

ЦИФРОВИ БЛИЗНАЦИ В СИСТЕМИТЕ ЗА ДИНАМИЧНО ПОЗИЦИОНИРАНЕ

Делян Тодоров, PhD студент, ВВМУ“ Н.Й Вапцаров“

E-mail: delyan.mtodorov@gmail.com

ВВМУ“ Н.Й Вапцаров“, гр. Варна, ул. Васил Друмев 73

Резюме: Цифровите близнаци за офшорни операции са в начален стадий на развитие, а бордовият хардуер за цифровизация и телекомуникационната инфраструктура стават все по-достъпни. Морската индустрия претърпява бърза трансформация, а технологията на цифровите близнаци е в челните редици. Използването на цифрови близнаци в системите за динамично позициониране ще доведе до увеличаване на оперативната ефективност, надеждността, устойчивостта и рентабилността. В настоящата статия са разгледани предимствата и предизвикателствата при използване на цифрови близнаци в системите за динамично позициониране.

Ключови думи: Цифрови близнаци, системи за динамично позициониране

DIGITAL TWINS IN DP SYSTEMS

Delyan Todorov, PhD student, Higher Naval Academy “Nikola Vaptsarov”

E-mail: delyan.mtodorov@gmail.com

Higher Naval Academy “Nikola Vaptsarov”, 73 Vasil Drumev str., Varna, Bulgaria

Abstract: Digital twins for offshore operations are in the early stages of development, and onboard hardware for digitization and telecommunications infrastructure are becoming more accessible. The maritime industry is undergoing a rapid transformation, and digital twin technology is at the forefront. The use of digital twins in dynamic positioning systems will lead to increased operational efficiency, reliability, sustainability and profitability. This article discusses the advantages and challenges of using digital twins in dynamic positioning systems.

Keywords: Digital twins, dynamic positioning systems

Въведение

Идеята за използване на модел на цифрови близнаци датира от програмата „Аполо“ на НАСА, където са построени два идентични космически апарата, за да могат да се отразяват условията в космическия апарат по време на мисията [1]. С помощта на сдвоения модул инженерите на НАСА успяват да тестват и усъвършенстват потенциалните стратегии за възстановяване на Земята, преди да дадат инструкции на екипажа. В този

смисъл всички видове прототипи, използвани за отразяване на реалните условия на работа за симулиране на поведението в реално време, могат да се разглеждат като двойници.

Концепцията за цифровите близнаци, която първоначално е формулирана от НАСА през 2003 г., включва цялостно използване на физически модели, актуализации на сензори и исторически оперативни данни за интегриране на мултидисциплинарни, мултифизични, многомащабни и многовероятностни симулационни процеси, като по този начин се създава виртуално представяне на физическия свят. Тази технология има потенциала да картографира целия процес на жизнения цикъл на конкретно физическо оборудване

1. Какво представлява цифров близнак?

След детайлно проучване на съществуващата литература за цифрови близнаци, най-точната дефиниция за цифров близнак според автора на настоящата статия, може да се формулира въз основа на проучванията в [2] и [3].

Цифровият близнак (ЦБ) е софтуерна платформа, насочена към отразяване на динамиката на дадена физическа система. ЦБ е съставен от три основни компонента:

1. модел
2. двупосочен поток от данни между физическата система и модела
3. актуализация на модела, така че моделът да се променя с течение на времето в зависимост от физическата система

Цифровият близнак се определя като интегрирана многофизична, многомащабна, вероятностна симулация на сложен продукт и използва най-добрите налични физически модели и актуализации на сензори, за да отрази живота на съответния близнак [4]. Моделът на цифровия близнак е въведен за първи път през 2002 г. като концепция за управление на жизнения цикъл на продукта. След първоначалните си наименования като модел на огледалните пространства (mirrored space model MSM) и модел на информационното огледало (IMM) [5], цифровият близнак получава своето настоящо наименование през 2011. През последните няколко години се наблюдава силен интерес към технологиите за цифрови близнаци. Цифровите близнаци интегрират изкуствения интелект, машинното обучение и анализа на данни, за да създадат живи цифрови модели, които се актуализират и променят, когато се променят физическите им аналози. Цифровият близнак е модел на физически актив, реализиран като математически модел, информационен модел или визуален модел. Машинното обучение предлага начин за създаване и актуализиране на модели на физическата система въз основа на извадкови данни [6]. Цифровият близнак може да се използва за мониторинг, диагностика и прогнозиране с цел оптимизиране на работата и използването на активите. Ето защо цифровите близнаци могат успешно да бъдат използвани за намиране на първопричината за проблемите и подобряване на производителността на системата.

