



Robotics

رباتیک

بهنام میری پور فرد
استادیار گروه مهندسی رباتیک دانشگاه صنعتی همدان
همدان، ایران
bmf@hut.ac.ir

تعریف مکاترونیک:

ترکیب هم افزایانه (سینرژیک) رشته های
مکانیک، الکترونیک، کنترل و علوم کامپیوتر

نهایت علم مکاترونیک = رباتیک

مرجع اصلی درس:

مدلسازی و کنترل ربات



Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar

JOHN WILEY & SONS, INC. 2009

مترجم : دکتر ایرج حسن زاده "عضو هیئت علمی دانشگاه تبریز"، ناشر: انتشارات آشینا.

برخی مراجع دیگر

- John J. Craig, Introduction to Robotics: Mechanics and Control (3rd Edition 2004), *Prentice Hall*, ISBN: 978-0201543612
- S.B. Niku, Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications, *Prentice Hall*, 2001
- Jorge Angeles, Fundamentals of Robotic Mechanical Systems, *Springer*, 1997.
- Lung-Wen Tsai, Robot Analysis, *John Wiley & Sons*, 1999.
- F.L. Lewis et al, Control of Robot Manipulators, *Macmillan* 1993.
- R. Murray, Z. Li, and S.S. Sastry, A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, *CRC Press*, 1994.

این کتاب مرجع اصلی دو درس **رباتیک** و **کنترل ربات** است.

فهرست:

فصل اول : مقدمه

فصل دوم : حرکت اجسام صلب و تبدیلات همگن

فصل سوم : سینماتیک مستقیم و معکوس

فصل چهارم : ژاکوبین ها

فصل پنجم : طراحی حرکت و تولید مسیر

فصل ششم : کنترل مفصل به فرم مستقل

فصل هفتم : دینامیک

فصل هشتم : کنترل چند متغیره

فصل نهم : کنترل نیرو

فصل دهم : کنترل غیر خطی هندسی

فصل یازدهم : بینایی کامپیوتری

فصل دوازدهم : کنترل سرو بینایی

برخی از دانشگاه‌هایی که از این کتاب به عنوان مرجع اصلی استفاده می‌کنند:

- ECE 470 Introduction to Robotics at **the University of Illinois**
- 15-384 Robotic Manipulation at **Carnegie Mellon University (CMU)**
- ME 752 Mechanical Design of Manipulators and Robots at **the Ohio State University**
- CSE 551A Robotic Manipulators at **Washington University.**
- BME 495 Biomedical Robotics at **Northwestern University.**
- M.E. 530.646 Introduction to Robotics at **Johns Hopkins University**
- Computer Science 290N Mathematic Elements of Structure and Behavior Modeling in Computer Graphics at UCSB
- ME586: Mechanics and Control of Robotic Manipulators Department of Mechanical, Aerospace and Biomedical Engineering University of Tennessee-Knoxville
- ECE 6-4990 at Mississippi State
- ME/AE 349 Robotic Manipulators and Mechanisms at University of Missouri-Rolla
- ENGR 466 - Integrated Mechatronics and Embedded Systems Project at University of Victoria
- FRT005F Robotics --- Kinematics, Dynamics and Control at Lund University
- Autonome Robotersysteme at Christian-Albrechts-Universitaet zu Kiel
- Robotics in the Department of Mechanical Engineering at Konkuk University, Seoul, Korea
- ME302 Introduction to Robotics I and ME406 Robotics II at Embry-Riddle Aeronautical University.
- MCE/EEC 647/747 - Robot Dynamics and Control in the Department of Mechanical Engineering at Cleveland State University.
- Robotics at **Hamedan University of Technology (HUT)**



1

مقدمه

این کتاب با مسایل بنیادی رباتها سروکار دارد:

- ❖ سینماتیک
- ❖ دینامیک
- ❖ تولید مسیر
- ❖ بینایی کامپیوتری
- ❖ کنترل

پرداختن مفصل به همه موضوعات نیازمند چندین جلد کتاب است.

هدف اصلی معرفی کامل جنبه های مهم موضوعات فوق در رباتهای صنعتی و بازوهای مکانیکی ماهر است.

لغت "ربات" اولین بار توسط نمایشنامه نویس اهل چک، کارل چاپک (Karel Capek) در سال 1920 در نمایشنامه رباتهای جهانی روسوم استفاده شد.

اصطلاح رباتا (robotia) در زبان چک به معنی کار است. از آن به بعد برای ابزارهای متعدد مکانیکی مانند تله اپراتورها ماشین های زیر آبی، ماشین آلات سیار زمینی خودکار و غیره استفاده شد.



در واقع هر وسیله ای که تا اندازه ای به صورت خودمختار و معمولاً تحت کنترل کامپیوتر کار کند ربات گفته می شود.

در این درس منظور از ربات یک بازوی مکانیکی ماهر صنعتی کنترل شونده با کامپیوتر است (مانند شکل)

کلمه "رباتیک" نیز توسط یک نویسنده ابداع شد.

نویسنده روسی تبار آمریکایی کتابهای علمی تخیلی، آیزاک آسیموف، اولین بار این کلمه را در سال 1942 در داستان های کوتاه خود استفاده کرد. نظر آسیموف در مورد رباتیک بسیار روشن تر از Čapek بود. آسیموف همچنین پیشنهاد معروف خود یعنی سه "قانون رباتیک" را ارائه داد

قانون اول

یک ربات نباید به انسان صدمه بزند و یا با عدم انجام کاری باعث شود انسان آسیب ببیند.

قانون دوم

ربات باید از دستوراتی که انسان می دهد پیروی کند مگر آنکه قانون اول نقض شود.

قانون سوم

ربات باید از خود مراقبت کند مگر آنکه قوانین اول و دوم نقض شوند.

تعاریف متعددی برای ربات وجود دارد:

"An automatic device that performs functions normally ascribed to humans or a machine in the form of a human."

Webster's Dictionary

"a reprogrammable manipulator device"

British Department of Industry

“رباتیک رشته ای است که در مورد ارتباط ادراک به عمل بحث می کند”

"Robotics is that field concerned with the intelligent connection of perception to action."

Mike Brady, Oxford University

یک تعریف رسمی توسط RIA [Robot Institute of America (RIA)]

ربات، بازوی ماهر مکانیکی چند منظوره و قابل برنامه ریزی مجدد است که برای جابجایی مواد، ابزار و یا دستگاههای مخصوص ساخته شده است که از طریق حرکت های برنامه ریزی شده متنوع کارهای مختلف را به اجرا در می آورد.

A robot is a **reprogrammable** multifunctional manipulator designed to move material, parts, tools, or specialized devices through variable **programmed** motions for the performance of a **variety of tasks**.
[from the Robot Institute of America (RIA)]

یک **مغز کامپیوتری** است که به ربات سودمندی و سازگاری می بخشد.
انقلاب رباتیک در حقیقت بخشی از انقلاب کامپیوتری است.

برخی مزایای رباتیک

- کاهش هزینه های نیروی کار
- افزایش دقت و بهره وری
- افزایش انعطاف پذیری در مقایسه با ماشین آلات تخصصی
- بشتر کار های کسل کننده، تکراری، و یا خطرناک توسط ربات انجام می شود.

اولین رباتهای مدرن

- در اوایل دهه 1950 اولین ربات مدرن توسط George C. Devol از کنتاکی در آمریکا ساخته شد او یک بازوی ماهر مکانیکی به نام "Unimate," با ترکیب "Universal Automation." را اختراع و ثبت کرد.
- در دهه بعدی او تلاش کرد این ربات را به صنعت بفروشد، اما موفق نشد.
- در اواخر 1960 یک مهندس/تاجر به نام Joseph Engleberger اختراع او را خرید و توانست آن را به صورت یک ربات صنعتی در آورد و یک شرکت به نام Unimation را جهت تولید ربات برای فروش تاسیس کرد
- به خاطر این تلاشها و موفقیت ها، در صنعت، انگلبرگر را به عنوان پدر رباتیک می شناسند.
- پس از آن دانشگاه ها در تولید رباتهای جدید پیشرفت ها را آغاز کردند.



George Devol, Jr. (1912–) is a prolific American inventor. He was born in Louisville, Kentucky, and in 1932 founded United Cinephone Corp. which manufactured phonograph arms and amplifiers, registration controls for printing presses and packaging machines. In 1954, he applied for US patent 2,988,237 for Programmed Article Transfer which introduced the concept of Universal Automation or “Unimation”. Specifically it described a track-mounted polar-coordinate arm mechanism with a gripper and a programmable controller – the precursor of all modern robots.

In 2011 he was inducted into the National Inventors Hall of Fame. (Photo on the left: courtesy of George C. Devol)



Joseph F. Engelberger (1925–) is an American engineer and entrepreneur who is often referred to as the “Father of Robotics”. He received his B.S. and M.S. degrees in physics from Columbia University, in 1946 and 1949, respectively. Engelberger has been a tireless promoter of robotics. In 1966, he appeared on *The Tonight Show Starring Johnny Carson* with a Unimate robot which poured a beer, putted a golf ball, and directed the band. He promoted robotics heavily in Japan, which led to strong investment and development of robotic technology in that country, and gave testimony to Congress on the value of using automation in space. He has written two books *Robotics in Practice* (1980) and *Robotics in Service* (1989), and the former was translated into six languages.

Engelberger served as chief executive of Unimation until 1982, and in 1984 founded Transitions Research Corporation which became HelpMate Robotics Inc. and was later sold. He remains active in the promotion and development of robots for use in elder care. He was elected to the National Academy of Engineering and received the Beckman Award and the Japan Prize. Each year the Robotics Industries Association presents an award in his honour to “persons who have contributed outstandingly to the furtherance of the science and practice of robotics.”

ربات به صورتی که تعریف شد در واقع با ممزوج شدن دو فن آوری قبل از خود، متولد شده است

- Teleoperators

- Numerically controlled milling machines.

تله اپراتورها یا ماشین های استاد- برده (master-slave)، در خلال جنگ دوم جهت جابجایی مواد رادیو اکتیو ساخته شدند.

کنترل عددی با کامپیوتر (Computer numerical control (CNC)) به خاطر نیاز به دقت بالا که در ماشینکاری برخی قطعات (مثلا قطعات هواپیما) لازم بود به وجود آمد.

رباتها در واقع، خصوصیات مکانیکی تله اپراتورها را با خودمختاری و برنامه پذیری دستگاههای CNC ترکیب می کنند.

اولین کاربردها

جابجایی مواد و تزریق به قالبها و یا مهر زنی این رباتها را می توان برنامه ریزی کرد تا مثلا به نقطه A حرکت کند و یا یک پنجه را باز یا بسته کند. این ربات ها توانایی حسگری بیرون را ندارند. کاربردهای پیچیده تر مانند جوشکاری، سنگ زنی و مونتاژ نه تنها نیازمند حرکات دقیق است بلکه نیازمند برخی حسگری های بیرونی مانند دیدن، لامسه و یا حس میزان نیرو هستند.

