



Foto: Uwe Steinmüller

Ted' už všichni známe teoretické pozadí zobrazování ve vysokém dynamickém rozsahu, stejně jako známe dostupné nástroje. Ovšem otázkou stále zůstává, kde seženeme obrázky?

V zásadě existují tři způsoby vytváření obrázků s vysokým dynamickým rozsahem.

Za prvé, můžeme je vytvářet zcela uměle pomocí 3D programu. V dnešní době všechny renderovací enginy vnitřně pracují s 32bitovými hodnotami v pohyblivé řádové čárce. Takže data existují až do chvíle, než se finální obrázek uloží na disk. Častým zvykem je ukládání 8bitového obrázku, čímž však jednoduše zahodíme většinu drahocenného renderování. A to je opravdu škoda, neboť získání plného dynamického rozsahu renderovaného obrázku už nemůže být snazší: prostě jej uložte ve formátu EXR! (Což je rozsáhlé téma samo pro sebe, dostaneme se k němu později v kapitole 7 o renderování obrazů vytvořených počítačem.)

Druhým možným způsobem je vyfotografování obrázku HDR přímo pomocí fotoaparátu s podporou HDR. Ano, i takové existují. Víím, co si myslíte, ale bohužel musím říci ne, nemůžete si jej dovolit. Alespoň prozatím. Pokud však nemáte přebytečných zhruba 900 tisíc korun. Taky byste se mohli vrátit zpět na fakultu a zapsat se do kurzu elektrotechniky. Pak byste mohli mít šanci zapojit se do práce na prototypu nového senzoru pro záznam obrazu HDR. Na něm se již pracuje v několika výzkumných laboratořích a opravdu je pouze otázkou času, než se dostane do hromadné výroby.

Třetím způsobem by mohlo být pořízení série obrázků s různými expozicemi a jejich digitální sloučení do jednoho obrazu HDR. To již lze provést pomocí libovolného fotoaparátu, který umožňuje ruční nastavení expozice. Ovšem je třeba spousty ručního nastavení, a poněkud stinnou stránkou je fakt, že tato technika je do značné míry omezena na statické scény. Sloučení sekvence stupňovaných expozic do dobrého obrazu HDR je zručnost sama o sobě, o které se podrobněji zmíníme v této kapitole.

Pokud cítíte nutkání fotografovat obrázky HDR hned teď, můžete klidně přeskočit až k části 3.2 kde se dozvíte více o fotografování a slučování stupňovaných expozic. Pokud vás však zajímá i trocha technického pozadí toho, jak vývoj digitálních fotoaparátů nevyhnutelně směřuje k obrazu HDR, měli byste číst dál.

3.1 Senzory pro HDR

Výrobci fotoaparátů musí neustále přicházet s novinkami. Počty megapixelů dosáhly úrovně, která je více než dostačující; již převyšují rozlišení, která bychom mohli dosáhnout u kinofilmu. Takže **table** válka již skončila. Novým bitevním polem je dynamický rozsah (DR). A tato bitva již začala. Populární web zabývající se testováním fotoaparátů, Digital Photography Review (www.dpreview.com), učinil z DR testovací kritérium, využívající určené testovací nastavení s podsvíceným grafem ve stupních šedi.

Senzorová technologie je motorem této inovace a snímací zařízení obrazu (obrazový senzor, CCD) této oblasti dominovaly od osmdesátých let. Běžné obrazové senzory dokážou zachytit dynamický rozsah od 60 do 70 dB, což je hodnota ekvivalentní 10 až 11,5 EV. Špičkové obrazové senzory CCD dosahují 78 dB (13 EV), což je však bohužel horní hranice technologie obrazových sensorů CCD. Pro srovnání, slunná exteriérová scéna může obsahovat 100 až 150 dB (16 až 25 EV).

Takže vtip je v tom, co může být tak složité na vytvoření sensorového čipu HDR?

3.1.1 Problém

Z hlediska hardwaru problém pramení přímo z technické definice dynamického rozsahu. Jak jsme zmínili již v úvodu, dynamický rozsah je definován jako logaritmický poměr mezi největším (nejsilnějším) a nejmenším (nejslabším) čitelným signálem.

Dosažením do vzorce dostáváme:

$$DR = 20 \times \log_{10} \frac{Max\ Signal}{Min\ Signal}$$

Ano, já vím, slíbil jsem, že nebudou žádné další vzorce. Ruším svůj slib, ale ne bezdůvodně: pokouším se totiž vysvětlit technický problém, který lze vlastně snáze pochopit pohledem na vzorec než přečtením ve větě. A nedělejte si starosti s hodnotou 20. Jedná se pouze o násobitele, který mění výsledek do čitelnější číselné hodnoty. Výsledek bude udán v jednotkách decibel (dB). Mnohem zajímavější jsou proměnné signálů.

