بسم الله الرحمن الرحیم

Principles of Mechatronic Systems
مبانی سیستم های مکاترونیکی

سنسورهای دیجیتال (انکودر)

By: Reza Tikani
Mechanical Engineering Department
Isfahan University of Technology

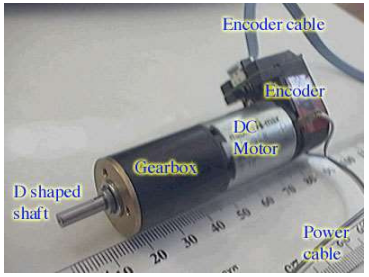
سنسورهای دیجیتال

مبدل دیجیتال یک وسیله اندازه گیری است که خروجی دیجیتال تولید می کند مبدلهایی که خروجی آنها به صورت پالس یا فرکانس است در این زمره قرار می گیرند زیرا با بکارگیری تجهیزات شمارش پالس می توان خروجی آنها را به دیجیتال تبدیل نمود.

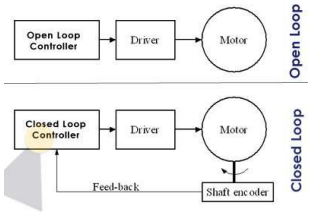
شناخته شده ترین نوع مبدل دیجیتال در سیستمهای مکاترونیکی **شفت انکودر** است که برای اندازه گیری جابجایی زاویه ای و یا سرعت زاویه ای یک جسم چرخان بکار می رود.

انکودر (Encoder)

متداولترین وسیله اندازه گیری جابجایی و مناسب برای کنترل دیجیتال.



www.student.mech.uwa.edu.au



www.ikalogic.com

انکودر (Encoder)

کاربردها:

بازوی مکانیکی ربات، ماشینهای ابزار، پرینترها و پلاترها و ماشینهای دوار.

www.hyundairobot.co.uk

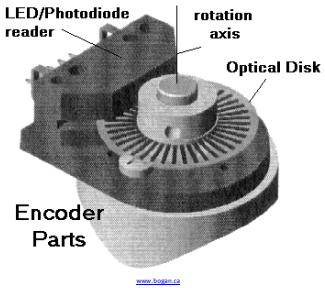
مزایا:

- تفکیک پذیری زیاد (بر اساس اندازه کلمه باینری)
- دقت بالا (بدون اثرپذیری از نویز)
- راحتی استفاده برای کاربرد در کنترل دیجیتال سیستمها

انکودر (Encoder)

تکنیکهای ایجاد سیگنال:

- روش نوری
- هدایت الکتریکی در اثر تماس لغزشی
- مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس)
- سنسور مجاورتی



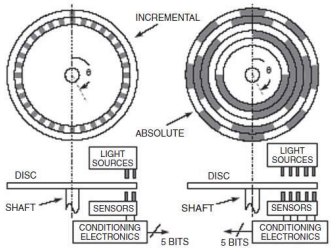
www.bogen.ca

انکودر (Encoder)

انواع:

۱- انکودرهای نسبی (ایجاد پالس- نشان دهنده تغییرات دوران از یک موقعیت مرجع نسبی)

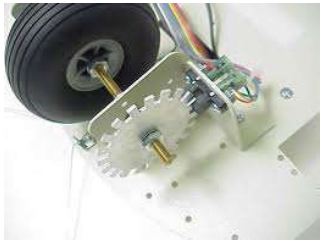
۲- انکودرهای مطلق (عدد باینری- نشان دهنده موقعیت زاویه ای واقعی)



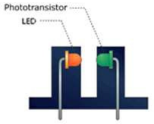
Sensors Handbook Technology, J.S. Wilson

انکودر (Encoder)

انکودرهای نوری:



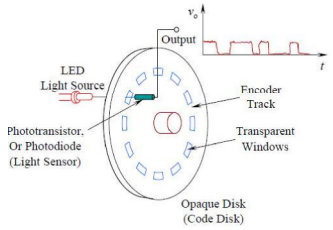
www.arrickrobotics.com

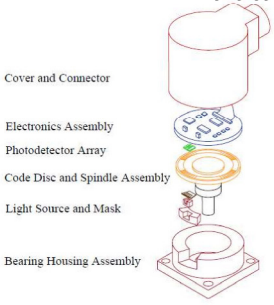


انکودر (Encoder)

انکودرهای نوری:

از میان روشهای مختلف تولید پالس انکودر نوری به دلیل سرعت بالای انتقال نور و عدم تماس فیزیکی بیشترین کاربرد را دارد.



