کیفیت بالا می سازند تا کنترل آنها در فضای مفصلی کفایت نماید. با هدف تعادل بین هزینه ساخت ربات و توسعه تئوری کنترل به کنترل ربات در فضای کار توجه نمودیم. روشهای مختلف کنترل غیر خطی ربات بویژه کنترل فازی با یکدیگر مقایسه شد و اهمیت کنترل ربات در فضای دکارتی در مقایسه با کنترل در فضای مفصلی مشخص گردید. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که کنترل فازی ربات به طور موثری می تواند به ردگیری مناسب در فضای کار بیانجامد و به عدم قطعیت ها غلبه کند.

# پیوست

در شبیه سازی ها از مدل یک ربات اسکارای صنعتی به نام Bosch-SR60 [۸۴] برای جوشکاری بر روی سطح افق استفاده شده است، که معادلات دینامیکی آن در زیر آورده شده است.

$$D(q) = \begin{bmatrix} I_1 + 2I_2 \cos(q_2) + I_3 & I_2 \cos(q_2) + I_3 & 0 \\ I_2 \cos(q_2) + I_3 & I_3 & 0 \\ 0 & 0 & m_{3L} + I_{3mot}/r_3^2 \end{bmatrix} \quad (۱-پ)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -2I_2 \dot{q}_2 \sin(q_2) & -I_2 \dot{q}_2 \sin(q_2) & 0 \\ I_2 \dot{q}_1 \sin(q_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۲-پ)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m_{3L}g \end{bmatrix} \quad (۳-پ)$$

$$I_1 = \left( \frac{m_1}{3} + m_2 + m_3 \right) L_1^2, \quad I_2 = \left( \frac{m_2}{2} + m_3 \right) L_1 L_2, \quad I_3 = \left( \frac{m_2}{3} + m_3 \right) L_2^2, \quad m_3 = m_{3A} + m_{3L}$$

که در آن  $L_i$  طول بازوهای ربات،  $I_i$  ممان اینرسی بازوهای ربات،  $m_i$  جرم بازوهای ربات،  $r_i$  ضریب چرخنده،  $m_{3A}$  وزن بار،  $m_{3L}$  وزن استاتور،  $I_{3mot}$  ممان اینرسی قسمت چرخنده می باشد و پارامترهای مربوط به سینماتیک ربات در جدول (۱-پ) آورده شده است. در شبیه سازی ها از مدل موتورهای ربات PUMA 560 به عنوان اکچویاتورهای ربات استفاده کرده ایم که پارامترهای آن در جدول (۲-پ) آورده شده است.

جدول (۱-پ) پارامترهای مربوط به سینماتیک ربات

| link                                 | Length, $m$ | Mass, $kg$  | Inertia, $kgm^2$          |
|--------------------------------------|-------------|-------------|---------------------------|
| ۱                                    | $L_1 = 0.4$ | $m_1 = 0.4$ | $I_1 = 1/18667$           |
| ۲                                    | $L_2 = 0.3$ | $m_2 = 0.4$ | $I_2 = 0.172$             |
| ۳                                    | $L_3 = 0.5$ | $m_3 = 0.4$ | $I_3 = 0.45$              |
| $m_{3A} = 0.5kg$ ، $m_{3L} = 0.5 kg$ |             |             | $I_{3mot} = 9/1e-6 kgm^2$ |

جدول (پ-۲) پارامترهای موتور

| Motor<br>۴۰V ، ۱۶۰W | $R$ | $K_b=K_m$ | $J$    | $B$      | $l/r$ |
|---------------------|-----|-----------|--------|----------|-------|
| ۱                   | ۱/۶ | ۰/۲۶      | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۱۴۸  | ۱۳۰   |
| ۲                   | ۱/۶ | ۰/۲۶      | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۸۱۷ | ۱۰۰   |
| ۳                   | ۱/۶ | ۰/۲۶      | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۱۳۸  | ۱۰۴۷  |