مدلسازی ریاضی رباتها

1-1-1 نمایش نمادین رباتها

بازوهای مکانیکی ماهر از رابط هایی (لینک هایی) تشکیل شده است که با مفاصل به هم وصل می شوند تا یک زنجیره سینماتیکی تشکیل دهند. مفاصل یا دورانی اند (Revolute) و یا کشویی (prismatic)

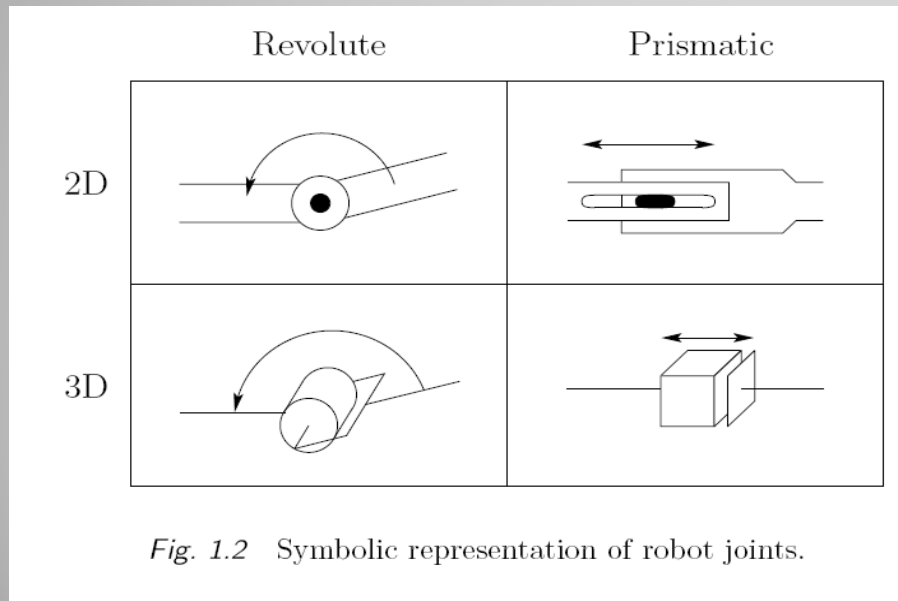
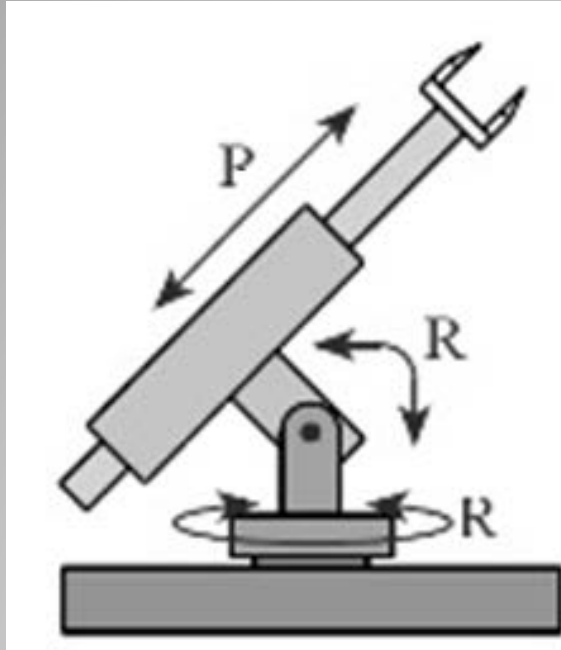
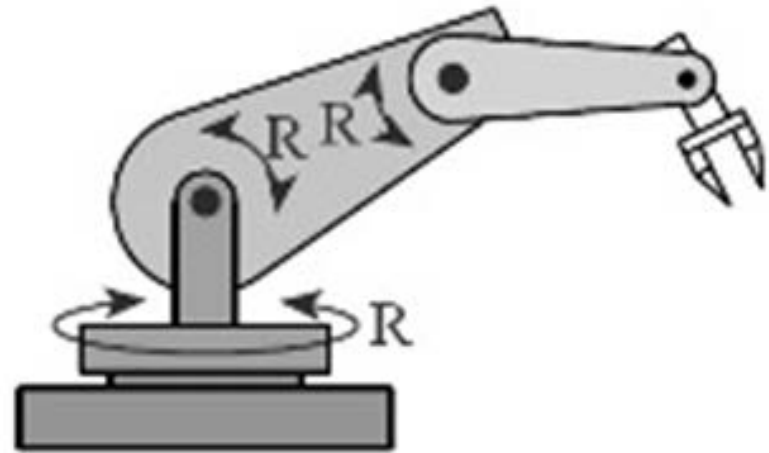


Fig. 1.2 Symbolic representation of robot joints.

مفاصل دورانی را با R و کشویی را با P نشان می دهیم. به عنوان مثال یک بازوی سه لینکی با سه مفصل دورانی به صورت (RRR) نشان داده می شود.



RRP



RRR

1.1.2 فضای پیکربندی

پیکربندی ربات: یک وضعیت خاص از ربات (در یک لحظه) که در آن موقعیت کامل هر نقطه از ربات را می توان معین نمود.

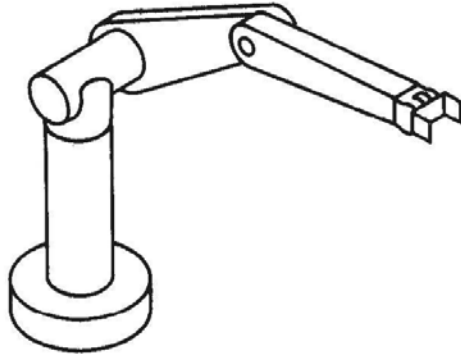
مجموعه تمام پیکربندی های ممکن فضای پیکربندی را تشکیل می دهد.

وقتی می گوئیم ربات در پیکربندی q قرار دارد به این معنا است که مقادیر متغیرهای مفصلی برابر $q_1 \dots q_n$ است.

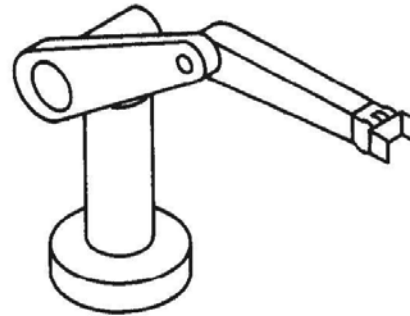
$q_i = \theta_i$ برای مفصل دورانی

$q_i = d_i$ برای مفصل کشویی

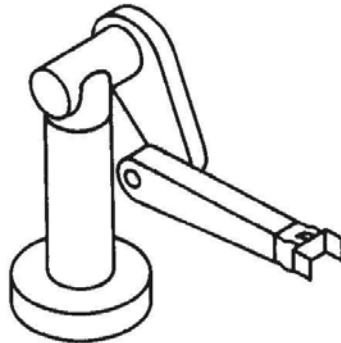
چند پیکربندی نمونه برای ربات PUMA



LEFT and ABOVE Arm



RIGHT and ABOVE Arm

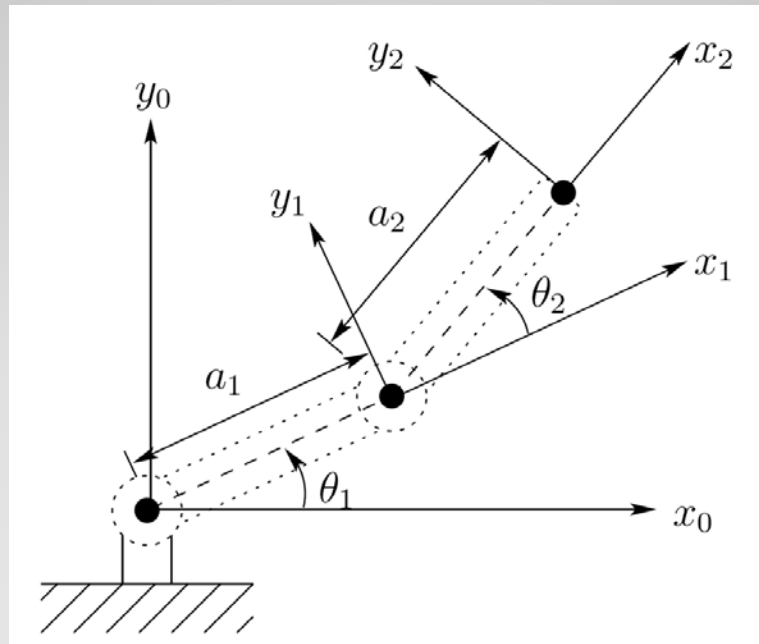


LEFT and BELOW Arm



RIGHT and BELOW Arm

درجه آزادی (DOF) سیستم برابر n است اگر بتوان پیکربندی آن را حداقل با n پارامتر تعیین کرد. بنابراین تعداد درجه آزادی برابر بعد فضای پیکربندی است. در یک بازوی مکانیکی ماهر تعداد مفاصل همان تعداد درجات آزادی است.



جسم صلب در فضا 6 **درجه آزادی** دارد
سه درجه برای تعیین **موقعیت** (مثلا موقعیت مرکز جرم آن)
سه درجه تعیین **جهت گیری** (مثلا زوایای رول، پیچ و یاو)
بنابراین یک بازوی ماهر حداقل باید دارای 6 درجه آزادی باشد.
اگر درجه آزادی کمتر از 6 باشد، بازو نمی تواند به هر نقطه در فضای کاری برود و
جهت گیری دلخواه داشته باشد.

در برخی کاربردها (مثلا دسترسی به پشت یک مانع) ممکن است بیش از 6 درجه
لازم باشد.

به بازوی ماهر مکانیکی که بیش از 6 لینک دارد بازوی دارای افزونگی سینماتیکی
گفته می شود. (**kinematically redundant manipulator**)
با افزایش تعداد لینکها کنترل ربات مشکلتر می شود.

1.1.3 فضای حالت

یک پیکربندی یک توصیف لحظه ای از هندسه بازو فرام می کند اما چیزی در مورد پاسخ دینامیکی آن ارائه نمی دهد.

در مقابل، حالت ربات یک مجموعه ای از متغیرهاست که علاوه بر توصیف دینامیک بازو و ورودی آن برای تعیین حالت های آتی از آن استفاده می شود.

فضای حالت مجموعه همه حالت های ربات را شامل می شود.

در بازوی مکانیکی ماهر

$$x = (q, \dot{q})^T$$

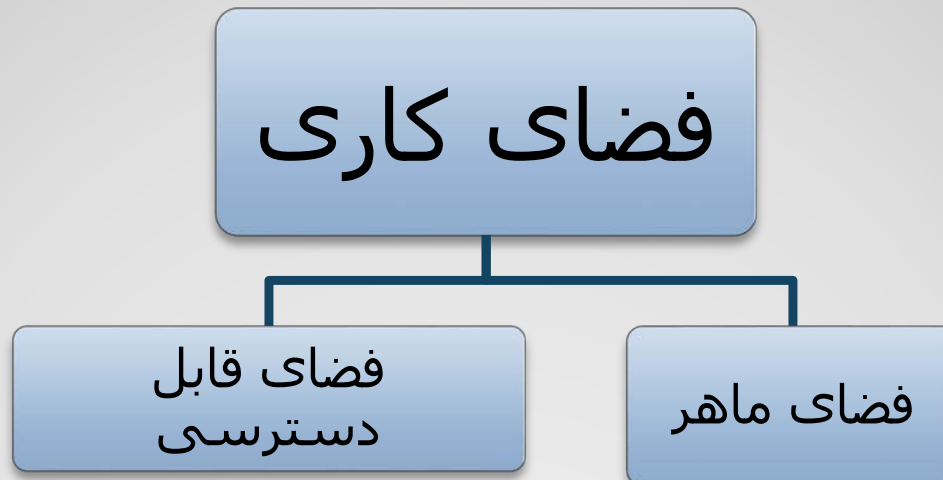
$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = u.$$

با ملوم بودن x و با حل معادله دینامیکی ربات (که به صورت دیفرانسیلی است) می توان حالت های بعدی را تعیین کرد.
بعد فضای حالت برابر $2n$ است.