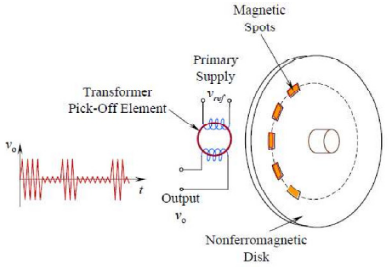


www.ubc.com

انکودر (Encoder)

انکودرهای مغناطیسی:

در این ساختار از یک دیسک غیرمغناطیس که پنجره های مغناطیسی (آهنربا) با فواصل مکانی منظم بر روی آن تعبیه شده است استفاده می شود.



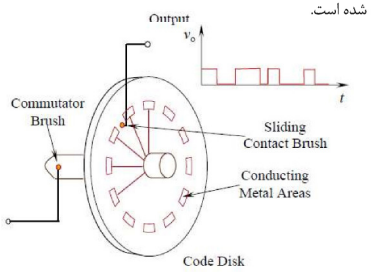
المان برداشت کننده یک میکروترانسفورماتور است که با منبع ولتاژ ac تغذیه می شود.

با عبور قطعات مغناطیسی ولتاژ خروجی به صورت پالس سوار شده بر یک موج فرکانس بالا تغییر می کند.

انکودر (Encoder)

انکودرهای تماس لغزشی:

این انکودرها از یک دیسک با ماده نارسانا ساخته شده است و بر روی یک مسیر دایره ای یک سری تکه های رسانا در فواصل مشخص و به صورت منظم تعبیه شده است.



مزایا: حساسیت بالا، سادگی ساخت، قیمت ارزان

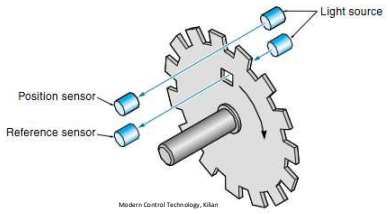
معایب: اصطکاک، خوردگی، اکسید شدن فلز

انکودر (Encoder)

انکودرهای نسبی نوری :

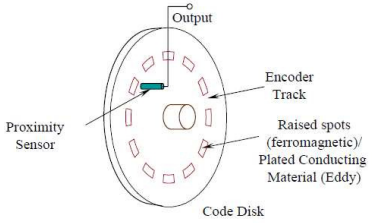
سنسور نور، قطع و وصل شدن نور عبوری از دیسک را حس می کند. کنترلر با شمارش قطع و وصل سیگنال سنسور، محل شافت را مشخص می کند.

تفکیک پذیری (رزولوشن) انکودر با افزایش خانه های تیره و شفاف در پیرامون دیسک افزایش می یابد.



انکودر (Encoder)

انکودرهای با سنسور مجاورتی:



- سنسورهای القای مغناطیسی (القا متقابل یا خودالقا) یا سنسورهای جریان گردابی در این انکودرها قابل استفاده می باشند.

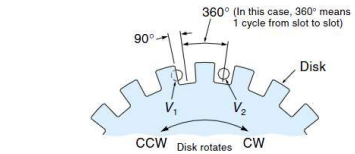
سنسورهای القای مغناطیسی → قطعات فرومغناطیس

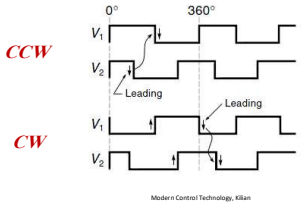
سنسورهای جریان گردابی → قطعات رسانا

انکودر (Encoder)

انکودرهای نسبی نوری :

تشخیص جهت گردش



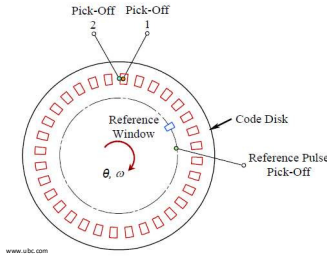


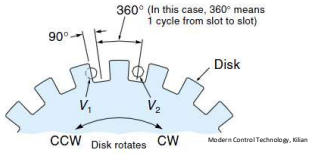
Modern Control Technology, Kilian

انکودر (Encoder)

انکودرهای نسبی نوری :

بعضی انکودرها قادر به تشخیص جهت گردش نیز می باشند. در این انکودرها با اندازه گیری اختلاف فاز دو سنسور یا با استفاده از ردیف اضافه ای بر روی صفحه که با صفحه اول ۹۰ درجه اختلاف فاز دارد، جهت چرخش را تعیین می کنند (ساختار ربع گام))

