

ToF сьогодні. Отримання 3D-зображення: необхідне чи надмірне

Олександр Шведов

Ще кілька років тому технологія отримання об'ємного зображення досліджуваного об'єкта — Time of Flight, або ToF, — була на слуху тільки в малої групи професіоналів, які знайшли її для себе корисною. В інших випадках, нерідко під час численних виставок, ми чули про часопрольотні виміри, здебільшого індустріального спрямування, де щоразу демонстрували безліч умовно унікальних алгоритмів і сфер застосування, які найчастіше не мають майже нічого спільного з реалізацією практичних завдань.

Сьогодні ж, разом із безперервною мініатюризацією і зростанням функціоналу напівпровідників, ми бачимо, як ще недавно фантазійні технології знаходять своє місце серед звичних для нас приладів. ToF-сенсор у смартфоні (рис. 1) тепер повинен встановити кожен виробник, який поважає себе, і саме на відсутність датчика вкажуть усі, кому доведеться написати огляд про мобільну новинку. Але чи так він необхідний і, взагалі, навіщо потрібен цей ToF-сенсор?

Сама по собі часопрольотна технологія існує доволі давно, її, ймовірно, запозичили в кажанів, які вимірюють відстань до об'єкта за часом, необхідним для повернення випромінюваного ними ж ультразвукового сигналу. Схожий принцип використовується у всім відомій медичній процедурі МРТ, де картинку отримують за допомогою ана-

лізу відбитого сигналу різної частоти. Отримувати відеосигнал аналогічним способом навчилися недавно, відтоді намагаючись знайти для нової технології достойні застосування. Їх до наших днів набралось чимало.

Абсолютна увага сьогодні належить флагманським смартфонам, де для збереження репутації вже ніяк не можна обійтися без ToF-сенсора. До тієї ж категорії можна віднести і різні побутові прилади, на кшталт ігрових приставок і домашніх ПК. Не виключено, що, як і Wi-Fi, часопрольотні камери незабаром будуть встановлені навіть у чайнику. Поки що технологія застосовують, наприклад, для розпізнавання обличчя власника пристрою Face-ID, створення доповненої реальності (рис. 2), безконтактної взаємодії користувача з контентом (рис. 3), метрології. Простіше кажучи,

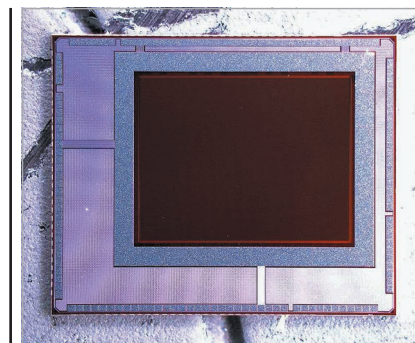


Рис. 1. ToF-сенсор Gpixel GTOF0503

останні функції дають змогу розставити меблі у квартирі, в реальному часі домальовуючи диван або кухонний гарнітур на екрані смартфона, при цьому вимірюючи реальні розміри предметів із неабиякою точністю. І можна замовити пару нових кросівок з онлайн-магазину, примірявши їх і розглянувши з усіх боків — хіба це не зручно?

«Боке» — це слово, напевно, знає сьогодні кожен. Художній ефект, що дає змогу виділити об'єкт фотографування шляхом розмиття фону, досягається зазвичай завдяки властивостям сенсора й оптики, об'єктива камери, а саме певної фокусної відстані та світлосили, і визначається одержуваною глибиною різкості. Необхідних значень параметрів оптики для отримання такого ефекту за



Рис. 2. Приклад створення доповненої реальності (джерело: Sony Depth Sensing website)



Рис. 3. Приклад безконтактної взаємодії користувача з контентом (ігровий контролер Kinect)