1.1.4 فضای کاری

فضای کاری یک بازوی مکانیکی ماهر تمامی حجم جاروب شده توسط مجری نهایی می باشد به گونه ای که بازو همه حرکت های ممکن را اجرا کند.

هندسه ربات و محدودیت های مکانیکی مفاصل فضای کاری را محدود می کند. مثلا ممکن است یک مفصل دورانی مقید به دوران کمتر از 360 درجه باشد.



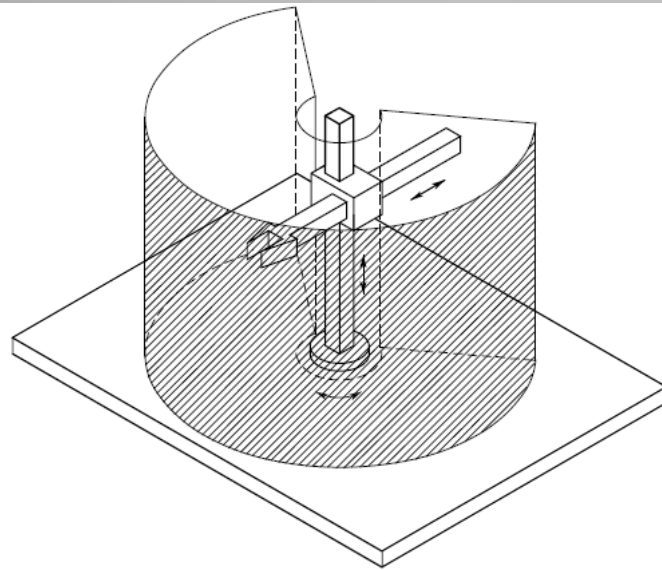


Fig. 1.4. Cylindrical manipulator and its workspace

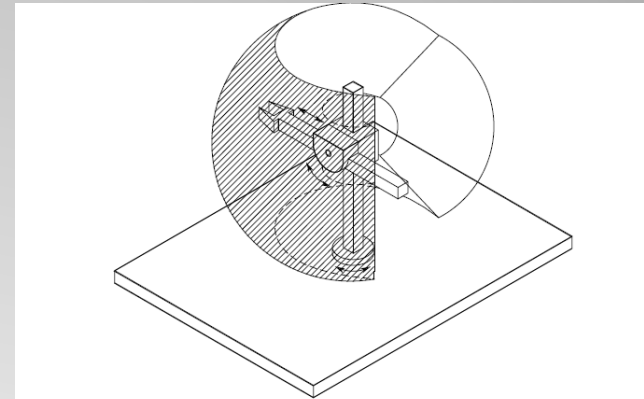
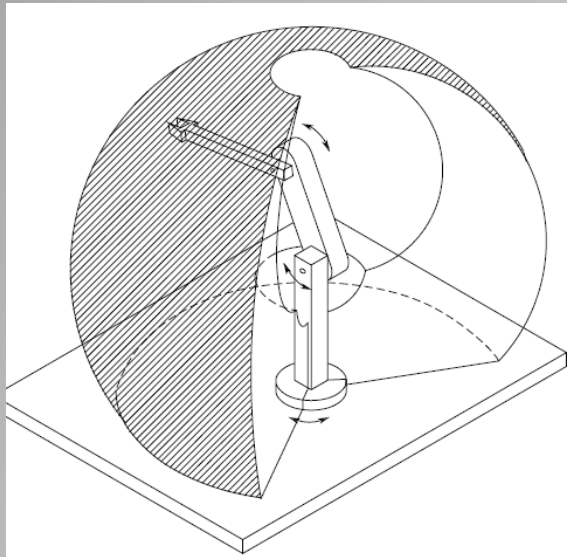


Fig. 1.5. Spherical manipulator and its workspace



Anthropomorphic manipulator and its workspace

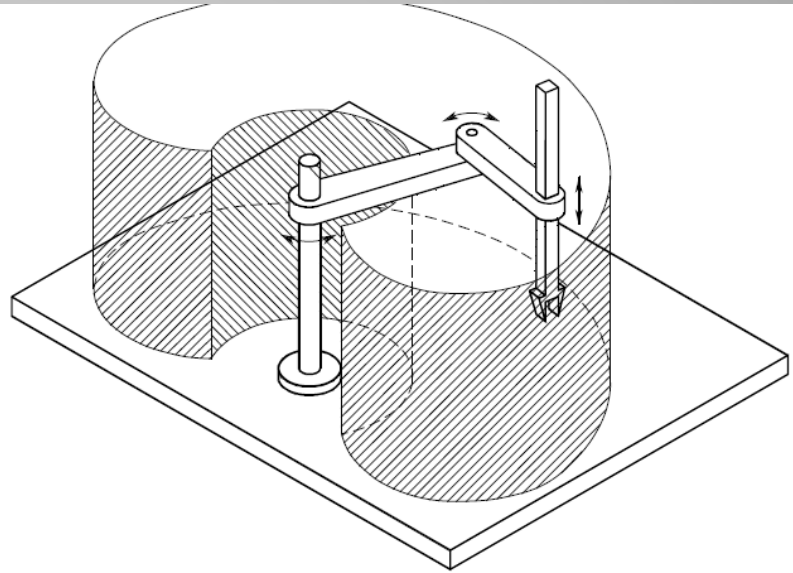


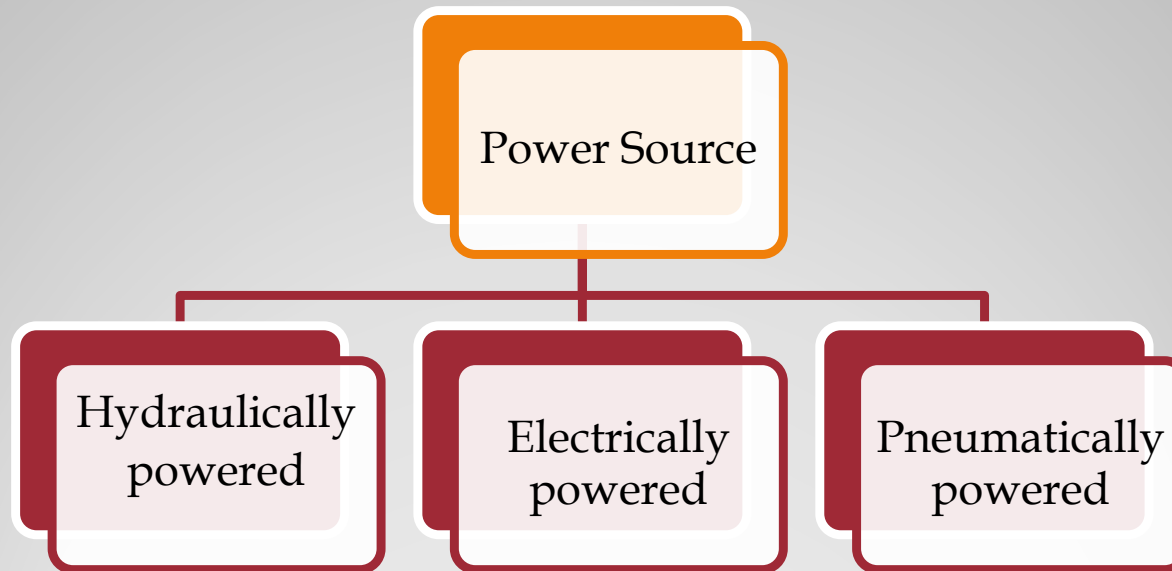
Fig. 1.6. SCARA manipulator and its workspace

2.1 ربات به عنوان دستگاه مکانیکی

در مدلسازی ریاضی برخی جنبه های فیزیکی لحاظ نخواهند شد مانند خصوصیات مکانیکی (برای مثال نحوه کارکرد مفاصل، دقت و تکرارپذیری و ابزارهای متصل به مجری نهایی)

1.2.1. طبقه بندی بازوهای مکانیکی ماهر رباتیک

از نظر منبع قدرت



□ محرکه های هیدرولیکی

سرعت بالا، گشتاور بالا

امکان نشت و تمیز نبودن، سرو صدای بالا

□ محرکه های الکتریکی

تمیز و بی سرو صدا و ارزان

□ محرکه های نیوماتیکی

ارزان و ساده اما عدم کنترل دقیق



- ❖ ربات های مونتاژکار کوچک، با محرک الکتریکی و مدل لولایی
- ❖ ربات های غیر مونتاژکار در جوشکاری و رنگ پاشی و جابجایی مواد



ربات های قدیمی بدون سرو بودند (حلقه باز) با کاربرد جابجایی مواد

ربات‌های با سرو (حلقه بسته- چندکاره و با قابلیت برنامه ریزی مجدد) تقسیم بندی این رباتها بر اساس روشی که کنترلر برای هدایت مجری نهایی استفاده می کنند:

- ربات نقطه به نقطه (کنترل فقط در نقاط اعمال می شود نه مابین نقاط)
- ربات در این نقاط با جعبه آموزشی (Teach Pendant) آموزش داده می شود
- ربات های مسیر پیوسته

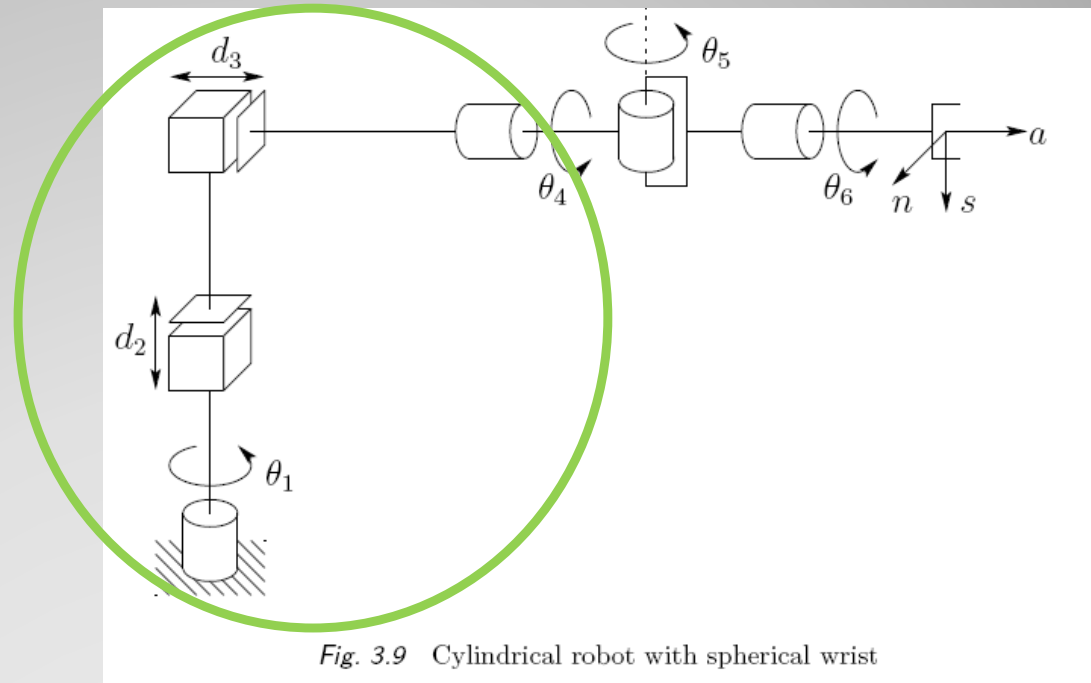
در کل مسیر مجری نهایی کنترل می شود می توان سرعت و شتاب را را هم کنترل کرد.