## منابع و مراجع

- [1] J. P. Huissoon, D. L. Strauss, J. N. Rempel, S. Bedi, and H. W. Kerr, "Multivariable Control of Robotic Gas Metal Arc Welding," J. Mater. Proc. Technol., vol. 43, pp. 1-12, 1994.
- [2] Baheti, Haefner and Sweet, "Operational Performance of Vision Based Arc Welding Robot Control Systems," Sensors and Controls for Automated Manufacturing and Robotics, American Society of Mechanical Engineers, NY, Dec. 1984.
- [3] Charalabos and Nickolaos, "Multiplexed and Distributed Control of Automated Welding", Control system magazine, IEEE. vol. 14, pp. 13-24, 1994.
- [4] Fourligkas and Doumanidis, "Distributed Parameter Control of Automated Welding Processes", 2<sup>nd</sup> IEEE Mediterranean Symposium on new Direction in Control and Automation, June 1994.
- [5] C.J. Einerson, H.B. Smartt, J.A. Johnson, P.A. Taylor and K.L. Moore, "Development of an Intelligent Control System for Cooling Rate and Fill Control in GMAW", in Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on trends in Welding Research, June 1992.
- [6] D.E. Henderson, P.V. Kokotovic, J.L. Schiano, D.S. Rhode, "Adaptive Control of an Arc Welding Process," Control system magazine, IEEE. vol. 13, pp. 49-53, 1993.
- [7] D.V. Nishar, J.L. Schiano, W.R. Perkis and R.A. Weber, "Adaptive Control of Temperature in Arc Welding", Control system magazine, IEEE. vol. 14, pp. 4-12, 1994.
- [8] S. Ozcelik, K.L. Moore, and D.S. Naidu, "Adaptive Control of Gas-Metal Arc Welding (GMAW) Process ", Annual Report, FY7: Advanced Welding Control Project. ANEEL URC Project NO. G22, Measurement and Control Engineering Research Center, College of Engineering Idaho State University, Pocatello, Idaho.Pocatello, April 1997.
- [9] S. Ozcelik, K.L. Moore, and D.S. Naidu, "Application of MIMO Direct Adaptive Control to Gas Metal Arc Welding," Proc. of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, vol.3, pp. 1762-1766 June 1998.

- [10] K.L. Moore, D.S. Naidu, R. Yender, and J. Tyler, "Gas Metal Arc Welding Control: Part I –Modeling and Analysis–," *Nonlinear Analysis, Methods and Application*, vol. 30, no. 5, pp. 3101-3111, 1997
- [11] J.S. Thomsen, "Advanced Control Methods for Optimization of Arc Welding," Ph.D. Dissertation, Department of Control Engineering, Aalborg University, Denmark, 2005.
- [12] K.L. Moore, D.S. Naidu, and M.A. Abdelrahman, "Gas Metal Arc Welding Control: Part II –Control Strategy–," *Nonlinear Analysis*, vol. 35, pp. 85-93, 1999.
- [13] J.S. Thomsen, "Feedback Linearization based Arc Length Control for Gas Metal Arc Welding," *American Control Conference*, Portland, USA, vol. 5, pp. 3568-3573, June 2005.
- [14] M.A. Abdelrahman, "Feedback Linearization Control of Current and Arc Length in GMAW Systems," *Proc. of the American Control Conference*, Philadelphia, Pennsylvania, vol. 3, pp. 1757-1761, June, 1998.
- [15] M. Jalili-Kharaajoo, V. Gholampour, H. Ebrahimirad, and A.R. Asna Ashari, "Robust Nonlinear Control of Current and Arc Length in GMAW Systems," *Proc. Conf. on Control Applications*, vol. 2, pp. 1313-1316, 2003.
- [16] W.F. Clocksin, "An Implementation of Model-Based Visual Feedback for Robot Arc Welding of Thin Sheet Steel", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 13-26, 1985.
- [17] Pirrer and Martin, "An Approach to Expert robot Welding system," *IEEE TRANS. ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS*, vol. 18, no. 2, March/April 1988.
- [18] Nagarajan, S. Banerjee, P. Chen, W. Chin, B.A. , "Control of the welding process using infrared sensors", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 8, no. 1, pp. 86-93, 1992.
- [19] R. Agarwala, "Control of Robot Integrated Gas metal Arc Welding (GMAW) Process", MSc. Thesis, Department of mechanical and Industrial Engineering, Texas A&M; M University-Kingsville, 2000.
- [20] S. B. Chen, Y. Zhang, T. Qit and T. Lin, "Robotic Welding System With Vision-Sensing and Self-Learning Neuron Control of Arc Welding Dynamic Process", *J. Intelligent and Robotic System*, vol. 36, no. 2, pp. 191-308, 2003.