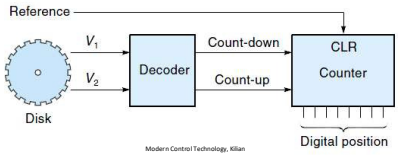




انکودر (Encoder)

انکودرهای نسبی نوری :

با اتصال خروجی انکودر به یک شمارنده می توان مکان را مشخص نمود:

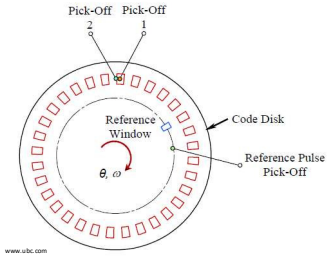


Modern Control Technology, Kilian

انکودر (Encoder)

انکودرهای نسبی نوری :

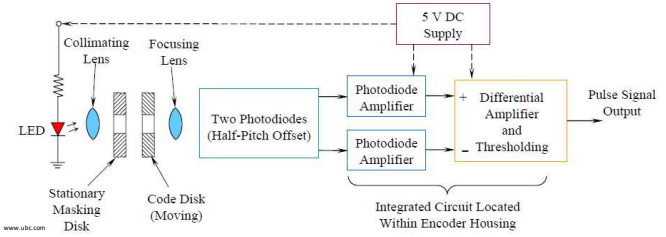
Index Pulse برای صفر کردن شمارش (نشان دادن یک گردش کامل) و یا ریست کردن چرخش را برعهده دارد. با شمارش تعداد چرخش کامل و صفر کردن ذخیره شمارش پالسها در هر دور حجم حافظه کمتری مورد نیاز است.



انکودر (Encoder)

انکودرهای نسبی نوری :

مشخصه های سخت افزاری انکودر



سیستمهای دو دیسکی دارای دقت بیشتری هستند.

انکودر (Encoder)

انکودرهای نسبی نوری :

مثال: یک انکودر دارای دیسکی با ۲۵۰ شیار است. مقدار فعلی شمارنده برابر با ۰۰۱۰۰۱۱۰ می باشد. زاویه اندازه گیری شده چقدر است؟

برای دیسکی با ۲۵۰ شیار، هر شیار برابر ۳۶۰/۲۵۰=۱.۴۴ خواهد بود. عدد ۰۰۱۰۰۱۱۰ نیز معادل عدد ۳۸ در مبنای ده است. بنابراین موقعیت در زاویه برابر است با ۱.۴۴×۳۸ یعنی ۵۴.۷۲ درجه.

انکودر (Encoder)

تفکیک پذیری در انکودر:

If the range of the encoder is $\pm\theta_{max}$ and the maximum count possible is M for count of n pulses

$$\theta = \frac{n}{M}\theta_{max}$$

n=1 → Resolution

تفکیک پذیری انکودر توسط دو عامل محدود می شود:
۱- تفکیک پذیری دیجیتال: بستگی به تعداد بیت حافظه دارد.
۲- تفکیک پذیری فیزیکی: بستگی به تعداد پنجره N در صفحه کد دارد.

www.ubc.com

انکودر (Encoder)

تفکیک پذیری دیجیتال:

Displacement Resolution $\Delta\theta = \frac{\theta_{max}}{M}$

If the data size is r bits and allowing for a sign bit

$$M = 2^{r-1}$$

Digital resolution is the change in displacement for a unit change in bit value

$$\Delta\theta_d = \frac{\theta_{max}}{2^{r-1}}$$

Typically $\theta_{max} = \pm 180^\circ$ or 360°.

$$\Delta\theta_d = \frac{180^\circ}{2^{r-1}} = \frac{360^\circ}{2^r}$$

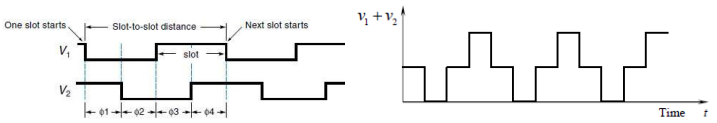
www.ubc.com

انکودر (Encoder)

تفکیک پذیری فیزیکی:

- If only one pulse signal is used considering only one transition, this resolution would be 360°/*N* where *N* is the number of windows
- If both quadrature pulse signals are used considering both rising and falling transitions

$$\Delta\theta_p = \frac{360^\circ}{4N}$$



انکودر (Encoder)