این روش نیاز به کنترل و برنامه ریزی پیچیده دارد.

از نظر شکل هندسی

اکثر رباتهای امروزی 6 و یا کمتر از آن درجه آزادی دارند
بازوی مکانیکی ماهر را می توان متشکل از بازو و مچ و مجری نهایی دانست.
بازو ها معمولا یکی از انواع زیر می باشند:

1. Articulated (RRR)
2. Spherical (RRP)
3. SCARA (RRP)
4. cylindrical (RPP)
5. Cartesian (PPP)



رباتهای فوق همگی سری هستند

بازوهای مکانیکی ماهر موازی هم وجود دارند که در آنها زنجیره سینماتیکی بسته است.

1.2.2 سیستم‌های رباتیک

بازوی مکانیکی ماهر چیزی فراتر از یک سری اتصالات مکانیکی است.

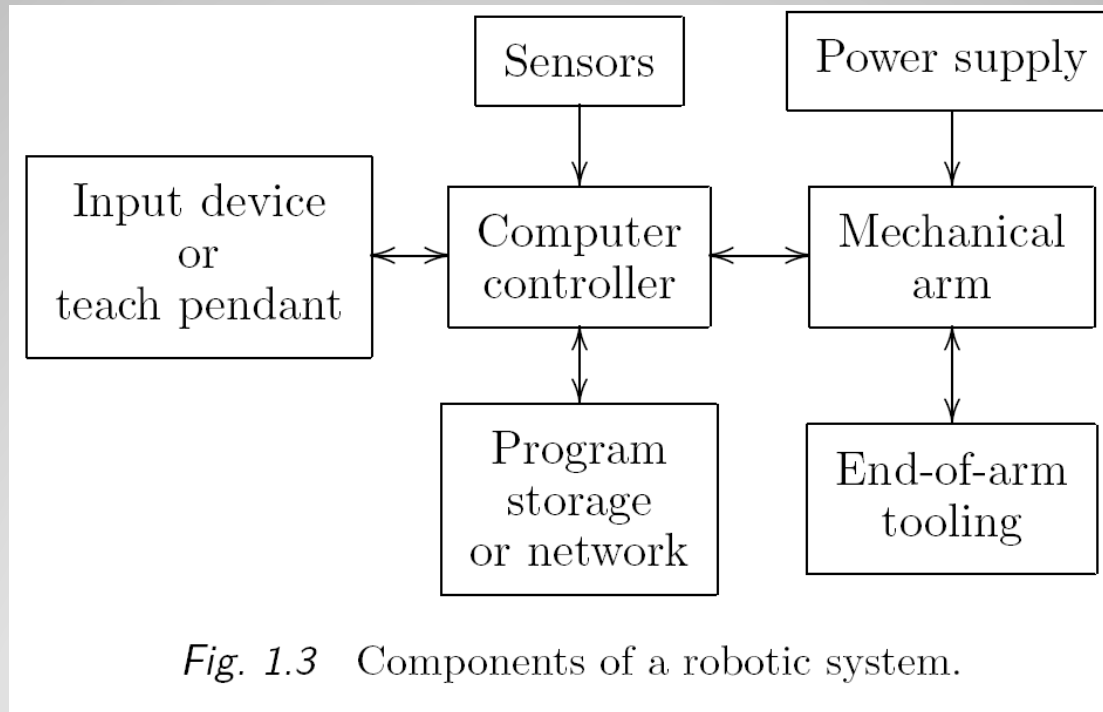


Fig. 1.3 Components of a robotic system.

1.2.3 دقت و تکرار پذیری

دقت یک بازوی مکانیکی ماهر به اندازه میزان توانایی آن در نزدیک شدن به یک نقطه داده شده است.

تکرارپذیری ربات به اندازه توانایی آن در نزدیک شدن مجدد به نقطه از قبل آموزش دیده شده است.

دقت تحت تاثیر خطای محاسباتی، دقت ماشینکاری در ساخت بازو، تاثیر انعطاف پذیری، پس زنش چرخنده ها و ... است. به همین دلیل سعی می شود رباتها کاملا صلب ساخته شوند. دقت را می توان با حسگری مستقیم (مثلا با بینایی و نه با رمزگذار (encoder)) افزایش داد.

تکرارپذیری به تفکیک پذیری (**resolution**) کنترلر بستگی دارد. تفکیک پذیری کنترلر به کوچکترین نمو حرکتی که کنترلر می تواند آن را حس کند، گفته می شود. رزولوشن ربات برابر با کل مسافت طی شده توسط انتها تقسیم بر $2n$ است. که n برابر تعداد بیت های رمزگذار است. بنابراین یک محور خطی، مفصل کشویی، نسبت به مفصل دورانی رزولوشن بیشتری دارد. (چون فاصله طی شده در امتداد خط راست کمتر از کمان است).

در فصل های آتی خواهیم دید که مفاصل دورانی سبب کوپلینک بالا بین رابط ها می شود و این امر موجب تجمع خطا و مشکل شدن کنترل می شود.
پس مزیت مفاصل دورانی چیست؟
چابکی و جمع و جور بودن و مانور بهتر در نزدیکی موانع
دامنه حرکت را در شکل زیر مقایسه کنید.

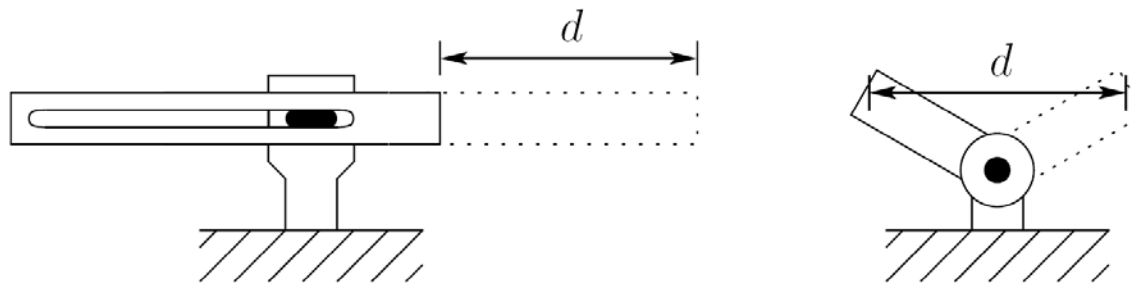


Fig. 1.4 Linear vs. rotational link motion.

1.2.4 مچ ها و مجری های نهایی Wrists and End-Effectors

به مفاصل بین بازو و مجری نهایی مچ گفته می شود

معمولا مفاصل مچ همگی دورانی اند.
امروزه طراحی مچ های کروی که سه
محور مفاصلشان در یک نقطه متقاطعند رو
به افزایش است

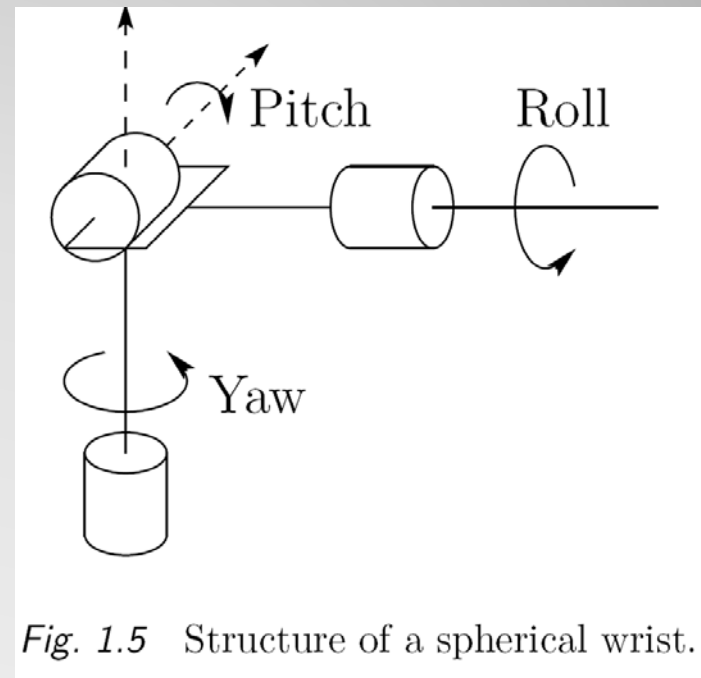


Fig. 1.5 Structure of a spherical wrist.

بازوی مکانی ماهر سه درجه آزادی برای رسیدن به یک موقعیت نیاز دارد که توسط بازو به آن می رسد.

سه درجه آزادی برای جهت گیری هم توسط مچ پوشش داده می شود. ممکن است بسته به کاربرد درجه آزادی مچ کمتر هم باشد. برای مثال ربات اسکارا چهار درجه آزادی دارد. سه درجه برای بازو- یک درجه برای مچ (دوران حول محور Z)

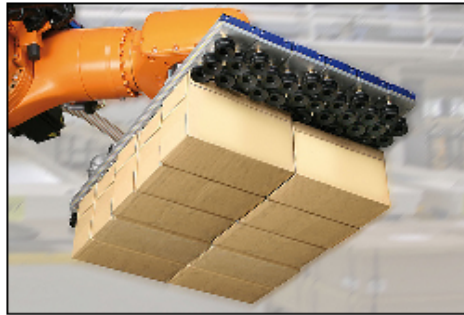


Fig. 1.14 The Epson E2L653S SCARA Robot. Photo Courtesy of Epson.

مجری نهایی یا ابزار است که کار انجام می دهد.

It has been said that a robot is only as good as its hand or end-effector.

ساده ترین نوع مجری نهایی گیره ها (*grippers*) هستند.
امروزه پژوهشهای زیادی بر روی ساخت دست های آنتریوموفیک (شبيه انسان) (*anthropomorphic*) انجام می شود.



Vacuum Gripper



Pneumatic Gripper



Hydraulic Gripper



Servo-Electric Gripper

1.3 چیدمان های سینماتیکی متداول

چیدمان های زیر در عمل متداول هستند:

1.3.1 ربات بند بند

Articulated manipulator (RRR)

ربات آرنجی و یا آنتروپومورفیک هم نامیده می شود



Fig. 1.6 The ABB IRB1400 Robot. Photo courtesy of ABB.