Maximální signál je nejvyšší použitelná hodnota, kterou můžete použít na pixel, než bude zcela saturovaný. Pokud by byl jen o trošku jasnější, prostě by se „ořízl“. Jednou možností, jak zvýšit dynamický rozsah, by bylo zvýšení tohoto maxima vytvořením velmi velkého a robustního senzoru. Problém je v tom, že čím výkonnější senzor, tím více produkuje šumu, a tím vyšší je jeho energetická náročnost.

Získání lepšího minimálního signálu: oproti tomu minimum je nejmenší signál, který lze rozeznat od šumu. Takže v podstatě mluvíme o celkovém poměru signálu vůči šumu. Každý senzor má určitý základní šum, pocházející z elektronů náhodně rozmístěných v materiálu. Od těchto elektronů se očekává, že čekají na nějaké světlo, které je uvolní, přesto však vždy existuje pár elektronů, které jsou vybuzené příliš a stejně se uvolní.

Tato situace má několik příčin a některé z nich souvisí se skutečností, že potřebujeme elektrony spočítat, a to pomocí jiných elektronů. To už však zabředáváme do zákonů kvantové fyziky – stačí si zapamatovat skutečnost, že každý senzor má určitou základní úroveň šumu. Pokud tuto úroveň šumu nějakým způ-

sobem snížíme, můžeme snímat ještě slabší signál.

To by nám nahrávalo do karet, neboť náš senzor by byl přesnější a my bychom dosáhli zvýšeného dynamického rozsahu.

Konec konců, vlastně existuje způsob efektivního snížení úrovně šumu v běžných čípech CCD – můžete je zchladit. Chladné elektrony začínou být líné a s menší pravděpodobností se z nich stanou zběhové. Tuto techniku používají profesionální digitální stěny a nutno říci, že funguje skvěle. Není to však levná záležitost, neboť tichý a efektivní chladicí systém vyžaduje spoustu technické dovednosti. Ti, kteří pořizují snímky s digitálním středoformátem, by si nemuseli dělat starosti o peníze, ale my ostatní zřejmě tuto chladicí technologii v dostupném fotoaparátu hned tak nespatříme.

Vývoj: nicméně dosažení lepšího poměru signálu vůči šumu ze senzoru je výzvou pro inženýry, která existuje už od počátku. Poměr signálu vůči šumu byl vždy měřítkem pro míru kvality. Současně byl vždy indikátorem dynamického rozsahu, který můžete pomocí daného senzoru zachytit. Právě teď přichází první vlna dostupných řešení, která jsou nám k dispozici. Současné řady digitálních zrcadlovek již zvládají takový dynamický rozsah, že jej musí zabalit do proprietárních formátů RAW. Tím však věc nekončí; inženýři nedokáží jen tak jednoduše odsunout problém stranou a říci, že tohle stačí. Digitální zobrazování zkrátka přirozeně předurčuje vývoj vyšších dynamických rozsahů.

Další mohutná vlna hromadí svoji energii a jakmile zasáhne pobřeží, zasáhne každého. Každého, kromě nás, neboť my jsme připraveni na obrázky s vysokým dynamickým rozsahem, vidíte?

Tak se pojďme podívat, co tito inženýři vytváří ve svých laboratořích!



◀ Běžný senzor CCD funguje jako pole pomerančovníků.

3.1.2 Čas na naplnění

Začneme poněkud nekonvenčním přístupem ke zvýšení dynamického rozsahu. Místo čtení aktuálního stavu každého pixelu po zadaném expozičním čase bychom si na něj mohli pouze počíhat a potom změřit čas, který každý pixel potřebuje k tomu, aby byl zcela naplněn (nabit). Horní hranice dynamického rozsahu při zachycení nejjasnějších světél by byla posunuta až někam k času odezvy obvodů, který je otázkou jejich výstupní rychlosti. Oříznutí by mohlo nastat pouze u tmavých oblastí, kdy musíme nastavit práh pro maximální přijatelný expoziční čas.

Tento koncept zní dobře, ovšem implementace je obtížná. Jedním problémem je opotřebení čipu, neboť senzory by se stále plně nabíjely. Rovněž navržení radikálně nové logiky načtení hodnot, která dokáže registrovat čas naplnění, se ukázalo být téměř nemožné.