تفکیک پذیری دیجیتال:

Minimum count (all bits 0) $\Rightarrow \theta_{min}$ and maximum count (all bits 1) $\Rightarrow \theta_{max}$

$$\theta_{max} = \theta_{min} + (M-1)\Delta\theta$$

$$\theta_{max} = \theta_{min} + (2^{r-1}-1)\Delta\theta_d$$

Digital Resolution $\Delta\theta_d = \frac{(\theta_{max} - \theta_{min})}{(2^{r-1}-1)}$

انکودر (Encoder)

مثال:

برای یک انکودر افزایشی ایده آل رابطه ای بین پارامترهای زیر به دست آورید.

d=diameter of encoder disk
w=number of windows per unit diameter of disk
r=word size (bits) of the angle measurement

در صورتیکه **r=12** و **w=500/cm**، مطلوبست تعیین قطر مناسب برای صفحه انکودر.

$$\Delta\theta_p = \frac{1}{4}\left(\frac{360}{wd}\right)^\circ$$

$$\Delta\theta_d = \left(\frac{360}{2^r}\right)^\circ$$

در انکودر ایده آل ⇒ $\Delta\theta p = \Delta\theta d$ ⇒ $\frac{1}{4}\frac{360}{wd} = \frac{360}{2^r}$

$$wd = 2^{r-2} \Rightarrow d = \left(\frac{2^{12-2}}{500}\right) cm = 2.05\ cm$$

انکودر (Encoder)

تفکیک پذیری:

ماکزیمم این دو مقدار نشان دهنده تفکیک پذیری جابجایی است.

$$\Delta\theta_p = \frac{360^\circ}{4N}$$

$$\Delta\theta_d = \frac{(\theta_{max} - \theta_{min})}{(2^{r-1}-1)}$$

انکودر (Encoder)

اندازه گیری سرعت:

دو روش برای این منظور وجود دارد:

- **Pulse counting method** –pulse count over a sampling period is measured, not good for low speeds
- **Pulse timing method** –time for one encoder cycle is measured, suitable for low speeds

www.ubc.com

انکودر (Encoder)

اندازه گیری سرعت:

Pulse Counting Method

- If the counting during sampling period T is n, average time for one pulse is T/n. If there are N windows on the disk, the angle for one pulse is $2\pi / N$

$$\omega = \frac{2\pi / N}{T / n} = \frac{2\pi n}{NT}$$

www.ubc.com

انکودر (Encoder)

اندازه گیری سرعت:

Pulse Timing Method

- If the clock frequency is f and if m pulses (cycles) are counted during encoder period (between two windows), time between two windows is m/f
- Since angle between two windows is $2\pi / N$

$$\omega = \frac{2\pi / N}{m / f} = \frac{2\pi f}{Nm}$$

- A single incremental encoder can serve as both position sensor and a speed sensor

www.ubc.com

انکودر (Encoder)

تفکیک پذیری سرعت:

- Since both pulse-counting and pulse-timing methods are based on counting, the velocity resolution corresponds to a change in the count by one

Pulse Counting Method

$$\Delta\omega_c = \frac{2\pi}{NT}$$

- Resolution can be improved with number of windows and the sampling period but under transient conditions accuracy decreases if the T is increased

Pulse Timing Method

$$\Delta\omega_t = \frac{2\pi f}{Nm} - \frac{2\pi f}{N(m+1)} = \frac{2\pi f}{Nm(m+1)} \qquad \Delta\omega_t \approx \frac{2\pi f}{Nm^2} = \frac{N\omega^2}{2\pi f}$$

- Resolution degrades quadratically with speed. It also degrades with increasing N. Resolution can be improved by improving the clock frequency

www.ubc.com

انکودر (Encoder)

پارامترهای موثر بر تفکیک پذیری:

- Position
  - Number of windows *N*
  - Gear Ratio
  - Word size
- Velocity
  - Number of windows *N*
  - Sampling period *T*
  - Clock frequency *f*
  - Speed ω
  - Gear Ratio

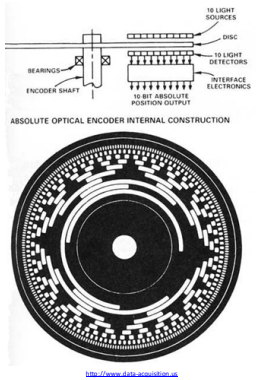
www.ubc.com

انکودر (Encoder)

انکودرهای مطلق:

بر خلاف انکودرهای نسبی، انکودرهای مطلق نیاز به سنسور نوری برای مکان اولیه ندارند و با قطع برق موقعیت شافت گم نمی شود. این انکودرها دارای یک منبع نور، یک دیسک گردان با بیش از سه حلقه شفاف، یک سنسور نوری برای هر حلقه و یک مدار کنترلی است.

