

Digitální kamery pro systémy strojového vidění

Přehled trhu digitálních kamer pro strojové vidění uvedený na stranách 28 až 29 představuje v tabulkové formě přístroje některých výrobců a jejich základní parametry. Tento článek vysvětluje základní principy fungování kamer a význam parametrů uvedených v tabulce.

Kamera a osvětlení jsou základní a nejdůležitější prvky sestavy strojového vidění. Kamera vytváří dvojrozměrný jasový obraz trojrozměrné reality, převádí jej na měronosné veličiny, které dnes poskytuje již převážně v digitální podobě (digitalizovaný obraz) na příslušném rozhraní.

V digitální kameře lze vždy najít tyto části (obr. 1):

- snímač obrazu,
- obvody pro obsluhu snímače obrazu,
- obvody pro vytvoření rozhraní k následujícím zařízením (komunikační interface),
- pouzdro a nezbytné mechanické součásti pro připojení optické soustavy (objektivu),
- softwarové vybavení.

Snímač obrazu

Snímač obrazu je matice světlocitlivých buněk, které se skládají z fotodiody a kondenzátoru. Po dobu osvětlení se v kondenzátoru akumuluje elektrický náboj úměrný osvětlení buňky a době akumulace. Výrobní postup a způsob sběru náboje z buněk určují typ a vlastnosti snímače obrazu.

Pro použití systémů strojového vidění v praxi většinou stačí znát základní vlastnosti dvou nejužívanějších snímačů obrazu nazývaných CCD a CMOS.

Snímač obrazu CCD vysouvá náboj akumulovaný ve světlocitlivých buňkách pomocí soustavy analogových posuvných registrů. Výstupem je tedy analogový signál, který řídicí obvody kamery doplní informací potřebnou k synchronizaci. U kamer pro strojové vidění se dnes již nepoužívá prokládané řádkování (*interlaced*), známé z televizní normy. Současná technologie *progressive scan* vysouvá náboj akumulovaný v buňkách všech obrazových řádků postupně za sebou.

Snímače CCD jsou poměrně nákladné a navíc k činnosti potřebují několik různých napájecích napětí. Kromě toho je nutné jejich analogový videosignál digitalizovat v následných obvodech, v současné době většinou vyrobených technologií CMOS. Proto se objevila myšlenka integrovat snímač obrazu a A/D převodník na jednom čipu vyrobeném technologií CMOS.

Snímače CMOS tedy poskytují již digitalizovaný signál, což umožňuje zjednodušit konstrukci kamery. Odlišný způsob vybírání náboje z obrazových buněk také dovoluje vybírat obraz jen z části plochy snímače obrazu (postup zvaný *subscan*). Má však i určité ne-

výhody (viz odstavec Závěrka a rychlost snímání). Navíc snímače CMOS stále ještě nejsou schopny poskytnout tak kvalitní obraz jako snímače CCD. Proto je výrobcem montují do kamer, které se většinou nacházejí na „levnějším“ konci produktové řady.

Velikost snímače a matice světlocitlivých buněk

Černobílé kamery

Velikost snímače, počet světlocitlivých buněk a jejich velikost jsou faktory, které určují rozlišovací schopnost kamery (*camera resolution*). Velikost obrazového snímače se udává v palcích. Tato hodnota však není žád-

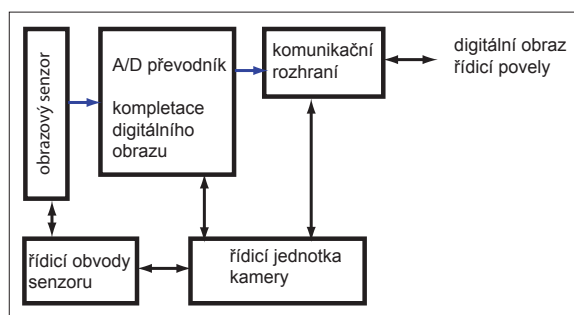
nodušeně dvojnásobek rozměru světlocitlivé buňky). Dvojnásobek proto, že se do oddělených buněk nabírají vzorky obrazu a musí být splněn vzorkovací teorém. Jednoduchým výpočtem lze rozlišovací schopnost kamery zjistit i z rozměru snímače a velikosti matice.