Основната разлика между цифровите близнаци и общите модели е, че първите са специфични и отразяват физическите си аналози, с динамично взаимодействие на потока от данни. Обикновено моделирането и симулацията се използват за изграждане на система и подсистеми в една самостоятелна софтуерна среда за проектиране, контрол и оптимизация. Когато сложността на цялата система нарасне до определено ниво, като например кораб с компоненти с много области, моделирането на всички системи и оборудване в един софтуер е почти невъзможно. Цифровият близнак следва съответния си реален близнак през целия му жизнен цикъл, чрез събиране на сензорни измервания, актуализации на симулационния модел и софтуерни ъпгрейди.

Моделите са ключови елементи при цифровите близнаци. През последните десетилетия се наблюдава нарастващ интерес към разработването на компютърно базирани инструменти за проектиране и анализ за различни приложения, включително в морската индустрия. Понастоящем в процеса на проектиране се използват голям брой специализирани софтуерни продукти за анализ на конструкции, хидродинамика, изчислителна динамика на флуидите, енергийни системи и системи за управление, за да се оценят характеристиките на специални подсистеми.

С помощта на цифровия близнак морската индустрия може да се възползва от напредналите цифрови технологии, а предсказващият анализ за критичното морско оборудване ще намира широко приложение в бъдеще.

Освен това, ЦБ може да се използва за моделиране на производствената линия за производство на кораби и автоматизация, включително системи за динамично позициониране.

Моделите на цифровите близнаци изискват високо ниво на модулност, мащабност и динамична адаптивност и могат да бъдат ефективно конструирани в информационното пространство чрез техники за параметрично моделиране. Специализирани софтуерни инструменти улесняват създаването на виртуални модели, които определят геометричните характеристики и топологичните връзки на автоматизираната производствена линия. Освен това моделът обхваща цялостна динамична инженерна информация и подробни описания на отделните физически обекти.

Наличието на точен цифров запис на плавателните съдове и техните системи е ключът към запазването им в експлоатация и ефективното изпълнение на техните функции за по-дълго време. По време на жизнения цикъл на кораба с много възможни промени цифровият модел изисква работа с информация, която идва от различни източници, периоди и технологии.

2. Приложение на цифровите близнаци в експлоатацията на кораба

Експлоатацията на корабите е изпълнена с предизвикателства поради непредсказуемата морска среда, сложните технологии, необходими за управление на операционната система на кораба, и необходимостта от ефективна координация на персонала. Големите кораби

изискват координация между множество системи за навигация и маневриране, тъй като при цялостното планиране на системата липсва единен цифров контрол. Въвеждането на ЦБ в системите за експлоатация и навигация на корабите има потенциал да повиши безопасността и надеждността, като позволи наблюдение в реално време на цялостното състояние на кораба и прогнозиране на неизправности въз основа на исторически данни [7].

Академичната общност има значителен принос за прилагането на ЦБ в областта на продуктите за корабно оборудване. Lee et al. (2020) [8] предлагат ЦБ в реално време за експлоатация на кораби в открито море. Предложената система може да прогнозира рискове, свързани с плаването и маневреността, чрез анализ на данни за вълните и хидродинамичните характеристики за оптимизиране на маршрута в реално време. Системата използва сложен алгоритъм за реконструкция на вълните чрез използване на измерени вълнови радарни изображения, като успешно прогнозира бъдещото развитие на триизмерното вълново поле пред кораба. Това изследване е от голямо значение за прогнозиране на рисковете и работата на корабите в различни морски среди. По подобен начин Assani et al. (2022) [9] изказват предположението, че цифровите близнаци на кораб, които представляват цифрови записи или софтуерни клонинги на поведението на кораба, могат да бъдат използвани за симулации, които биха били много трудни или скъпи за провеждане в реалния живот.

Техните констатации разкриват, че ЦБ може да намали разходите, да осигури ранни предупреждения, да оптимизира работата на отделни корабни системи или цялостната експлоатация на кораба и да подпомогне управлението на кораба. Освен това Van der Horn et al. (2022) [10] въвеждат модел на ЦБ за наблюдение и прогнозиране на умората и повредите в кораби, основан на сравнение между действителната експлоатация на конкретния кораб и експлоатацията, която се е очаквала по време на фазата на проектиране на кораба. Цифровите близнаци са актуализирани чрез използване на данни, получени от сензори, и предложеният метод е сравнен с оценките за умора, които са получени от проектни референции по отношение на условията на вълните. Изследователите отбелязват, че моделът цифров близнак може точно да прогнозира оставащия експлоатационен живот на кораба, предоставяйки ценни сведения за инспекцията на кораба, планирането на поддръжката и вземането на оперативни решения.