допомогою камери мобільного телефону досягти не вдається. І сьогодні боке в камері мобільного телефону формується програмним способом, зокрема комбінацією інформації, отриманої з декількох камер одночасно. Причому найбільшої точності вдалося домогтися саме за допомогою тривимірної карти об'єкта, що знімається, для його виділення і подальшого розмиття фону. Саме ці, мобільні застосування і дали істотний поштовх розвитку ToF-технології отримання об'ємного зображення досліджуваного об'єкта в реальному часі. Що ж до інших соціально значущих завдань, вирішити які мають ToF-камера і ToF-сенсор, серед них варто особливо відзначити автомобільні допоміжні системи. Адже саме вони сьогодні все частіше стають незамінними помічниками водіїв і покликані скоротити кількість нещасних випадків на дорогах. Це і системи автономного водіння (рис. 4), що розробляються по всьому світу, і системи автономного паркування автомобіля, навігації дронів, і системи контролю наближення пішоходів, а також інших транспортних засобів. Важливий і внутрішній комфорт водія, поведінку якого також контролюють модулі, засновані на побудові його тривимірної моделі. Вони допомагають стежити за станом і поведінкою водія (рис. 5), дають змогу змінювати натяг ременя безпеки відповідно до статури, кількості одягу та рухів водія, налаштувати положення і форму крісла і навіть розпізнавати власника транспортного засобу для поліпшення контролю доступу до функціоналу автомобіля. Усе це доповнює ергономічні вдосконалення, адже за допомогою аналізу рухів тривимірної моделі водія з'являється можливість безконтактного керування жестами.

Однак слід пам'ятати, що саме індустрії ми завдячуємо розвитком TOF-технології. Адже в промисловості ці прилади давно застосовують, і в багатьох галузях вони сьогодні незамінні, зокрема під час вимірювання та контролю заповнення об'єму, що нерідко можна спостерігати в автоматизованих, а тим паче в автоматичних системах, наприклад для автоматичного нанесення логотипу на поверхню упаковки, незалежно від форми та розміру об'єкта.

На рисунку 6 показано роботу автоматичного складу, де дві камери навантажувача дають змогу без участі оператора керувати машиною і виконувати навантаження. У цьому прикладі при створенні камери використовувався новітній iToF-сенсор Gpixel GTOF0503.

У наведеній автоматичній складській системі верхня камера навантажувача дає змогу визначити загальну обстановку, виявити перешкоди й уникнути зіткнень. Фронтальна камера проводить вимірювання та ідентифікацію об'єктів, розташованих перед нею. Таке поєднання допомагає точно



Рис. 4. Автомобіль із системою автономного водіння (джерело: Sony Depth Sensing website)



Рис. 5. Приклад розпізнавання жестів водія (джерело: Sony Depth Sensing website)

й ефективно керувати навантажувачем, повністю контролюючи простір навколо нього. Похідних у такого застосування може бути безліч, і що стосується керування безпілотними пристроями, тут переоцінити ToF- і 3D-вимірювання неможливо — без них сьогодні було б дійсно складно отримати гідний результат.

Але давайте абстрагуємось від практичних застосувань і звернемося до самої технології та її основи — сенсорів зображення, без яких ні про яке 3D не могло б бути й мови.

На рисунку 7 схематично показано принципи роботи основних індустріальних систем побудови 3D-зображення, що широко застосовуються сьогодні. Серед них (зліва напра-

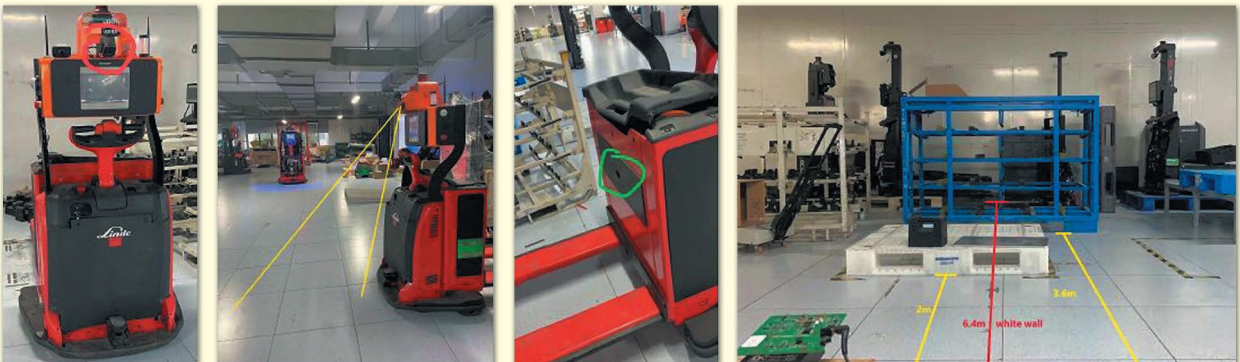


Рис. 6. Кадри випробувань автоматичного керування навантажувачем на основі двох iToF-камер на базі сенсора Gpixel GTOF0503