In both of these arrangements joint axis z_2 is parallel to z_1 and both z_1 and z_2 are perpendicular to z_0 .

This kind of manipulator is known as an **elbow manipulator**.

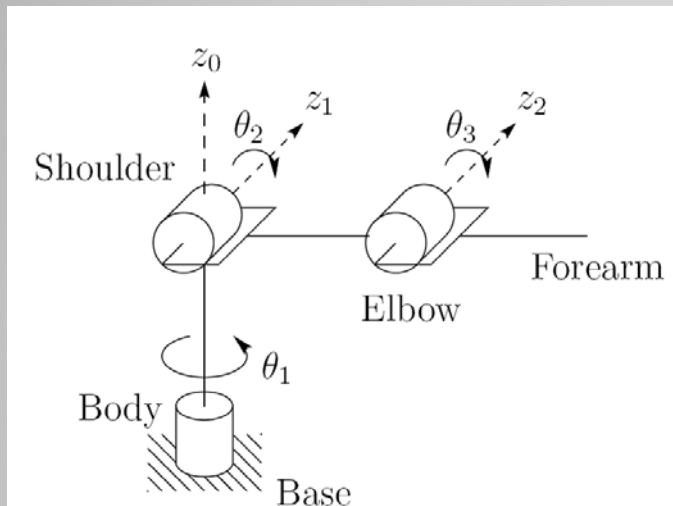


Fig. 1.8 Structure of the elbow manipulator.



Fig. 1.7 The Motoman SK16 manipulator.
با پیوند متوازی الاضلاع

شکل زیر دلیل نامگذاری ربات را نشان می دهد.

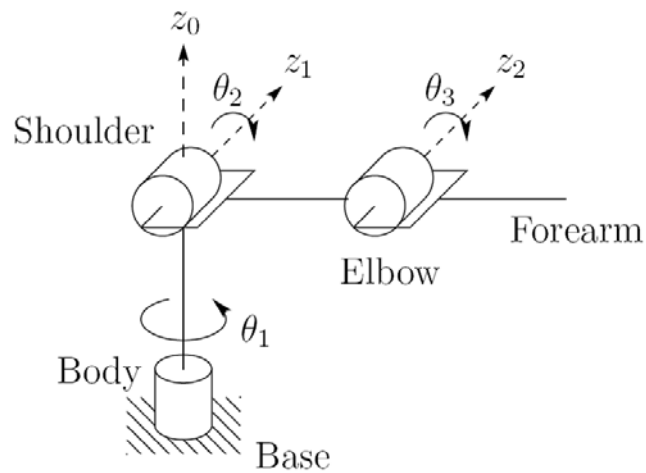
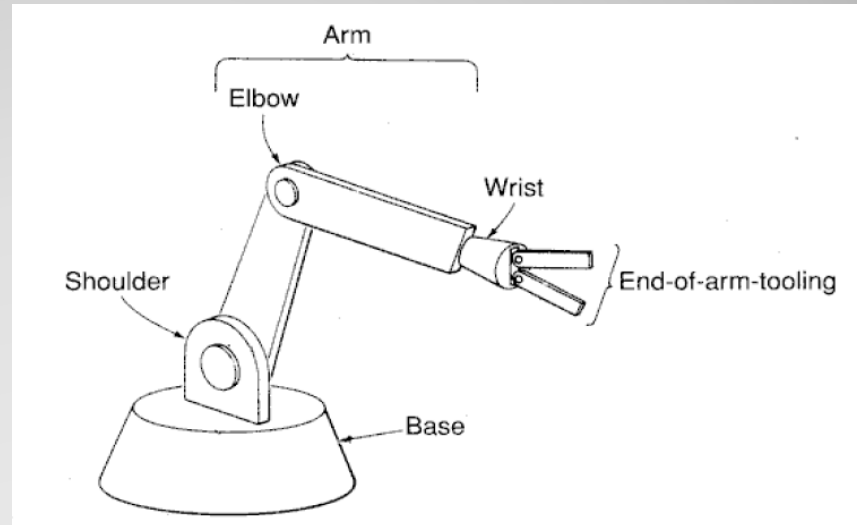


Fig. 1.8 Structure of the elbow manipulator.



پیوند (linkage) متوازی الاضلاع از پیوند آرنجی مهارت کمتری دارد.

اما مزیت های مهمی هم دارد:

محرك مفصل سه بر روی لینک یک قرار دارد بنابراین لینکهای دو و سه را می توان سبکتر و موتورها را با قدرت پایین انتخاب کرد.

دینامیک آن هم نسبت به ربات آرنجی ساده تر و در نتیجه کنترل آن آسانتر است.



1.3.2 Spherical Manipulator (RRP)

By replacing the third or elbow joint in the revolute manipulator by a prismatic joint one obtains the spherical manipulator shown in Figure 1.10.

The term **spherical manipulator** derives from the fact that the **spherical coordinates** defining the position of the end-effector with respect to a frame whose origin lies at the **intersection of the three z axes** are the same as the first three joint variables.

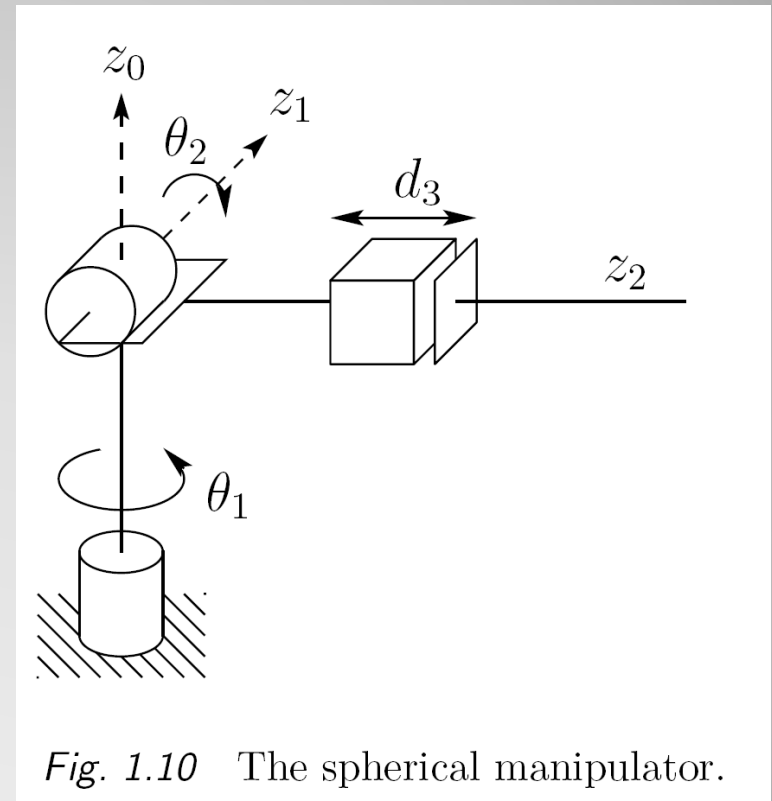


Fig. 1.10 The spherical manipulator.

Figure 1.11 shows the **Stanford Arm**, one of the most well known spherical robots. The workspace of a spherical manipulator is shown in Figure 1.12.

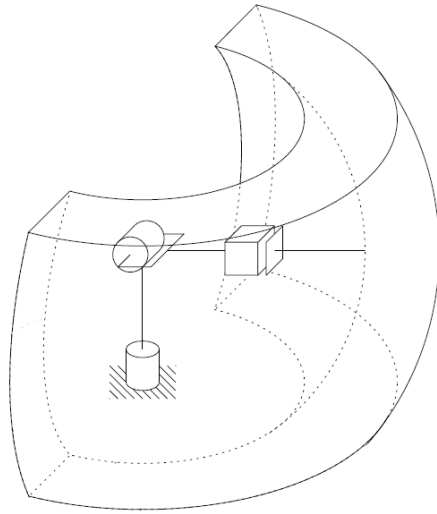


Fig. 1.12 Workspace of the spherical manipulator.

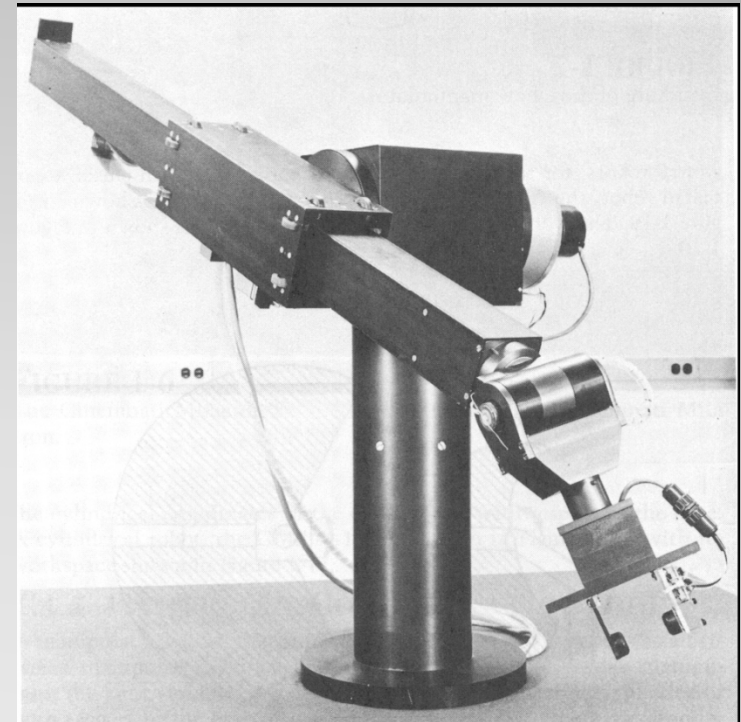


Fig. 1.11 The **Stanford Arm**. Photo courtesy of the Coordinated Science Lab, University of Illinois at Urbana-Champaign.

1.3.3 SCARA Manipulator (RRP)

The SCARA arm (for Selective Compliant Articulated Robot for Assembly) shown in Figure 1.13 is a popular manipulator, which, as its name suggests, is tailored for assembly operations.

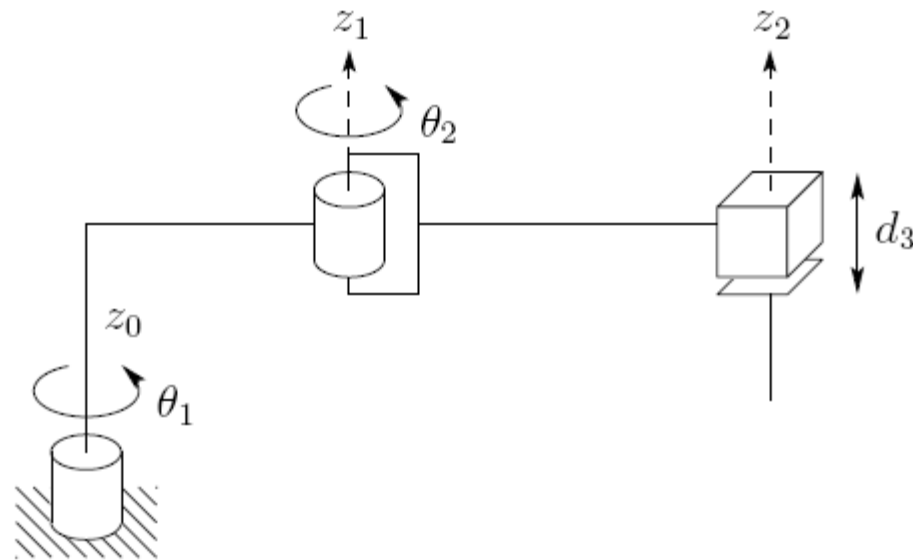


Fig. 1.13 The SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly).