Неотдавнашни проучвания подчертаха значителните предимства на прилагането на ЦБ за наблюдение на експлоатационното състояние на корабите и оптимизиране на транспортната ефективност, графици за поддръжка и управлението на персонала. Корабите, работещи в океана за продължителни периоди от време, проявяват множество характеристики, които могат да бъдат използвани за оптимизация. Учените са наблюдавали и проверили, че ЦБ може да повиши ефективността на безопасността на корабите и да подобри възвръщаемостта на инвестициите за корабособствениците. Понастоящем прилагането на ЦБ в експлоатационния етап на корабите включва предимно наблюдение в реално време на работата на оборудването, условията на работа и

виртуалното възстановяване чрез получаване на изображения на място и събиране на данни за оборудването.

3. Прилагане на цифрови близнаци при инспекции и поддръжката на кораби

В сферата на експлоатацията на корабите откриването на неизправности и поддръжката играят ключова роля за осигуряване на безпроблемно и ефективно функциониране. Редовната рутинна поддръжка е от съществено значение, за да могат корабите да работят на оптималното си ниво. Появата на ЦБ доведе до революция в симулирането и прогнозирането на неизправности, позволявайки наблюдение в реално време на състоянието на кораба, идентифициране на ключови точки за поддръжка и проактивно прогнозиране и отстраняване на неизправности. При повреда на кораба екипажът може да анализира въздействието на повредата върху модела на виртуалния близнак и да разработи предложен план за поддръжка, като използва съответните данни от надеждни източници [11,12].

ЦБ може да се използва за различни фази от жизнения цикъл на кораба, включително фазата на проектиране, фазата на производство, фазата на експлоатация и фазата на оптимизиране на поддръжката. Във фазата на проектиране на кораба ЦБ може значително да съкрати цикъла на проектиране на продукта, особено за голямо корабно оборудване или платформи с дълъг цикъл на проектиране и високи разходи. Чрез картографиране на данните за проектиране от физическото пространство към виртуалното пространство и непрекъснато коригиране на параметрите на кораба ЦБ позволява ефективно проектиране на корабни продукти. По време на етапа на производство и обработка на кораби ЦБ може да се използва в линията за обработка на частите, за да се създаде виртуална производствена линия. Тази линия може да дава инструкции и да направлява физическите производствени процеси на интелигентни корабни продукти. Това приложение на производствените линии улеснява автоматизираните и рационализирани производствени процеси. В оперативната фаза на кораба ЦБ позволява наблюдение в реално време на всички системи, незабавни актуализации на състоянието и исторически данни за подпомагане на навигацията и прогнозиране на дефекти. Информацията, събрана от експлоатацията на кораба, може да се вкара в модела на цифровите близнаци за конструиране и проектиране, осигурявайки ценни реални оперативни данни и за двете области. Тези данни могат да се използват за генериране на препоръки за оптимизация на бъдещия дизайн на кораба и намаляване на неизправностите, като по този начин се подобряват експлоатационните характеристики и безопасността на кораба. Освен това ЦБ може да създаде модел за визуално дистанционно наблюдение за оптимизиране на поддръжката на корабното оборудване.

Като анализира параметрите в реално време от сензорите на оборудването или системите за управление, този модел може да преглежда състоянието на оборудването, да издава своевременни предупреждения, ако е необходимо, и да препоръчва подходящи

процедури за поддръжка. Такъв холистичен подход на интегриране и интерпретиране на физическите знания и измерванията на данни за задачите за откриване, вместо да се разчита единствено на данните от сензорите, превръща ЦБ в цялостен и ефективен метод за оптимизиране на поддръжката. Освен това ЦБ може да симулира типични режими и механизми на повреда, което подпомага анализа на основните причини и прогнозирането на прогреса на деградация.

Тази възможност подобрява разбирането за работата на корабното оборудване и помага за проактивното планиране на поддръжката. В обобщение, ЦБ предлага мощно решение за различни фази от жизнения цикъл на кораба - от проектирането и производството до експлоатацията и поддръжката. Способността му да интегрира физични знания и данни от измервания, да осигурява мониторинг в реално време, да генерира препоръки за оптимизация и да симулира режими на отказ го превръща в ценен инструмент за оптимизация на проектирането, производството и експлоатацията на кораби в морската индустрия.

Според [13] интелигентната система за мониторинг на морската индустрия осигурява подкрепа за визуализация на данни в реално време за развитието на промишлените предприятия. Прилагането на ЦБ има потенциала значително да повиши производствената ефективност на индустриалното производство, като в крайна сметка положи основата за интелигентна визуализация на данни и ефективно агрегиране на данни в морската индустрия.