- [21] J. J. Slotine and S. S. Sastry, "Tracking Control of Non-Linear Systems Using Sliding Surfaces With Application to Robot Manipulators", *Int. J. Control*, vol. 6, No. 3, pp. 49-59, 1983.
- [22] P. Xu, G. Xu, X. Tang, S. Yao "A Visual Seam Tracking System for Robotic Arc Welding", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 37, no. 1-2, pp. 70-75, 2008.
- [23] C. C. Cheah, S. Kawamura, S. Arimoto, "Feedback Control for Robotic Manipulator with an Uncertain Jacobian Matrix", *Journal of Robotic Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 119-134, 1999.
- [24] C. Liu, C. C. Cheah, and J. J. E. Slotine, "Adaptive Jacobian tracking control of rigid-link electrically driven robots based on visual task-space information," *Automatica*, 42, pp. 491–1501, 2006.
- [25] A. Visioli, and G. Legnani, "On the Trajectory Tracking Control of Industrial SCARA Robot Manipulators", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, vol. 49, Issue 1, pp. 224 – 232, Feb 2002.
- [26] M. W. Spong, M. Vidyasagar, "Robust Linear Compensator Design for Nonlinear Robotic Control", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, Issue 4, pp. 345-351, Aug 1987.
- [27] M. M. Fateh, H. Farhangfard, "On the transforming of control space by manipulator Jacobian. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 101-108, February, 2008.
- [28] M. M. Fateh, S. S. Farahani, A. Khatamianfar, " Task Space Control of Welding Robot Using a fuzzy coordinator", Submitted to *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2008.
- [29] W. Chen, J. Mills, K. J. Chu, and D. Sun, "A Fuzzy Compensator for Uncertainty of Industrial Robots", *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Seoul, Korea, , vol. 3, pp. 2968 – 2973, May 2001.
- [30] J. Zhang, A. Knoll, R. Schmidt, " A Neuro\_Fuzzy Control Model for Fine\_Positioning of Manipulators", *Robotic and Autonomous system*, Vol. 32, pp. 101\_113, 2000.
- [31] M. Lanzetta, M. Santochi and G. Tantussi, "On-line control of robotized Gas Metal Arc Welding", *CIRP Annals Manufacturing Technology*, pp. 13-16, vol. 50, Issue 1, 2001.