Údaje o rozlišení a rozměru světlocitlivé buňky v předcházejícím odstavci se týkají černobílého snímače. K řešení převažující většiny úloh strojového vidění černobílý snímač zcela vyhoví.

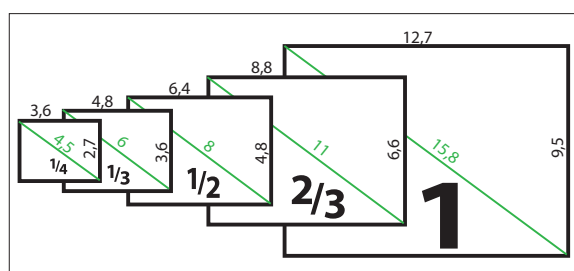
Barevné kamery

Barevný obraz vzniká kombinací tří jasových obrazů v základních barvách. V běžných kamerách se k jejich vytvoření používá snímač obrazu, na jehož světlocitlivých buňkách jsou naneseny barevné filtry. Barevný snímač tedy potřebuje pro údaje o jednom obrazovém bodu tři světlocitlivé buňky, pro každou barevnou složku dopadajícího světla jednu.

Tři buňky zaberou více místa než jediná v černobílé kameře, navíc je třeba počítat s tím, že velikost náhradní světlocitlivé buňky poskytující barevnou informaci je větší než buňka černobílého snímače. Důsledkem toho je, že barevná kamera má při stejné velikosti snímače obrazu menší matici a nižší rozlišení než černobílá. Mimo to, protože buňky pro jednotlivé barvy na čipu jsou vzájemně posunuty, jsou proti sobě posunuty i jednotlivé barevné složky digitalizovaného obrazu. Pro řešení úloh, kde je posun barevných složek zásadním problémem, existují složitá a nákladná kamery se třemi snímači a optickým rozkladem obrazu.



Obr. 1. Blokové schéma digitální kamery



Obr. 2. Rozměry snímačů obrazu

ným skutečným rozměrem snímače, ale udává průměr skleněné trubice odpovídající ekvivalentní historické snímací elektronice. Skutečné rozměry snímací plochy nejužívanějších obrazových snímačů v milimetrech ukazuje obr. 2. Je z něj patrný i skutečný poměr velikostí snímačů. Poměr stran snímačů uvedených na obrázku je 4 : 3, lze však najít i kamery se snímačem obrazu nestandardní velikosti.

Počet světlocitlivých buněk se udává jako velikost matice. Rozlišovací schopnost kamery se nejjednodušeji určí jako dvojnásobná vzdálenost středů fotocitlivých buněk (zjed-

Závěrka a rychlost snímání

Elektronická závěrka na rozdíl od mechanické závěrky filmové kamery neřídí množství světla, které má během snímku dopadnout na snímač. Snímač je osvětlen nepřetržitě a elektronická závěrka pouze řídí dobu akumulace náboje. Snímače CCD zaručují jednotnou dobu akumulace všech buněk snímače díky synchronnímu přesunu akumulovaného náboje ze světlocitlivých buněk do analogového posuvného registru. Elektronická závěrka snímače CCD je tedy vždy typu *global shutter* – centrální závěrka. Název je převzat z fotografické terminologie, kdy centrální závěrka uzavírající

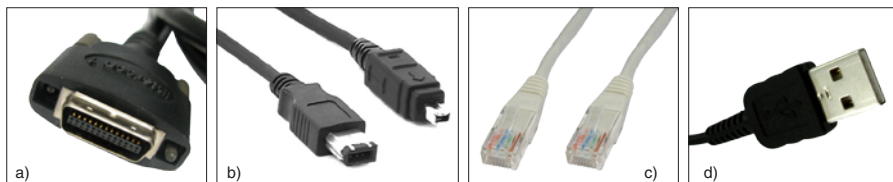
přístup světla v ohnisku objektivu rovněž zaručovala, že světlo bude dopadat na celou plochu filmového políčka stejnou dobu.

U standardního snímáče CMOS, kde je náboj z buňky vybírán postupně pomocí adresace jednotlivých buněk, je z principu každý řádek exponován v jiném okamžiku. Tím vzniká efekt zvaný *rolling shutter* (štěrbínové závěrky), který připomíná expozici filmu pomocí navjící plátěné závěrky starých zrcadlovek. Jeho důsledkem je, že při pohybu ob-

raLink je 2,38 Gb/s, odpovídající šířce datového kanálu 297,5 MB/s.