Although the SCARA has an RRP structure, **it is quite different from the spherical manipulator** in both appearance and in its range of applications.

Unlike the spherical design, which has z_0 perpendicular to z_1 , and z_1 perpendicular to z_2 , the SCARA has z_0 , z_1 , and z_2 mutually parallel.

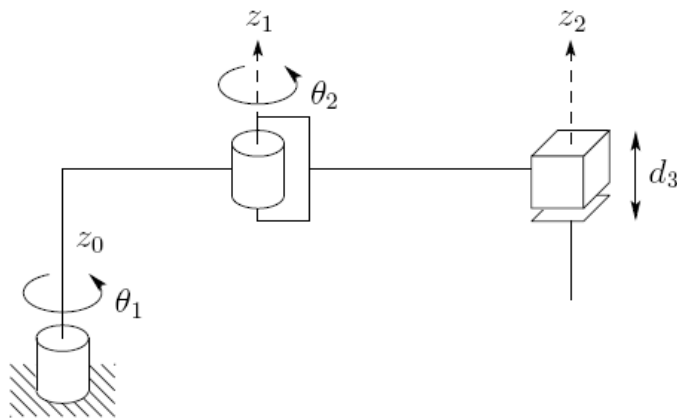


Fig. 1.13 The SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly).

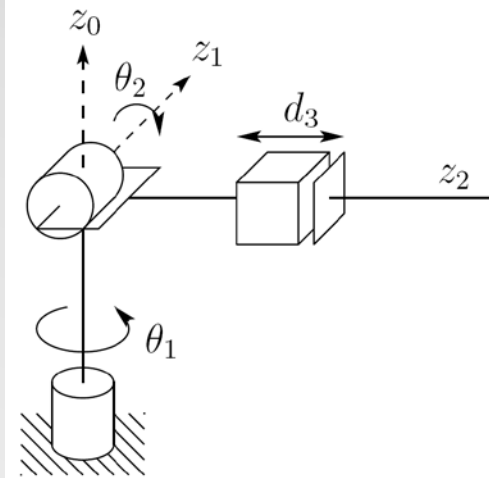


Fig. 1.10 The spherical manipulator.

Figure 1.14 shows the Epson E2L653S, a manipulator of SCARA type.

The SCARA manipulator workspace is shown in Figure 1.15.



Fig. 1.14 The Epson E2L653S SCARA Robot.
Photo Courtesy of Epson.

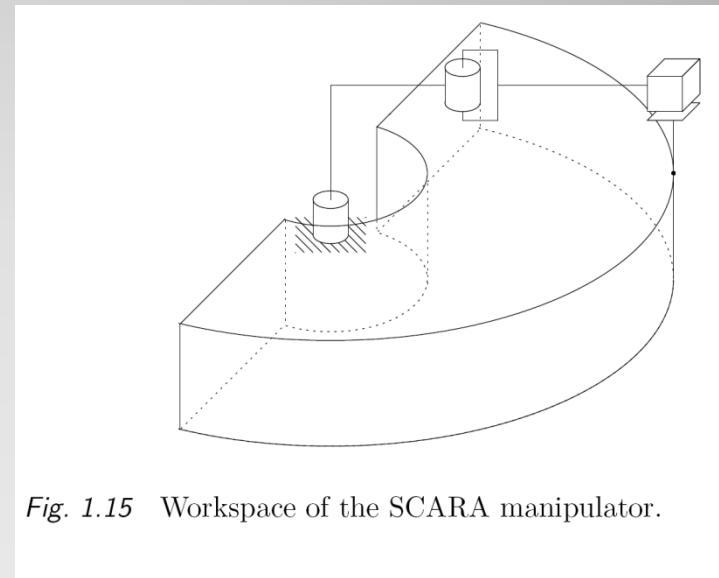


Fig. 1.15 Workspace of the SCARA manipulator.

1.3.4 Cylindrical Manipulator (RPP)

The cylindrical manipulator is shown in Figure 1.16. The first joint is revolute and produces a rotation about the base, while the second and third joints are prismatic.

As the name suggests, the joint variables are the cylindrical coordinates of the end-effector with respect to the base. A cylindrical robot, the Seiko RT3300, is shown in Figure 1.17, with its workspace shown in Figure 1.18.



Fig. 1.17 The Seiko RT3300 Robot. Photo courtesy of Seiko.

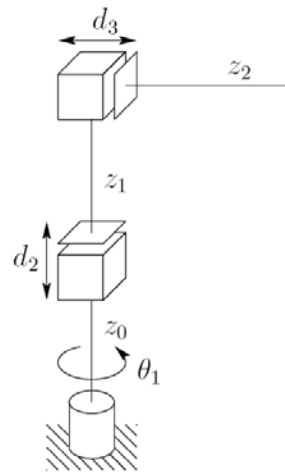


Fig. 1.16 The cylindrical manipulator.

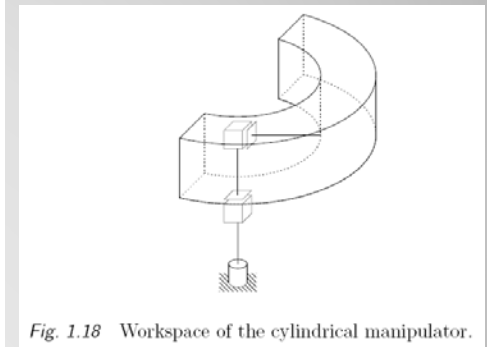


Fig. 1.18 Workspace of the cylindrical manipulator.

1.3.5 Cartesian manipulator (PPP)

A manipulator whose first three joints are prismatic is known as a Cartesian manipulator, shown in Figure 1.19.

For the Cartesian manipulator the joint variables are the Cartesian coordinates of the end-effector with respect to the base.

As might be expected the kinematic description of this manipulator is the simplest of all manipulators.

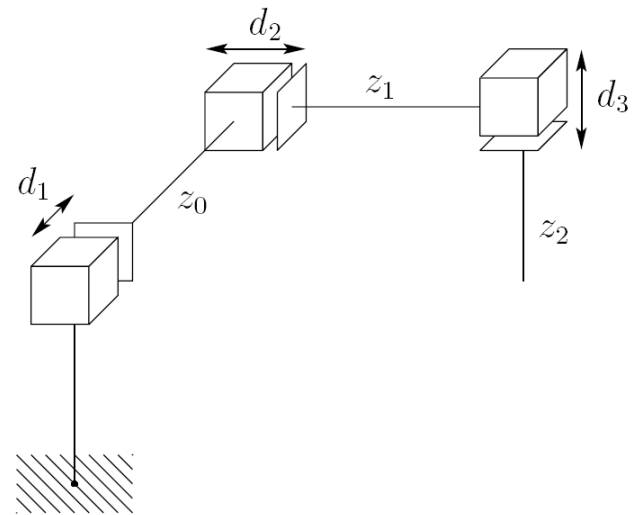


Fig. 1.19 The Cartesian manipulator.

Cartesian manipulators are useful for table-top assembly applications and, as gantry robots, for transfer of material or cargo.

An example of a Cartesian robot, from Epson-Seiko, is shown in Figure 1.20.

The workspace of a Cartesian manipulator is shown in Figure 1.21.



Fig. 1.20 The Epson Cartesian Robot. Photo courtesy of Epson.

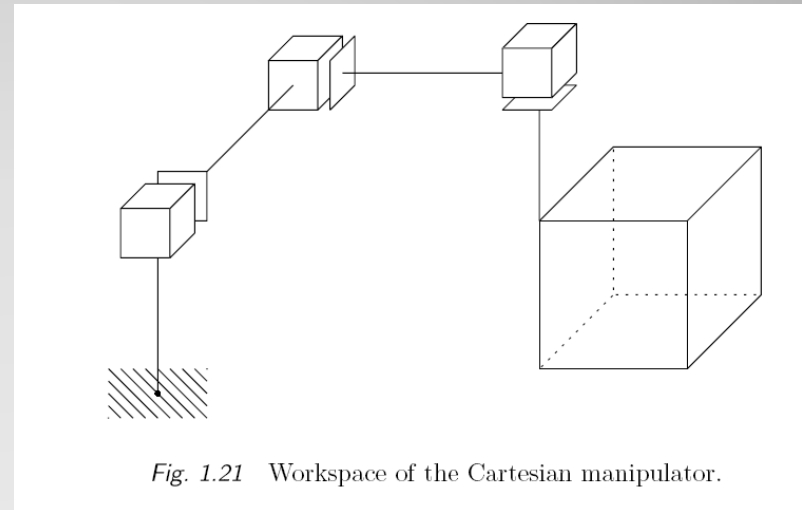


Fig. 1.21 Workspace of the Cartesian manipulator.

1.3.6 Parallel Manipulator

A **parallel manipulator** is one in which some subset of the links form a **closed chain**. More specifically, a parallel manipulator has two or more independent kinematic chains connecting the base to the end-effector. Figure 1.22 shows the ABB IRB 940 Tricept robot, which is a parallel manipulator.

The closed chain kinematics of parallel robots can result in **greater structural rigidity**, and hence **greater accuracy**, than open chain robots.

The kinematic description of parallel robots is fundamentally **different from that of serial link robots** and therefore requires different methods of analysis.

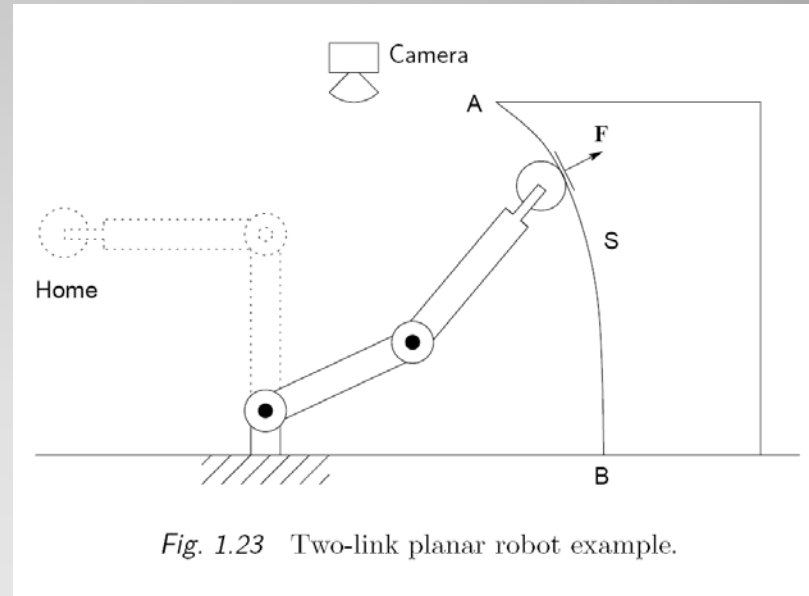


Fig. 1.22 The ABB IRB940 Tricept Parallel Robot. Photo courtesy of ABB.