- [32] M. Golob, A. Koves, A. Puklavec, and B. Torvornik, "Modelling, Simulation and Control of the GMAW Welding Proces," 15th Triennial World Congress, Int. Fed. Of Automatic Control, Barcelona, Spain, 2002.
- [33] J. J. E. Slotine, J. K. Hedrick, "Robust input-output feedback linearization", International Journal of Control, vol. 57, Issue 5, pp 1133 – 1139 , 1993.
- [34] J. J. E. Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1991.
- [35] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Second Edition, Addison-Wesley, 1989.
- [36] M. Spong, M.Vidyasagar, "*Robot Dynamic and Control*", Wiley, New York, 1989.
- [37] L. H. Sharif, S. Yamane, T. Sugimoto and K. Oshima, "Adaptive control system for gap variation in narrow-gap robotic welding", Welding International 2003, vol. 17, no. 8, pp. 605–614, 2003.
- [38] M. Fridenfalk, "Development of Intelligent Robot System Based on Sensor Control", Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, Sweden, 2003.
- [39] Y. Kim, S. Rhee, "Development of an arc sensor model using a fuzzy controller in gas metal arc welding", Meas. Sci. Technol., vol. 12, pp. 534-541, 2001.
- [40] G.U. Lee, M.S. Oh, S.B. Kim, "Development of High Speed Rotating Arc Sensor System for Tracking Complicate Curved Welding Lines "Int. J. of precision engineering vol. 4. No. 6, pp. 1892-1901, 2003.
- [41] H. Luo, X. Q. Chen, "laser visual sensing and process control in robotic arc welding of Titanium alloys", Robotic welding, intelligence and automation, vol. 299, pp.110-122, 2004.
- [42] J. W. Kim, H. S. Bae, "A study on a vision sensor system for tracking the I-butt weld joints", Journal of mechanical science and technology, vol. 19, no. 10, pp. 1856-1863, 2005.
- [43] M. J. Tsai, S. D. Lin, M. C. Chen, "Mathematical model for robotic arc welding off-line programming system", Int. J. Computer Integrated Manufacturing, vol. 5, no. 4, pp. 300-309, 1992.
- [44] P. Li, Y. Zhang, " Robust Sensing of Arc Length", IEEE Transaction on Instrumentation and Measurment, Vol, 50, No 3, pp. 697-704, June 2001.

- [45] Q. L. Wang and P. J. Li, "Arc Light Sensing of Droplet Transfer and its Analysis in Pulsed GMAW Process", *Welding J*, Vol. 76, No 11, pp 458-469, 1997.
- [46] Q. L. Wang, P. J. Li and M. Naka, "Arc Light Sensing of Droplet Transfer in Pulsed GMAW [MIG/MAG Welding] process", *Quart. J. Japan. Welding Soc.* Vol. 15, No. 3, pp 415-424, 1997.
- [47] B.H. You, J. W. Kim, "A Study on Automatic Seam Tracking System Using Electromagnetic Sensor for Sheet Metal Arc Welding of Butt Joints", *J. KWS*, vol. 15, no. 1, pp. 81-91, 1997.
- [48] O. Mihalache, R. Grimberg, E. Radu, A. Savin, "Finite Element Numerical Simulation for Eddy Current Transducer with Orthogonal Coils", *Sens. Actuators A: Phys.* , vol. 59, pp. 213-218, 1997.
- [49] J. H. Shin, J. W. Kim, "A Study of a Dual-Electromagnetic Sensor for Automatic Weld Seam Tracking", *J. KWS*, vol. 18, no. 4, pp. 483-488, 2000.
- [50] Weidmueler Inc., Inductive Sensor, Opration Manual, German, 1994.
- [51] C. S. Yang, H. C. Park, Y. H. Han, "Seam Tracking System in a Laser Welding, Inductive and Laser Vision Sensor ", *J. KWS*, vol. 12, no. 2, pp. 28-38, 1994.
- [52] K. Y. Bae, J. H. Park, "A Study on Development of Inductive Sensor for Automatic Weld Seam Tracking ", *J. of Materials Processing Technology*, vol. 176, pp. 111-116, 2006.
- [53] M. Enokizono, T. Todaka, Y. Tuchida, N. hachiki, " Finite Element Analysis of a Moving Magnetic Flux Type Sensor Developed for Non-destructive Testing", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 3, pp. 1853-1856, 1999.
- [54] C. Baratoletti, R. Buonanni, L. G. Fantasia, R. Frulla, W. Gaggioli, G. Sacerdoti, "The Design of a Proximity Inductive Sensor", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 9, pp. 1180-1190, 1998.
- [55] Maxim Inc. Data Sheet, Max038-High Frequency Waveform Generator 2001.
- [56] B. carlin, *Ultrasonics*, New York: McGraw-Hill, 1949.
- [60] F. B. Prinz and J. F. hoburg, " Sensors for Seam Characterization in Robotic Arc Welding", in *Robotics Research and Advanced Applications*, Proc. Amer. Soc. Mechanical Engineers, (Phoenix, AZ), pp. 279-287, November 1982.