این نوع انکودرها تنها برای اندازه گیری میزان چرخش در یک دور کامل قابل استفاده اند.

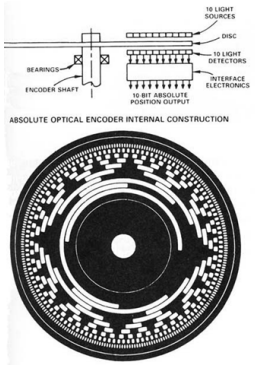


http://www.data-acquisition.us

انکودر (Encoder)

انکودرهای مطلق:

انکودرهای مطلق اعداد باینری تولید می کنند که موقعیت دیسک را نشان می دهد. هر بیت عدد باینری معادل یک حلقه و یک سنسور نوری است. اگر سنسور، پرتو نوری مشاهده کند، خروجی آن یک و در غیر اینصورت خروجی بیت صفر خواهد بود.



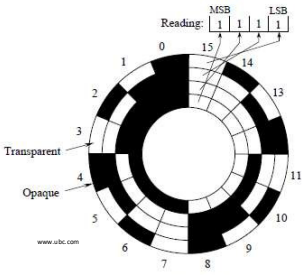
http://www.data-acquisition.us

انکودر (Encoder)

انکودرهای مطلق:

نمونه چهار حلقه ای بیانگر یک عدد چهاربیتی است. داخلی ترین حلقه بیان کننده باارزشترین بیت و خارجی ترین حلقه نشان دهنده کم ارزشترین بیت است.

انکودر روبرو با چهار حلقه برای تشخیص ۱۶ موقعیت با رزولوشن ۲۲.۵ درجه است.



Binary Code

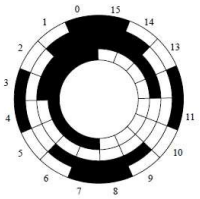
انکودر (Encoder)

کدگذاری خاکستری:

در روش کدگذاری خاکستری تنها یک مقدار از چهار سنسور در عبور از یک موقعیت به موقعیت دیگر تغییر می کند. به عبارت دیگر در کدگذاری خاکستری فقط مقدار یک بیت از یک عدد به عدد بعد تغییر حالت می دهد و بقیه بیتها دست نخورده باقی می مانند.

با این کدگذاری خطای احتمالی به کمترین مقدار خود می رسد.

عیب این روش نیازمندی آن به اجرای منطق تبدیل از کد خاکستری به کد باینری است.



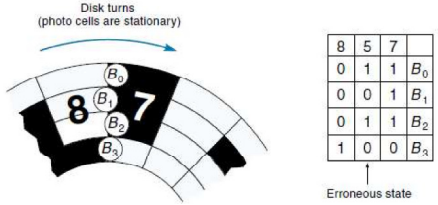
Gray Code

www.ubc.com

انکودر (Encoder)

انکودرهای مطلق:

دقت انکودرها به دقت ساخت محلهای شیارهای شفاف و تیره بستگی دارد. استفاده از اعداد باینری طبیعی علیرغم ایجاد امکان مکان یابی متعدد می تواند مشکلاتی نیز داشته باشد. هنگامی که یک انکودر چهار حلقه ای از وضعیت ۱۵ (باینری ۱۱۱۱) به وضعیت ۰ (باینری ۰۰۰۰) می رود، هر یک از چهار سنسور ممکن است قبل از بقیه تغییر وضعیت دهد و کنترلر درست در همین موقع سنسورها را بخواند. در اینصورت امکان ثبت هر عدد چهار بیتی وجود دارد (هرقدر در ...اخت و مونتاژ انکودر دقت شود، بازهم تغییر بیت ها همزمان رخ نخواهد داد.)