1.4 OUTLINE OF THE TEXT

A typical application involving an industrial manipulator is shown in Figure 1.23.

The manipulator is shown with a grinding tool that it must use to remove a certain amount of metal from a surface.



In the present text we are concerned with the following question:

What are the basic issues to be resolved and what must we learn in order to be able to program a robot to perform such tasks?

The ability to answer this question for a full six degree-of-freedom manipulator represents the goal of the present text. The answer is too complicated to be presented at this point. We can, however, use the simple two-link planar mechanism to illustrate some of the major issues involved and to preview the topics covered in this text.

Suppose we wish to move the manipulator from its home position to position A, from which point the robot is to follow the contour of the surface S to the point B, at constant velocity, while maintaining a prescribed force F normal to the surface.

In so doing the robot will cut or grind the surface according to a predetermined specification.

To accomplish this and even more general tasks, we must solve a number of problems.

Below we give examples of these problems, all of which will be treated in more detail in the remainder of the text.

Forward Kinematics

The first problem encountered is to describe both the position of the tool and the locations A and B (and most likely the entire surface S) with respect to a common coordinate system.

In Chapter 2 we give some background on representations of coordinate systems and transformations among various coordinate systems.

Typically, the manipulator will be able to sense its own position in some manner using internal sensors (position encoders located at joints 1 and 2) that can measure directly the joint angles 1 and 2. We also need therefore to express the positions A and B in terms of these joint angles. This leads to the forward kinematics problem studied in Chapter 3, which is to determine the position and orientation of the end-effector or tool in terms of the joint variables.

It is customary to establish a **fixed coordinate system**, called the **world or base frame** to which all objects including the manipulator are referenced.

In this case we establish the base coordinate frame $o_0x_0y_0$ at the base of the robot, as shown in Figure 1.24.

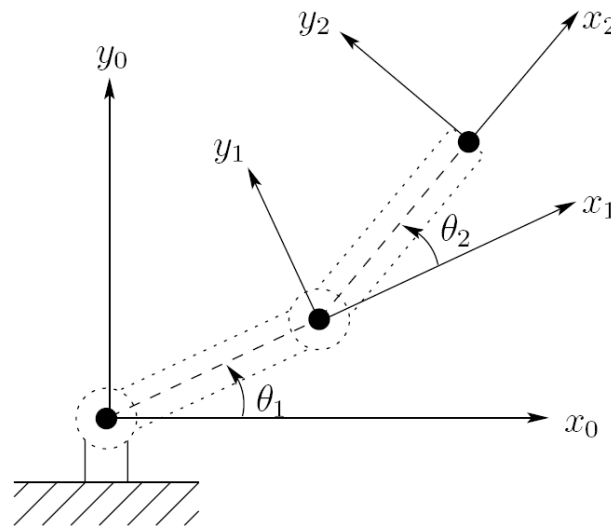


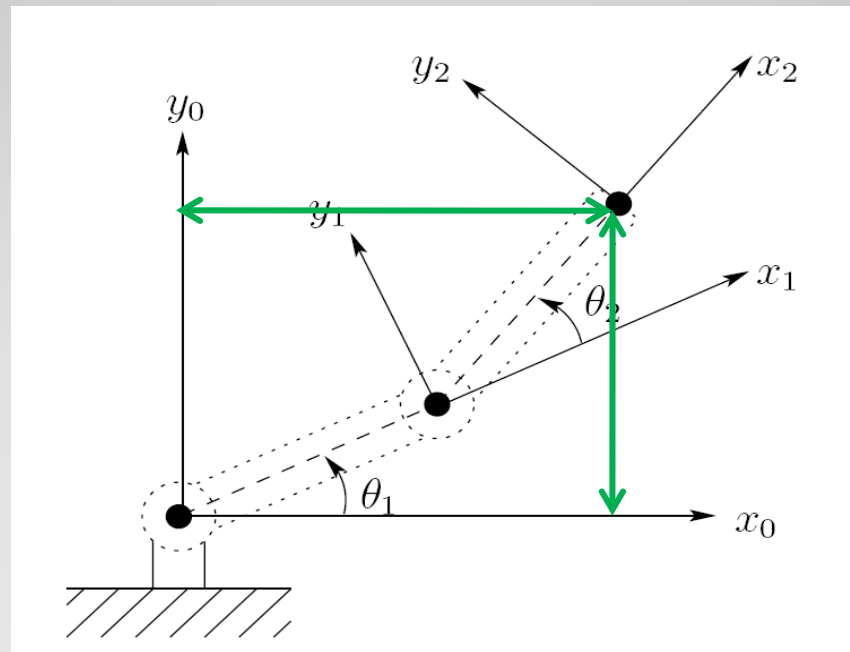
Fig. 1.24 Coordinate frames for two-link planar robot.

The coordinates (x, y) of the tool are expressed in world coordinate frame as:

$$x = x_2 = \alpha_1 \cos \theta_1 + \alpha_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1.1)$$

$$y = y_2 = \alpha_1 \sin \theta_1 + \alpha_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (1.2)$$

in which α_1 and α_2 are the lengths of the two links, respectively

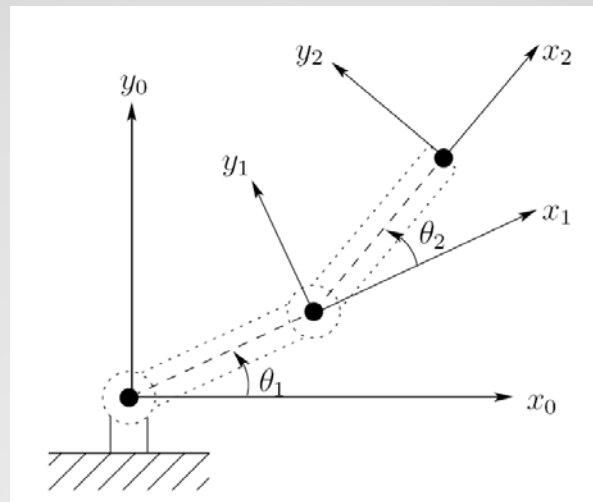


The **orientation of the tool frame** relative to the base frame is given by the direction cosines of the x_2 and y_2 axes relative to the x_0 and y_0 axes, that is,

$$\begin{aligned} x_2 \cdot x_0 &= \cos(\theta_1 + \theta_2); & x_2 \cdot y_0 &= -\sin(\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 \cdot x_0 &= \sin(\theta_1 + \theta_2); & y_2 \cdot y_0 &= \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned}$$

which we may combine into an orientation matrix

$$\begin{bmatrix} x_2 \cdot x_0 & y_2 \cdot x_0 \\ x_2 \cdot y_0 & y_2 \cdot y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

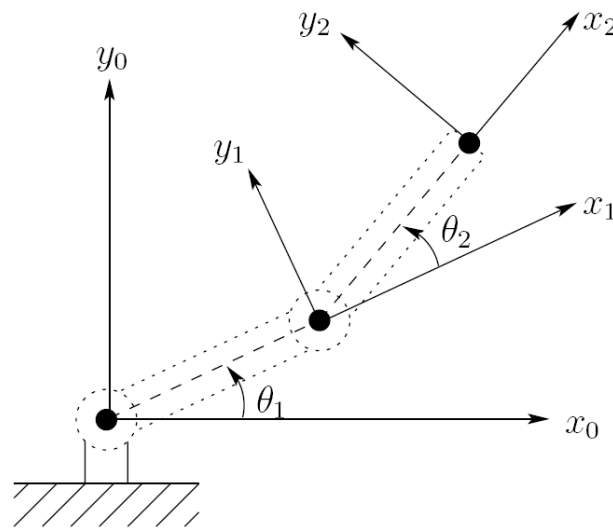


Equations (1.1), (1.2) and (1.3) are called the forward kinematic equations for the arm.

$$x = x_2 = \alpha_1 \cos \theta_1 + \alpha_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1.1)$$

$$y = y_2 = \alpha_1 \sin \theta_1 + \alpha_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (1.2)$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \cdot x_0 & y_2 \cdot x_0 \\ x_2 \cdot y_0 & y_2 \cdot y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (1.3)$$



For a six degree-of-freedom robot these equations are quite complex and cannot be written down as easily as for the two-link manipulator.

The general procedure that we discuss in Chapter 3 establishes coordinate frames at each joint and allows one to transform systematically among these frames using matrix transformations. The procedure that we use is referred to as the Denavit-Hartenberg convention. We then use **homogeneous coordinates** and **homogeneous transformations** to simplify the transformation among coordinate frames.

Inverse Kinematics

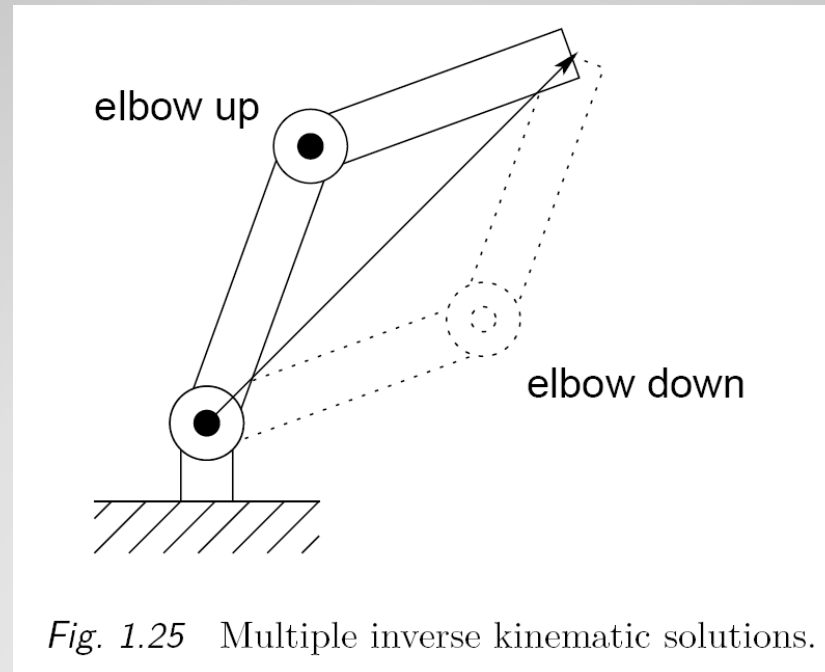
Now, given the joint angles 1, 2 we can determine the end-effector coordinates x and y . In order to command the robot to move to location A we need the inverse; that is, we need the joint variables 1, 2 in terms of the x and y coordinates of A . This is the problem of inverse kinematics.

In other words, given x and y in the forward kinematic Equations [\(1.1\)](#) and [\(1.2\)](#), we wish to solve for the joint angles.