- [61] E. L. Estochen, C. P. Neuman and F. B. Prinz, "Application of Acoustic Sensors to Robotic Seam Tracking ", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. IE-31, No. 3, August 1984.
- [62] J. M. Martin, L. Calderon and R. Ceres, "Weld Seam Detection and Recognition for Robotic Arc-Welding Through Ultrasonic Sensor ", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Proc. ISIE, pp. 310-315, 1994.
- [63] R. Ceres, J. M. Martin, L. Calderon, T. F. Bastos and M. Armada, "Environment Recognition in Welding Processes by Ultrasonic sensors", Sensors and Actuators A, Vol. 37-38, pp. 639-643, 1993.
- [64] J. R. Pellam and J. K. Galt, " Ultrasonic Propagation in Liquids: Application of Pulse Technique to Velocity and Absorption Measurement sat 15 Megacycles", J. Chem. Phys, Vol. 14, pp. 608-614, 1946.
- [65] B. Maqueira, " Robotic Seam Tracking of Weld Joints Through the Use of an Ultrasonic Sensor: System Development and Implementation", M.S. Thesis, Georgia Inst. Technol., pp.195, 1986.
- [66] B. Maqueira, C. I. Umeagukwu and Jarzynski, "Application of Ultrasonic Sensors to Robotic Seam Tracking", IEEE Transaction on Robotics and Automatic, Vol. 5, No. 3, pp. 337-343, 1989.
- [67] H.Y. Shen, T. Lin and S. B. Chen, "A Study on Vision-Based Real-Time Seam Tracking in Robotic Arc Welding", Robotic Welding Intelligence and Automation, vol. 362, pp. 311-318, 2007.
- [68] J. Y. Yu, S. J. Na, "A study on Vision Sensors for Seam Tracking of Height-Varying Weldment. Part 1: Mathematical Model", Mechatronics, Vol. 7, No. 7, pp. 599-612, 1997.
- [69] J. S. Smith, C. Balfour, " Real-Time Top-Face Vision Based Control of Weld Pool Size", Journal of Materials Processing Technology, vol. 32, No. 4, pp. 334-340, 2005.
- [70] J. S. Kim, Y. T. Son, H. S. Cho, K. Koh, "A Robust Method for Vision-Based Seam Tracking in Roboric Arc Welding", Mechatronic, Vol. 6, No. 2, pp. 141-163, 1996.
- [71] J. Ge, Z. Zhu, D. He, L. Chen, " A Vision-Based Algorithm for Seam Detection in a PAM Process for Large-Diameter Stainless Steel Pipes ", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 26, No. 10, pp. 1006-1011, 2005.