3.1.3 Logaritmické senzory CMOS

Pohádka o senzorech CCD a pomerančovnících: obyčejný senzor CCD funguje stejně jako pomerančovníková plantáž. Jakmile je pixel zasažen světlem, vyroste pomeranč, nebo jak mu říkají vědci, náboj. Čím více světla rostlina dostane, tím více pomerančů vyroste. Vedle každého stromu umístíme pomocníka. Když nastane čas sklizně, otrhají pomeranče do kbelíku a srovnají je do řady jako kbelíkovou armádu. Dole na silnici se všechny tyto kbelíkové brigády spojí do velkého proudu, který vede k farmě. U dveří stojí kontrolor, který počítá pomeranče v každém kbelíku a zapisuje je do tabulky. Jelikož kbelíky přichází v pořadí, v jakém byly stromy zasazeny, tato tabulka bude řádek po řádku přesnou reprezentací celého pole.

Na čipu senzoru CCD se tento kontrolor nazývá analogově-digitální převodník (ADC).

Pomeranče jsou náboje shromážděné fotodiodami a pomocníci jsou řetězy kondenzátorů.

V čem je technologie CMOS jiná: logaritmické senzory jsou pro srovnání tvořeny jinak. Jejich architektura je založena na mikroprocesorové technologii CMOS – proto se jim často říká senzory CMOS. (CMOS je zkratkou z ang. complementary metal oxide semiconductor.) Hlavním rozdílem je, že ke shromáždění a zesílení náboje, který se vytváří během expozice, používají dodatečné tranzistory na každý pixel. Tyto tranzistory lze přímo číst, neboť jsou propojeny do sítě. V podstatě se jedná o paměťové čipy s fotodiodou vedle každé paměťové buňky. V naší analogii bychom neměli pomocníky tvořící kbelíkový zástup; pomocníci by vedli pomeranče na farmu sami. Všechny by měli pager, takže je můžeme volat ke dveřím v libovolném pořadí. Farma by také mohla být menší, protože v logaritmickém sensorovém čipu bychom pěstovali pomerančovníky přímo na střeše naší farmy. V podstatě by bylo vedle každého stromu schodiště a pomocníci by pouze chodili o patro níž.

Tento senzor je vysoce integrovaný; někdo jej nazývá fotoaparátem na čipu. Může být vyroben ve stejné továrně jako běžné paměťové čipy, takže jeho výroba je levnější. Jelikož proces čtení je mnohem jednodušší než v případě čipů CCD, rovněž potřebuje mnohonásobně méně energie ke svému fungování. Všechny tyto výhody jej činí velmi atraktivním pro použití ve spotřebitelských produktech.

Na rozdíl od lineární reakční křivky typické pro čipy CCD tyto čipy reagují na světlo logaritmicky. To proto, že tranzistory tvoří náboj logaritmicky. Toto chování je velmi podobné charakteristické křivce filmu, a proto může tento čip dosáhnout podobného dynamického rozsahu. Trpí však stejnými nedostatky jako

film: nelinearita umožňuje dobrou reprodukci barev pouze ve střední části dané křivky. V horní a dolní části bychom mohli pokrýt značný rozsah, ale je tak těsně zhuštěný, že i nejmenší množství šumu může signál markantně deformovat.

Slabé místo: s touto technologií je spojena další skutečnost: potřebujeme místo na povrchu těchto tranzistorů. Pokrytí fotodiodami, které všechny dohromady tvoří skutečnou světlocitlivou oblast, je pouze asi 30 %. To znamená, že pouze jedna třetina dostupného světla se použije pro obraz; zbytek pouze zasáhne tranzistory a zahřeje je, což není nijak dobré, neboť tím vzniká další šum. Takže máme dvojitý problém: ztrácející se světlo a zvýšený šum. Řešením je přidání horní vrstvy skládající se z milionů drobných čoček. Jedna vyhrazená miniaturní čočka pro každý pixel, která je zodpovědná za zachycení veškerého světla a jeho nasměrování na fotodiodu. To vyžaduje spoustu úsilí, které je třeba věnovat samotnému návrhu.