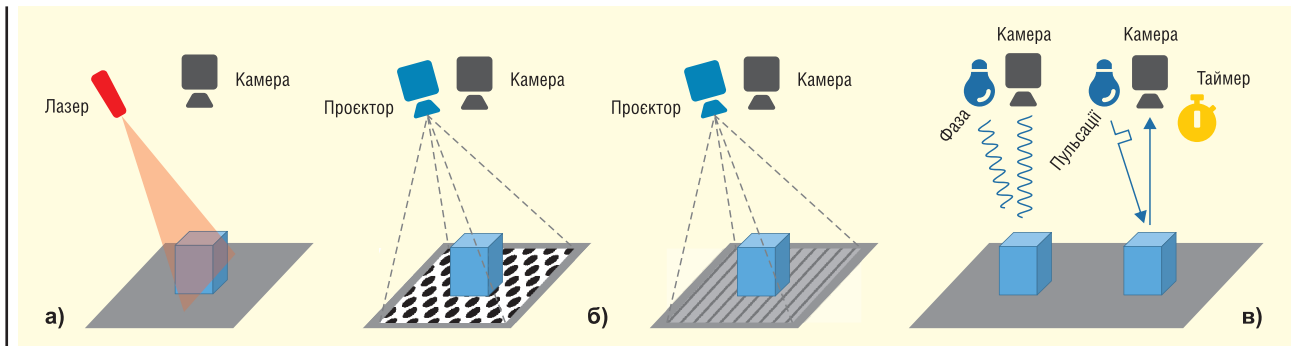


Рис. 7. Приклади основних методів отримання та аналізу 3D-зображення (джерело: ZIVID AS): лазерна триангуляція (а); системи на основі структурованого світла (б); часопролітна система (в)

во) лазерна триангуляція, системи на основі структурованого світла і часопролітні системи, про які йшлося на початку статті. Поговоримо коротко про кожну з них.

ЛАЗЕРНА ТРИАНГУЛЯЦІЯ

Широко поширена лазерна триангуляція належить до найпростіших систем і ґрунтується на двох ключових компонентах: лазерному випромінювачі та камері, що приймає сигнал. Така система проста в реалізації як з погляду фізичних компонентів і їхнього узгодження, так і в написанні алгоритмів програмного забезпечення. Лазерна триангуляція — технологія сканувальна, вона якнайкраще підходить для поточкових виробничих і логістичних ліній, дорожнього та залізничного полотна. Однак для вивчення тривимірних об'єктів цей спосіб хоча і застосовний, але незручний через необхідність організації безлічі точних переміщень для сканування всієї поверхні досліджуваного об'єкта. До того ж з таким методом варто забути про інформацію про колір.

Які сенсори знадобляться для реалізації цього методу? Критичними параметрами стануть кадровий затвор (*Global Shutter*), роздільна здатність по горизонталі (роздільна здатність по вертикалі обмежена сканувальним видом отримання зображення) і співвідношення сигнал-шум (*Signal-to-Noise Ratio, SNR*), обумовлене величиною накопичуваного сигналу (розміром пікселя). Всі ці параметри відповідають за точність побудови підсумкового зображення. Важливою стане і висока кадрова частота. Як приклад наведемо два сенсори Gpixel: перший — індустріальний GMAX2509 з роздільною здатністю за горизонталлю 4 200 пікселів, кадровою частотою до 618 Гц при обмеженні в 1 000 рядків і SNR 38.3 дБ. Другий — представник надшвидкісної серії GSPRINT4510 з горизонтальною роздільною здатністю 4 608 пікселів, швидкістю зчитування 3886 Гц за обмеження в 1 000 рядків і SNR 44.8 дБ.