CameraLink využívá speciální kabely a konektory (obr. 3a).

I přes konkurenci gigabitového Ethernetu nebo vysokorychlostního USB si CameraLink stále udržuje významné místo mezi datovými rozhraními pro kamery. Nevýhodou je nutnost instalovat komunikační adaptér, neboť PC obvykle nemá CameraLink mezi standardními rozhraními.



Obr. 3. Příklady konektorů komunikačních rozhraní pro kamery: a) Camera Link, b) IEEE 1394 (FireWire), c) Ethernet, d) USB

jektu v době expozice se původně svislé hrany změny v šikmé. Moderní snímáče CMOS již také využívají centrální závěrku, ale protože pak světlocitlivé buňky vyžadují složitější technologii výroby, jsou dražší.

Elektronické závěrky dovolují používat i velmi krátké doby expozice. Zdálo by se tedy, že každou digitální kamerou lze dosáhnout velké rychlosti snímání (snímek/s). Problémem však je značně velký tok dat, který při velkých rychlostech snímání dosahuje extrémních hodnot. Proto je pro rychlost snímání kamery rozhodující rychlost komunikačního rozhraní.

Komunikační rozhraní

Komunikační rozhraní zprostředkovává přenos obrazových dat mezi kamerou a systémem strojového vidění. Na komunikační rychlosti závisí hlavně využitelná maximální rychlost snímání kamery; je proto účelné nasnímat jen tolik dat, kolik je možné z kamery předat. Navíc ve většině případů nemohou být obrazová data redukována kompresí, protože by při analýze rekonstruovaného obrazu vlivem nedokonalé rekonstrukce vznikaly chyby. Rozhraní, která kamery používají, vycházejí většinou z komerčních rozhraní používaných u PC. Nejobvyklejší z nich jsou popsány v následujících odstavcích.

Camera Link

Camera Link je rozhraní, které bylo vyvinuto přímo pro potřeby přenosu obrazu. Používá sérioparalelní přenos dat. Nejjednodušší konfigurace Base má k dispozici tři multiplexované osmibitové paralelní kanály (obvykle použité pro RGB), příslušné kanály pro řídicí a synchronizační signály i pomocné sériové rozhraní pro nastavení kamery. Existuje i konfigurace Medium a Full s dvojnásobnou a trojnásobnou kapacitou přenosu dat. Teoretická komunikační rychlost rozhraní Came-

IEEE 1394

Rozhraní IEEE 1394 je známo také pod komerčním pojmenováním FireWire, zavedeným firmou Apple. Jde o sériové rozhraní, jehož nejnámější modifikace jsou:

- IEEE 1394a do rychlosti 400 Mb/s,
- IEEE 1394b do rychlosti 800 Mb/s.

Toto rozhraní (obr. 3b) je dnes rozšířeno hlavně v komerčních videokamerách. V průmyslu se od něj spíše upouští, je nahrazováno vysokorychlostními modifikacemi USB.

Vysokorychlostní Ethernet

Označením GigE, vysokorychlostní Ethernet, IEEE 802.3ab (varianta pro metalické vedení) je uváděn gigabitový Ethernet, který



Obr. 4. Pouzdro kamery v přímé a pravoúhlé variantě

pracuje na stejných principech jako standardní Ethernet. Pro přenos obrazových dat byl vyvinut široce akceptovaný přenosový standard Gige Vision (viz dále). Výhodou je, že toto rozhraní mají běžně počítače PC a není třeba kupovat a instalovat žádný dodatečný hardware (obr. 3c).

USB

USB je sériové rozhraní, původně zamýšlené jako alternativa RS-232 pro připojování lokálních zařízení k PC. Využití USB pro

přenos obrazových dat bylo možné až po zavedení standardu USB 2 s nominální přenosovou rychlostí 480 Mb/s. I s tímto standardem je rozhraní USB (obr. 3d) vhodné jen pro menší rychlosti snímání. Další jeho nevýhodou je krátký kabel, který by pro garantovanou funkci neměl být delší než 5 m. Problémem někdy bývá i kompatibilita softwaru PC s řadičem USB v kameře. Přesto se rozhraní USB používá pro průmyslové kamery stále častěji a tento trend určitě zesílí po rozšíření standardu USB 3, který komerčně startuje v letošním roce.