- [72] M. Galicki, "Motion Control of Robotic Manipulators in Task Space", Proc. of the IEEE\RSJ, Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol. 3, pp. 2061-2066, 2002.
- [73] C.C. Cheah, S. Kawamura, S. Arimoto, "Feedback Control for Robotic Manipulator with Uncertain Kinematics and Dynamics", Proc. of the IEEE, Int. Conf. on Robotics & Automation, vol. 4, pp. 3067-3612, 1998.
- [74] L.A. Dessaint, M. Saad, B. Hebert, S. Gargour "An Adaptive Controller for a Direct-Drive SCARA Robot: Analysis and Simulation", Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, vol. 1, pp. 411-420, 1990.
- [75] C.Y. Kuo, S.P.T. Wang, "Robust Position Control of Robotic Manipulator in Cartesian Coordinates", IEEE Trans on Robotic and Automation, Vol. 7, No. 5, pp. 653-659, 1991.
- [76] N. Garcia, G. Mamani, O. Reinoso, O. Reinoso, R. Aracil, R. Caralli, "Visual Servo Control of Industrial Robot Manipulator", 15th Triennial World Congress, Spain, 2002.
- [77] M. F. Mendes, W. Kraus, E. R. De Pieri, " Variable Structure Position Control of an Industrial Robotic Manipulator ", J. Braz. Soc. Mech. Sci. Vol. 24, No. 3 pp. 256-266, July 2002.
- [78] K. Erbatur, A. Sabanovic, O. Kayank, "Robot Trajectory Control in Cartesian Space With Sliding Modes ", International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Proceedings of the 22nd IEEE IECON, Vol. 1, pp. 189-194, 1996.
- [79] V. Santibañez, R. Kelly, and M. A. Llama, "A Novel Global Asymptotic Stable Set-Point Fuzzy Controller With Bounded Torques for Robot Manipulators," IEEE Transactions on fuzzy systems, vol. 13, no. 3, pp. 362-372, 2005.
- [80] V. Santibaez, R. Kelly, and M. A. Llama, "Global Asymptotic Stability of a Tracking Sectorial Fuzzy Controller for Robot Manipulators," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, vol. 34, no. 1, pp. 710-718, 2004.
- [81] R. J. Wai and P. C. Chen, "Robust Neural-Fuzzy-Network control for robot manipulator including actuator dynamics," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1328 – 1349, 2006.
- [82] H. B. Cary and S. C. Helzer, *Modern Welding Techology*, Prentice Hall, 2004.

[84] H. Ecker, and F. Breiteneker, "Comparison 11 (SCARA Robot) - Definition",  
March 1998, <http://www.argesim.org/comparisons/c11/definition/c11def.html>

[85] <http://www.Weldguru.com/RoboticWelding.html>



## **Abstract**

In this thesis the robotic gas metal arc welding system is considered. The control of arc welding process (welding machine) and the position of welding torch are performed separately in this class of control. After introducing the gas metal arc welding process, the kinematic and dynamic modeling and nonlinear control of SCARA robot for welding task in the work space. In addition, the requirements of robotic welding control system, especially topics of sensors and seam tracking systems are introduced. Singular states in path tracking and robot control are investigated and appropriate trajectories are designed. Various types of robot control methods in Cartesian space are presented and compared together. Nonlinear control of robot manipulator based on feedback linearization for the objective of precise position and speed tracking of welding torch in order to achieve desired weld quality is presented. The effects of uncertainties in applying feedback linearization are considered and the methods to suppress these disturbances are described. The novel aspect of this thesis is the design of welding robot control system in task space in presence of uncertainties that is performed independently from arc welding process control. Total structured and unstructured uncertainties and external disturbances has been noticed and nonlinear control methods such as feedback linearization, sliding mode and fuzzy control in both joint and task space are applied in order to control the end effector of welding robot, which carries the welding torch, and these methods are compared together based on tracking error in task space. In the end, performance of control system is confirmed by simulation of presented control methods on one SCARA robot.

*Keywords:* Welding Robot, SCARA Robot, Feedback Linearization control, Fuzzy control, Robust Control, Seam Tracking, Sensor.

IN THE NAME OF GOD



SHAHROOD UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY

# Nonlinear Control of Robotic Gas Metal Arc Welding System

A Thesis

Presented in Partial Fulfillment of the  
Requirements for the Degree Master of Science in  
Control Engineering

Supervisor

Prof. M.M. Fateh

By

Shahab Shahrabi Farahani

Department of Electrical and Robotic Engineering  
Shahrood University of Technology

Summer 2008