СИСТЕМИ НА ОСНОВІ СТРУКТУРОВАНОГО СВІТЛА

Системи на основі структурованого світла мають схожість із принципом лазерної триангуляції, але замість точкового лазерного випромінювання тут використовується підсвічування поля. Це називається методом повного поля, оскільки він забезпечує повне тривимірне зображення об'єкта з високим рівнем точності та роздільної здатності. Метод широко поширений в AOI — автоматичній оптичній інспекції об'єктів для одномоментної, однокадрової побудови 3D-зображення об'єкта, що досліджується, що демонструє високу продук-

тивність і гнучкість. Однак такий метод вимагає статичності досліджуваного об'єкта і найчастіше використовується в лабораторно-виробничому обладнанні.

Сенсори для системи на основі структурованого світла також повинні вирізнятися кадровим затвором (*Global Shutter*), великою роздільною здатністю (В×Г) переважно у співвідношенні 1×1, хорошим SNR для забезпечення точності побудови 3D-об'єкта і режимом HDR. Всі ці характеристики відмінно представлені в сенсорах Gpixel індустріального GMAX і надшвидкісного сімейства GSPRINT з кадровим затвором. GMAX3265 з роздільною здатністю 9 344×7 000 (В×Г) з кадровою частотою до 71 Гц за повної роздільної здатності, SNR 40 дБ і черезрядковим HDR. GSPRINT4521 з роздільною здатністю 5 120×4 096 (В×Г) видає до 1 000 Гц за повної роздільної здатності з SNR 44.8 дБ і повнокадровим HDR-режимом завдяки одночасному зчитуванню кадру з різними коефіцієнтами посилення.

ЧАСОПРОЛІТНІ СИСТЕМИ

Повертаючись до часопролітних систем (*Time of Flight*), уточнимо, що на відміну від просторових систем, вони ґрунтуються на вимірюванні періоду часу, необхідного для прольоту (проходження) світла від джерела до об'єкта та назад. Сам метод ділиться ще на два підвиди, прямий (*direct, dToF*) і непрямий (*indirect, iToF*), в яких час вимірюється безпосередньо і шляхом аналізу фазового співвідношення між випромінюваним і детектуємим світлом із синусоїдальною модуляцією інтенсивності відповідно. Розвитком другого ме-