Přesto je tento typ architektury senzoru nejen velmi slibný, ale už zasáhl i masový trh. Senzory CMOS potřebovaly trochu času k dosažení úrovně kvality a rozlišení vyvinutější technologie CCD, ale dnes ji již zcela dostihly. Řada EOS Digital SLR od Canonu používá výlučně senzory CMOS, a to v podobě návrhu obsahující čtyři tranzistory na každý pixel. Nové senzory JFET od Nikonu, které můžeme vidět ve špičkovém fotoaparátu Nikon D2, jsou další odvozeninou této technologie. Senzory JFET jsou pojmenovány po speciálním druhu tranzistoru, který je zde použit, po takzvaném tranzistoru řízeném elektrickým polem s přechodovým hradlem (z ang. junction-field-effect-transistor), díky kterým si Nikonu vystačí s pouze třemi tranzistory.

3.1.4 Digitální senzor pixelů/HDRC

Princip logaritmických senzorů CMOS byl dalším krokem směrem k projektu programovatelných digitálních fotoaparátů, který zpracovala Stanfordská univerzita. Pod vedením Abbase El Gamala členové jeho pracovní skupiny vytvořili digitální senzor pixelů (DPS). Přidávali k pixelům více tranzistorů až do okamžiku, kdy každý pixel měl svůj vlastní analogově digitální převodník a své vlastní logické obvody. Tím docílili efektivního zdokonalení senzoru; základní kroky předzpracování mohou být provedeny už v hardwaru samotnými pixely.

V naší analogii bychom sběrače pomerančů vybavili mobilním telefonem a kalkulačkou místo jednoduchého pageru. Ano, mohou mít také iPhone. Jsou to teď opravdu „šikovní“ lidé dvacátého prvního století. Nemusí už pomeranče nikam nosit. Jen je oberou ze stromu, spočítají a zavolají na dané číslo.

Tím se eliminuje hlavní slabé místo. Jelikož všechny pixely mohou ve stejný okamžik provádět svůj vlastní analogově-digitální převod (potažmo počítání pomerančů), máme téměř okamžitě k dispozici digitální obraz. Proto dokáže prototyp ze Stanfordu fotografovat ohromující rychlostí 10 000 fps. Ano, čtete správně: deset tisíc snímků za vteřinu! Na tachometru jsou to dvě čárky za hodnotou „Neskutečná rychlost“.

Trik nyní spočívá v provozu senzoru na vyšší snímkové frekvenci, než je současná generace zobrazování. Máme spoustu času vyfotografovat několik expozic každého záběru a stále bychom získali plynulé video s 30 snímky za vteřinu. Jednotlivé expozice lze slučovat do obrazu HDR na nejnižší úrovni v každém jednom pixelu. Jelikož architektura tohoto čipu je založena na mikroprocesorové technologii CMOS, máme už dost zkušeností s těmito výpočty na úrovni samotné logiky. Jedná se o stejně

návrhy obvodů jako v procesorech počítačů nebo grafických karet. Takovéto předzpracování na čipu má rovněž hezký vedlejší efekt spočívající v redukci šumu, neboť výsledné hodnoty pixelu jsou průměrem více vzorků. Také bychom mohli v této předzpracující fázi provádět složitější výpočty – například snížení rozostření pohybem nebo detekci hran a tvarů.

Nad rámec oboru fotografie: s takovými možnostmi zpracování se tato sensorová technologie velmi blíží napodobení tomu, co dokáží naše oči. Jedná se o opravdu chytrý fotoaparát na čipu. Možnosti aplikace přesahují rámec oboru fotografie; například existuje možnost umělého zraku. Již byly vymyšleny prototypy implantátů umělé sítnice, které mají slepým lidem vrátit jejich zrak. Z tohoto hlediska se výzkum v oblasti zobrazování posunuje k dešifrování toho, jak funguje lidský zrak, jednoduše díky zvládnutí jeho emulace a jeho markantnímu zlepšení díky metodám pokusu a omylu. Tento vznikající studijní obor se nazývá „machine vision – strojové vidění“ a dalším možným ovocem tohoto odvětví jsou pokročilé zabezpečovací systémy s rozpoznáním obličeje a plně automatických automobilů se systémy předcházení kolizím. Obě již existují ve fázi prototypů a kdo ví, co nás ještě čeká.

Fraunhoferův institut v Německu, který vynalezl zvukový formát MP3, vytvořil podobný senzor založený na technologii CMOS s logikou načítání po pixelu. Jeho verze se nazývá High Dynamic Range CMOS (HDRC®). Symbol registrované obchodní známky se vztahuje k jeho patentované architektuře, která připomíná vrstvený sendvič. Všechny tranzistorové obvody jsou ukryty pod bezešvým, jako film tenkým povrchem z fotodiod. Ten zvyšuje faktor plnění na téměř 100 %, což eliminuje potřebu mikročoček. Senzor běží stejnou neuvěřitelnou