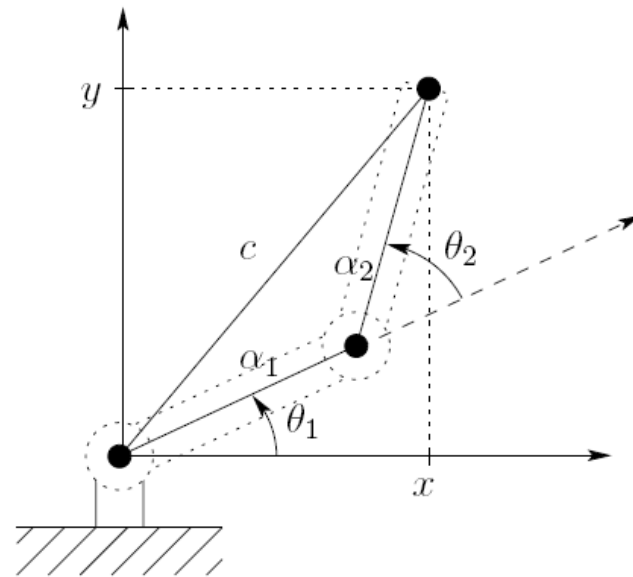
Since the forward kinematic equations are nonlinear, a solution may not be easy to find, nor is there a unique solution in general.

We can see in the case of a two-link planar mechanism that there may be no solution, for example if the given (x, y) coordinates are out of reach of the manipulator.

If the given (x, y) coordinates are within the manipulator's reach there may be **two solutions** as shown in Figure 1.25, the so-called elbow up and elbow down configurations, or there may be exactly one solution if the manipulator must be fully extended to reach the point. **There may even be an infinite number of solutions in some cases.**



Consider the diagram of Figure 1.26.



1.26 Solving for the joint angles of a two-link planar arm.

Using the Law of Cosines we see that the angle θ_2 is given by

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - \alpha_1^2 - \alpha_2^2}{2\alpha_1\alpha_2} := D \quad (1.4)$$

We could now determine θ_2 as

$$\theta_2 = \cos^{-1}(D) \quad (1.5)$$

However, a better way to find θ_2 is to notice that if $\cos(\theta_2)$ is given by Equation (1.4) then $\sin(\theta_2)$ is given as

$$\sin(\theta_2) = \pm\sqrt{1 - D^2} \quad (1.6)$$

and, hence, θ_2 can be found by

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{\pm\sqrt{1 - D^2}}{D} \quad (1.7)$$

The advantage of this latter approach is that both the elbow-up and elbow down solutions are recovered by choosing the positive and negative signs in Equation (1.7), respectively. It is left as an exercise (Problem 1-19) to show that θ_1 is now given as:

$$\theta_1 = \tan^{-1}(y/x) - \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_2 \sin \theta_2}{\alpha_1 + \alpha_2 \cos \theta_2} \right) \quad (1.8)$$

Notice that the angle 1 depends on 2. This makes sense physically since we would expect to require a different value for 1, depending on which solution is chosen for 2.

Velocity Kinematics

In order to follow a contour at constant velocity, or at any prescribed velocity, we must know the relationship between the velocity of the tool and the joint velocities. In this case we can differentiate Equations (1.1) and (1.2) to obtain

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -\alpha_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 - \alpha_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ \dot{y} &= \alpha_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 + \alpha_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\end{aligned}\quad (1.9)$$

Using the vector notation $x = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ and $\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$ we may write these equations as

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \begin{bmatrix} -\alpha_1 \sin \theta_1 - \alpha_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -\alpha_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \alpha_1 \cos \theta_1 + \alpha_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & \alpha_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \dot{\theta} \\ &= J\dot{\theta}\end{aligned}\quad (1.10)$$

The matrix J defined by Equation (1.10) is called the **Jacobian** of the manipulator and is a fundamental object to determine for any manipulator.

In Chapter 4 we present a systematic procedure for deriving the Jacobian for any manipulator in the so-called cross-product form.

The **determination of the joint velocities** from the end-effector velocities is conceptually simple since the velocity relationship is linear. Thus the joint velocities are found from the end-effector velocities via the **inverse Jacobian**

$$\dot{\theta} = J^{-1}\dot{x} \quad (1.11)$$

where J^{-1} is given by

$$J^{-1} = \frac{1}{\alpha_1\alpha_2 s\theta_2} \begin{bmatrix} \alpha_2 c\theta_1 + \theta_2 & \alpha_2 s\theta_1 + \theta_2 \\ -\alpha_1 c\theta_1 - \alpha_2 c\theta_1 + \theta_2 & -\alpha_1 s\theta_1 - \alpha_2 s\theta_1 + \theta_2 \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

in which $c\theta$ and s denote respectively $\cos\theta$ and $\sin\theta$.

The determinant of the Jacobian in Equation (1.10) is $\alpha_1\alpha_2 \sin\theta_2$. The Jacobian does not have an inverse, therefore, when $\theta_2 = 0$ or π , in which case the manipulator is said to be in a **singular configuration**, such as shown in Figure 1.27 for $\theta_2 = 0$.

The determination of such singular configurations is important for several reasons.

At singular configurations there are infinitesimal **motions** that are **unachievable**; that is, the manipulator end-effector cannot move in certain directions.

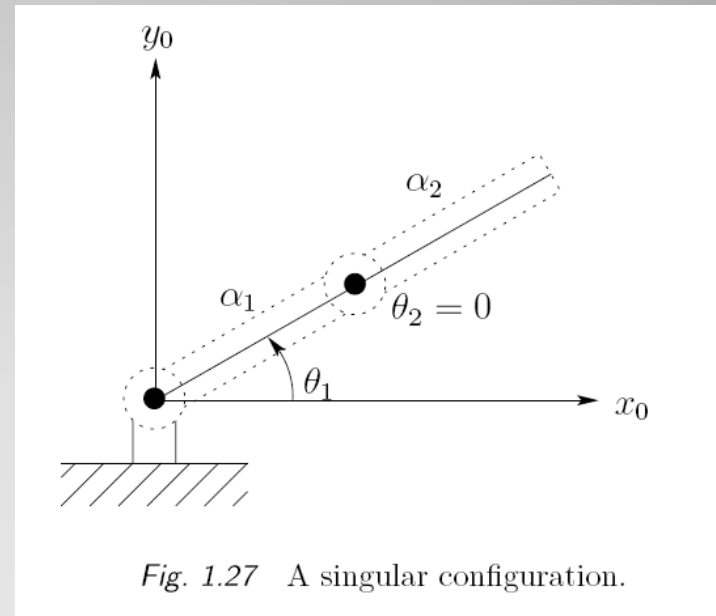


Fig. 1.27 A singular configuration.

In the above cases the end effector cannot move in the positive x_2 direction when $\theta_2 = 0$.

Singular configurations are also related to the nonuniqueness of solutions of the inverse kinematics.

For example, for a given end-effector position, there are in general two possible solutions to the inverse kinematics.

Note that a singular configuration separates these two solutions in the sense that the manipulator cannot go from one configuration to the other without passing through a singularity.

For many applications it is important to plan manipulator motions in such a way that singular configurations are avoided.

Path Planning and Trajectory Generation

The robot control problem is typically decomposed hierarchically into three tasks:

1. path planning
2. Trajectory generation
3. Trajectory tracking.

The path planning problem, considered in Chapter 5, is to determine a path in task space (or configuration space) to move the robot to a goal position while avoiding collisions with objects in its workspace.

□ These **paths** encode position and orientation information without timing considerations, i.e. **without considering velocities and accelerations along the planned paths.**

□ The **trajectory generation** problem, also considered in Chapter 5, is to generate reference trajectories that **determine the time history of the manipulator** along a given path or between initial and final configurations.

Dynamics

A robot manipulator is primarily a positioning device. To control the position we must know the dynamic properties of the manipulator in order to know how much force to exert on it to cause it to move: too little force and the manipulator is slow to react; too much force and the arm may crash into objects or oscillate about its desired position.

Deriving the dynamic equations of motion for robots is not a simple task due to the large number of degrees of freedom and nonlinearities present in the system.

In Chapter 6 we develop techniques based on Lagrangian dynamics for systematically deriving the equations of motion of such a system.

In addition to the rigid links, the complete description of robot dynamics includes the dynamics of the actuators that produce the forces and torques to drive the robot, and the dynamics of the drive trains that transmit the power from the actuators to the links. Thus, in Chapter 7 we also discuss actuator and drive train dynamics and their effects on the control problem.

Position Control

In Chapters 7 and 8 we discuss the design of control algorithms for the execution of programmed tasks.

The motion control problem consists of the **Tracking and Disturbance Rejection Problem**, which is the problem of **determining the control inputs necessary to follow, or track**, a desired trajectory that has been planned for the manipulator, while simultaneously rejecting **disturbances** due to **unmodeled dynamic effects** such as friction and noise.

We detail the standard approaches to robot control based on frequency domain techniques.

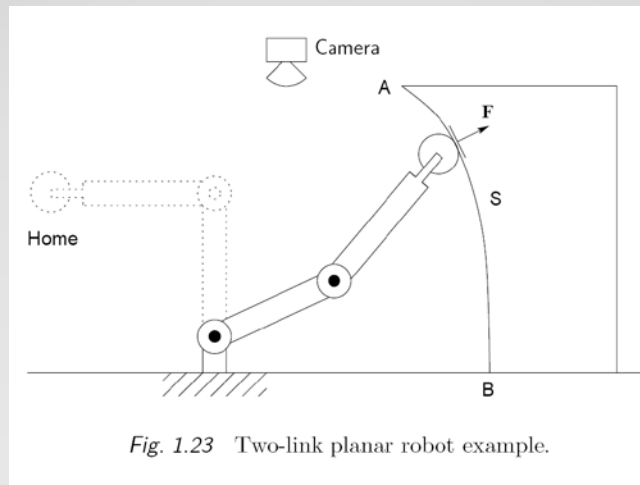
We also introduce the notion of feedforward control and the techniques of **computed torque and inverse dynamics** as a means **for compensating the complex nonlinear interaction** forces among the links of the manipulator. **Robust and adaptive control** are introduced in Chapter 8 using the Second Method of Lyapunov.

Chapter 10 provides some additional advanced techniques from nonlinear control theory that are useful for controlling high performance robots.

Force Control

Once the manipulator has reached location A, it must follow the contour S maintaining a constant force normal to the surface.

Conceivably, knowing the location of the object and the shape of the contour, one could carry out this task using position control alone. **This would be quite difficult to accomplish in practice, however.**



Since the manipulator itself possesses high rigidity, any errors in position due to uncertainty in the exact location of the surface or tool would give rise to extremely large forces at the end-effector that could damage the tool, the surface, or the robot.

A better approach is to measure the forces of interaction directly and use a force control scheme to accomplish the task.

In Chapter 9 we discuss force control and compliance along with common approaches to force control, namely hybrid control and impedance control.

Vision

Cameras have become reliable and relatively inexpensive sensors in many robotic applications.

Unlike joint sensors, which give information about the internal configuration of the robot, cameras can be used not only to measure the position of the robot but also to locate objects external to the robot in its workspace.

In Chapter 11 we discuss the use of computer vision to determine position and orientation of objects.

Vision-based Control

In some cases, we may wish to control the motion of the manipulator relative to **some target as the end-effector moves through free space.**

Here, force control cannot be used.

Instead, we can use computer vision to close the control loop around the vision sensor.

This is the topic of Chapter 12. There are several approaches to vision-based control, but we will focus on the method of Image- Based Visual Servo (IBVS). This method has become very popular in recent years, and it relies on mathematical development analogous to that given in Chapter 4.

*P*roblems