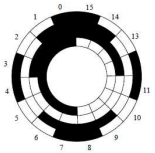
8	5	7	
0	1	1	B_0
0	0	1	B_1
0	1	1	B_2
1	0	0	B_3

Erroneous state

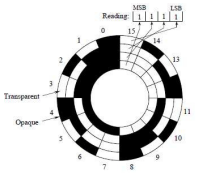
Modern Control Technology, Kilian

انکودر (Encoder)

انکودرهای مطلق:



Gray Code



Binary Code

www.ubc.com

Decimal Code	Rotation Range (°)	Natural binary code ($B_3B_2B_1B_0$)	Gray code ($G_3G_2G_1G_0$)
0	0–22.5	0000	0000
1	22.5–45	0001	0001
2	45–67.5	0010	0011
3	67.5–90	0011	0010
4	90–112.5	0100	0110
5	112.5–135	0101	0111
6	135–157.5	0110	0101
7	157.5–180	0111	0100
8	180–202.5	1000	1100
9	202.5–225	1001	1101
10	225–247.5	1010	1111
11	24 7.5–270	1011	1110
12	270–292.5	1100	1010
13	292.5–315	1101	1011
14	315–337.5	1110	1001
15	337.5–360	1111	1000

An Introduction to Mechatronics and Components, Alciator

انکودر (Encoder)

انکودرهای مطلق:

تبدیل کد خاکستری به کد باینری طبیعی

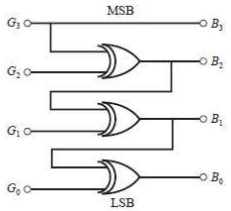
Decimal Code	Rotation Range (°)	Natural binary code ($B_3B_2B_1B_0$)	Gray code ($G_3G_2G_1G_0$)
0	0–22.5	0000	0000
1	22.5–45	0001	0001
2	45–67.5	0010	0011
3	67.5–90	0011	0010
4	90–112.5	0100	0110
5	112.5–135	0101	0111
6	135–157.5	0110	0101
7	157.5–180	0111	0100
8	180–202.5	1000	1100
9	202.5–225	1001	1101
10	225–247.5	1010	1111
11	24 7.5–270	1011	1110
12	270–292.5	1100	1010
13	292.5–315	1101	1011
14	315–337.5	1110	1001
15	337.5–360	1111	1000

$$B_3 = G_3$$

$$B_2 = B_3 \oplus G_2$$

$$B_1 = B_2 \oplus G_1$$

$$B_0 = B_1 \oplus G_0$$

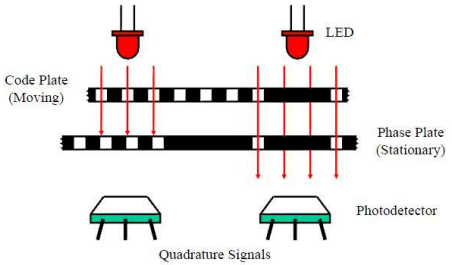


An Introduction to Mechatronics and Components, Alciator

انکودر (Encoder)

انکودرهای خطی:

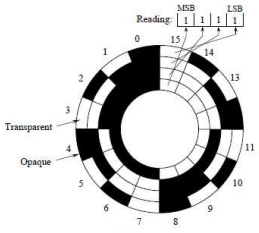
این نوع انکودرها دارای عملکردی شبیه انکودرهای دورانی هستند و معمولاً برای اندازه گیری در میز ماشینهای CNC استفاده می شوند.



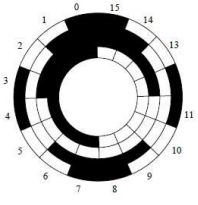
www.ubc.com

انکودر (Encoder)

رزولوشن انکودرهای مطلق:



Binary Code



Gray Code

- If there are *n* tracks, there are *n* pick-off elements and the disk is divided into 2^n number of sectors. If n = 16

$$\Delta\theta = \frac{360^o}{2^{16}} = 0.0055^o$$

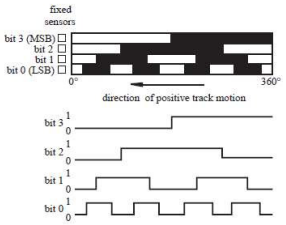
- The data word uniquely determines the position at the time

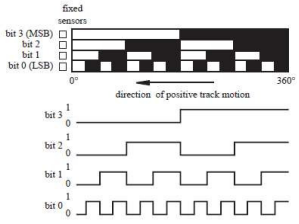
www.ubc.com

انکودر (Encoder)

انکودرهای خطی:

این نوع انکودرها دارای عملکردی شبیه انکودرهای دورانی هستند و معمولاً برای اندازه گیری و در میز ماشینهای CNC استفاده می شوند. در این انکودرها نیز مشکلات مربوط به کدگذاری معمولی باینری وجود دا، د.





www.ubc.com