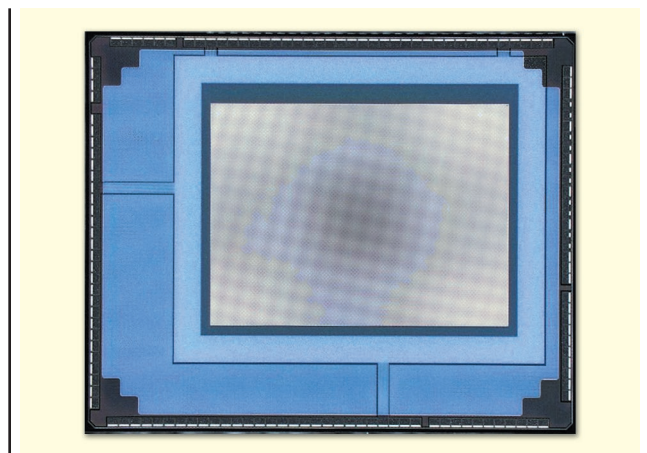


Рис. 8. ToF-сенсор Gpixel GTOF0503

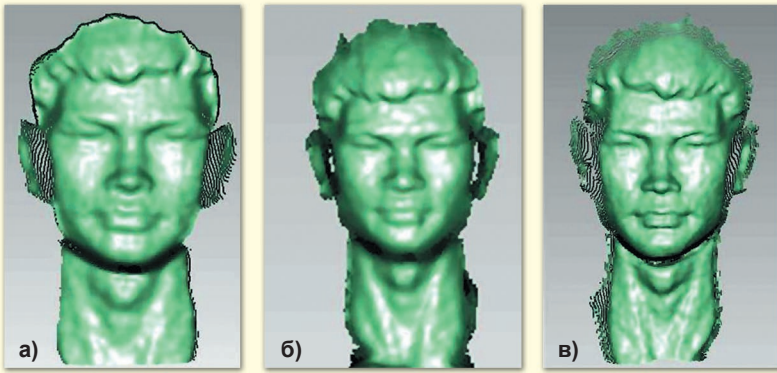


Рис. 9. Візуальне порівняння кадрів, отриманих в ідентичних умовах із застосуванням сенсора: Sony IMX516 (а); Gpixel GTOF0503 (б); Samsung (в)

тоду є імпульсний метод, у якому лазер випромінює дуже короткі світлові імпульси в поєднанні з синхронізованим сенсором зображення зі стробуванням. В останньому випадку для побудови 3D-зображення піксельно аналізується кількість накопиченого сигналу, що приймається пропорційно за дальність знаходження точки об'єкта.

ВИСНОВОК

Зараз ToF-прилади інтенсивно використовуються в найрізноманітніших напрямках. Сьогодні ці пристрої стали справді ефективними і компактними, що ще більше розширило сфери їх застосування. Побудова та аналіз 3D-зображення об'єкта і його оточення з ToF можливий у реальному часі та на різній відстані. Втім, проєктувальникам ще є над чим попрацювати — мала роздільна здатність сенсорів і кінцевих систем. Але і це лише питання часу. Для досягнення максимальної результативності ToF-система сьогодні має бути заснована на сенсорі, що відповідає таким вимогам:

- Кадровий затвор (багатоступеневий, multi-tap Global Shutter) для максимально різкого зображення без розмиття.
- Зворотне засвічення (*Backside Illumination, BSI*), висока частота модуляції (час передавання <math>< 5 \text{ нс}</math>) і комплексна вбудована схема синхронізації на кристалі. Все це необхідно для отримання надійної точності одержуваного зображення в реальному часі.
- Висока частота кадрів для точної фіксації об'єкта в кожен момент часу.
- Вбудовані схеми захоплення і зчитування для забезпечення гнучкості системи.

Яскравим прикладом ToF-сенсора, що відповідає всім цим вимогам, слугує нова матриця Gpixel GTOF0503 (рис. 1, 8).

Цей BSI KMOH-сенсор створений за всебічної підтримки індустріальних партнерів, з урахуванням їхніх побажань і реально потрібних функцій. Роздільна здатність матриці 640×480 пікселів розміром 5 мкм кожен, триступеневий кадровий затвор (*3-tap Global Shutter*, контраст демодуляції до 80% за 165 МГц, час передавання 3–5 с — всі ці параметри якнайкраще відповідають вимогам індустрії). Доповнений кадровою частотою до 60 Гц за повної роздільної здатності та широким операційним функціоналом на кшталт вбудованого бінінгу, відбиття по горизонталі та вертикалі, виділення областей інтересу (*Region of Interest, ROI*), безлічі режимів захоплення зображення, популярного інтерфейсу MIPI, датчик може претендувати на звання одного з найкращих представників ToF-сенсорів.

На закінчення наведемо візуальне порівняння кадрів, отриманих в ідентичних умовах із застосуванням сенсорів Sony IMX516, Gpixel GTOF0503 та Samsung (рис. 9).

Сенсори демонструють схожі параметри, ну а остаточне рішення, звісно ж, приймає споживач, відповідно до наявних вимог і поставлених завдань.

Однак слід зауважити, що сьогодні, поза всякими сумнівами, ToF-сенсори не тільки стали невіддільною частиною промисловості та автоіндустрії, а й міцно закріпилися в житті звичайних людей. Варто лише трохи заглибитися в технічне оснащення сучасної побутової електроніки, як на поверхні опиняться ToF-сенсори, що допомагають зробити життя людей ефективнішим і комфортнішим.

CN

РАДІОМАГ

МЕРЕЖА МАГАЗИНІВ РАДІОДЕТАЛЕЙ

www.radiomag.com.ua