Digitální vstupy a výstupy

Ve většině případů obvykle postačí, aby kamera měla digitální vstup pro externí spuštění snímku, který se využije v případě, že je nutné pořídít obrázek na základě signálu z čidla polohy. Obvyklý je i výstup pro spuštění synchronizovaného zábleskového světla.

Napájení

U kamery pro strojové vidění se očekává napájecí napětí obvyklé v řídicích systémech, zpravidla 24 V. Má-li kamera komunikační rozhraní Ethernet, může být po ethernetovém kabelu i napájena (PoE – *Power over Ethernet*). Průmyslové kamery pro strojové vidění však používají gigabitový Ethernet, u kterého je distribuce napájení prostřednictvím komunikačního kabelu technicky komplikovanější než v případě připojení 10/100 T-Base; proto se tato možnost zatím příliš nevyužívá. Jestliže by bylo výhodné PoE využít, je třeba zajistit, aby tuto funkci umožňoval ethernetový přepínač (*switch*), ke kterému je kamera připojena.

Pouzdro a připojení optické soustavy

Nejvíce kamer je dodáváno v běžném pouzdře s různým stupněm krytí, podle zamýšleného prostředí, ve kterém má být kamera instalována. Někteří výrobci nabízejí dvě varianty pouzdra, s objektivem v ose delšího rozměru pouzdra – přímé provedení, nebo tzv. pravoúhlé provedení, kdy

je osa objektivu na delší stranu kolmá. Takové provedení je někdy jedinou možností, jak namontovat kameru do stísněného prostoru, např. ve výrobním stroji (obr. 4).

Většinu kamer lze také objednat jako tzv. kit bez pouzdra a úplně ji integrovat do zákaznického zařízení. Důležité je však povšimnout si také mechanického připojení (montáže) objektivu k tělu kamery. Kamery s čipem velikosti do 1" mají většinou uchycení označované jako C-mount, což je upevňovací závit o průměru 1". Lze se však setkat i se starším připojením CS-mount. Zrádné je, že

objektivy určené pro montáž C a CS není snadné od sebe rozeznat. Rozdíl je pouze ve vzdálenosti osazení na konci upevňovacího závitu od ohniska obrazu. Důležité je vědět, že objektiv C-mount lze na kameru pro CS-mount upevnit při použití distanční podložky o tloušťce 5 mm. Objektiv CS-mount na kameře určené pro objektiv C-mount však nelze zaostřit.

Větší rozměry čipů vyžadují i větší průměr otvoru v kameře. Lze se setkat i s dalšími typy uchycení, např. různými typy bajeťových zámků využívaných u fotoaparátů.

Softwarové vybavení

SDK

SDK (*Software Development Kit*) umožňuje integrovat komunikační rozhraní do aplikačních programů v některém z běžných programovacích jazyků implementovaném ve specifickém operačním systému. Vybave-

ní kamery tímto softwarem a jeho funkce jsou zajímavé hlavně pro programátory uživatelských aplikací, kteří chtějí obsluhovat funkce kamery na co nejnižší úrovni referenčního komunikačního modelu ISO/OSI.

Standardy strojového vidění

Na standardy strojového vidění je možné pohlížet jako na protokoly aplikační vrstvy referenčního komunikačního modelu ISO/OSI. Samotná kompatibilita rozhraní Camera Link nebo Ethernet nezaručí, že aplikace bude s kamerou bez problémů komunikovat. Proto profesní asociace výrobců komponent strojového vidění (EMVA v Evropě, AIA v USA) přijaly normy určující např. formát datového toku při přenosu obrazu, formát pole pro kameru a další předpisy umožňující výrobcům softwaru sjednotit rozhraní aplikační vrstvy.

V širším měřítku se ujal dva standardy: GenICam, který je spjat hlavně s rozhraním

Camera Link, a GigE vision, spojený s gigabitovým Ethernetem. Pro oba tyto standardy jsou k dispozici softwarové knihovny usnadňující integraci kamery do uživatelské aplikace, opět v závislosti na operačním systému a programovacím jazyku.

Knihovny pro vývojová prostředí

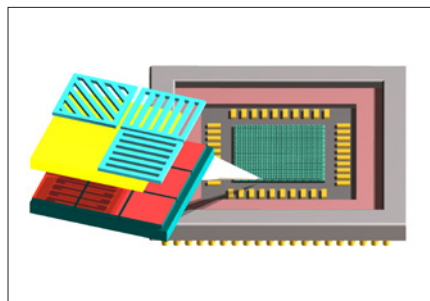
Mnoho výrobců nabízí vývojová prostředí obsahující nástroje, které zjednodušují analýzu obrazu a přímo poskytují výsledky obvyklých operací používaných při analýze obrazu v aplikacích strojového vidění. Mezi nejrozšířenější patří např. Halcon nebo LabView. V případě, že integrátor aplikace některé z těchto vývojových prostředí využívá, je výhodné, když ke kameře výrobce poskytuje i knihovny pro začlenění kamery do vývojových nástrojů.

Ing. Otto Havle, CSc., MBA

Nové polarizační snímače obrazu dokážou objevit i skryté vady

Pracovníci Fraunhoferova ústavu pro integrované obvody IIS (*Institut für Integrierte Schaltungen*) v Erlangenu se v poslední době zabývají novými možnostmi detekce směru polarizace a spektrálního složení světla k měřicím účelům. Za tím účelem vyvinuli speciální snímač obrazu využívající modifikované nanostruktury vytvořené technologií CMOS. Jde o novou techniku umožňující snímat směry polarizace světla po jednotlivých obrazových bodech a realizovat tak polarizační snímač obrazu, s nímž lze v reálném čase pořídit snímky, které zachycují současně světelné paprsky s různou přesně určenou polarizací. Navíc lze v jednotlivých obrazových bodech nastavit různou spektrální citlivost, což dovozuje zhotovit také spektrální snímače obrazu (senzory barvy).

Princip nového snímače barvy a polarizace světla (obrazu) spočívá v uspořádání kovových vrstev vytvářených moderní technikou CMOS takovým způsobem, aby v oboru vlnových délek λ menších než vlnová délka viditelného světla ($\lambda < 400$ nm) bylo dosaženo požadované optické funkce. Při realizaci polarizačního snímače obrazu se – podobně jako u Bayerovy masky – jednotlivé dílčí obrazové body (barevný model RGB) na čipu snímače opatří kovovými mřížkami propouštějícími jen světlo polarizované např. vodorovně nebo svisle, popř. také v libovolném směru (obr. 1). Jako výsledek lze simultánně sejmout a zobrazit několik obrazů předmětu



Obr. 1. Kovové mřížky pro jednotlivé dílčí obrazové body (subpixel) na čipu snímače polarizovaného obrazu (foto: Fraunhofer IIS)



Obr. 2. Kamera Polka ke snímání polarizovaného obrazu (foto: Fraunhofer IIS)

zájmu v různě polarizovaném světle. Uvedený postup umožňuje pozorovat jinak neviditelné vlastnosti materiálů, jako např. vnitřní prnutí nebo poškození skrytá třeba pod povrchovou vrstvou laku. Při vhodně zvoleném počtu a seřazení polarizačních prvků lze do-

sáhnout značně velkého úhlového rozlišení směru polarizace, a to velikosti řádově asi jedna tisícina stupně. Nový snímač obrazu je tudíž použitelný také v polarimetrech.

Podle pracovníků IIS se nové polarizační snímače obrazu uplatní například v těchto přístrojích:

- v polarimetrech s velkým rozlišením k chemickému rozboru látek;
- v polarizačních kamerách k účelům:
 - kontroly kvality zjišťováním skrytých výrobních vad, např. mikroskopických defektů v optických sklech cestou zviditelnění dvojitěho lomu světelných paprsků,
 - dosažení většího kontrastu při inspekci kovových povrchů,
 - lékařské diagnostiky, např. při vyšetřování buněk a tkání;
- v kamerách sledujících povrch vozovky pro detekci přítomnosti náledí a vody,
- v elipsometrech k měření tloušťky tenkých vrstev.

Některé zajímavé výsledky své činnosti představili odborníci z IIS odborné veřejnosti na veletrhu Sensor+Test 2011 v Norimberku. Mimo jiné zde názorně předvedli použití nové polarizační snímací kamery Polka (obr. 2), umožňující zviditelnit dvojitý lom světelných paprsků v izotropním plastu nebo ve skle.

[*Verborgenes erkennen mit neuartiger Polarisations- und Spektralmesstechnik*. Pressemitteilung Fraunhofer IIS, 7. června 2011.]

Kab.