Освен това ЦБ предлага потенциал за ефективно интегриране на физически и цифрови модели, което позволява на морската индустрия да постигне цифрова интелигентност във виртуални среди. Сливването на информация от виртуални и физически модели включва събиране, предаване, извличане на данни и съвместен контрол. Необходимо е обаче да се подобрят надеждността и приложимостта на алгоритмите за сливане, тъй като ЦБ обработват различни форми на структурирани, полуструктурирани или неструктурирани данни. Въпреки продължаващите усилия за стандартизиране на информацията, работата с разнородни типове данни остава предизвикателство. Използването на различни стандарти за представяне на данни при междумашинна комуникация с голям брой типове данни води до по-ниска надеждност на обмена на информация [14,15]. Това е особено актуално в морската индустрия, в която корабното оборудване, включително системите за динамично позициониране, работи в тежки условия с постоянни промени в натоварването, което налага по-високи изисквания за взаимодействие и интегриране на данните.

4. Ползи от използването на цифров близък при системите за динамично позициониране

Концепцията за цифров близък - виртуално представяне на физически актив, което отразява реалните условия и поведение - вече направи революция в сектори като аерокосмическата индустрия, автомобилостроенето и производството. Сега тя навлиза и в

морската индустрия, предлагайки ползи, които са твърде съществени, за да бъдат пренебрегнати.

- **Повишена оперативна ефективност**

Цифровите близнаци са изключително полезни при оптимизиране на експлоатацията на корабите. Чрез непрекъснат мониторинг на параметри като разход на гориво, натоварване на тръстерите и генераторите, цифровите близнаци могат да симулират DP операции в реално време, като помагат за оптимизиране работата на системата за динамично позициониране, намаляване на разхода на гориво и натоварването на тръстерите. Това води до повишаване на оперативната ефективност.

- **Предсказуема поддръжка**

С помощта на ЦБ операторите могат да преминат от реактивна към проактивна поддръжка. Чрез непрекъснат мониторинг на състоянието на отделните елементи на системата за динамично позициониране, като референтни системи, тръстери, генератори, ЦБ може да прогнозира потенциални проблеми, преди те да възникнат, което позволява навременна намеса без прекъсване на работата. Това може да доведе до намаляване на непланираната поддръжка с до 20 %, което намалява значително разходите.

- **Съответствие и устойчивост**

Цифровите близнаци помагат на корабните компании да се ориентират в сложните международни и локални екологични разпоредби, като предоставят информация в реално време за горивната ефективност, емисиите и използването на енергия. Това дава възможност на операторите да вземат информирани решения, които гарантират спазването на нормативните изисквания, като същевременно оптимизират операциите за намаляване на емисиите - от решаващо значение за постигане на целите на IMO за декарбонизация.

- **Дистанционно наблюдение и сътрудничество**

В епоха, в която дистанционните операции са все по-важни, цифровите близнаци създават цифрова връзка между кораба и брега. Това позволява на екипите на брега да оценяват работата на кораба, да си сътрудничат с екипажа на борда и да предоставят насоки в реално време - намалявайки необходимостта от физически инспекции и повишавайки безопасността на операциите. В допълнение, такава връзка между кораба и производителя на системата за динамично позициониране, или между кораба и независимата компания за одитиране и провеждане на годишни инспекции, би била изключително полезна.

- **Вземане на решения, основани на данни**

За разлика от традиционните подходи, които разчитат на исторически данни, цифровите близнаци предоставят основани на доказателства прогнози в реално време, които помагат на корабните оператори да вземат по-интелигентни и проактивни решения при работата на системата за динамично позициониране.

- **Съкращаване на времето за разработка и повишаване на ефективността на производството**
- **Подобряване на оперативната гъвкавост и намаляване на разходите**

- **Усъвършенстване и подобряване на производителността и състоянието на системата**
- **Подобряване на качеството и ефективността на процесите на одобрение и сертифициране на морски продукти и операции**

5. Особенности на цифровите близнаци

Често срещан въпрос е как цифровите близнаци се различават от настоящите системи за производителност на корабите. Особеностите на цифровите близнаци биха могли да се обобщят в следното:

- **Представяне в реално време срещу статични модели**

Системите, подкрепени от научно базирани данни, често използват статични модели, базирани на предположения, разработени по време на проектирането на кораба. Тези системи описват минали тенденции, докато цифровият близнак е динамична реплика в реално време, която непрекъснато се развива въз основа на текущите и историческите данни на кораба.

- **Цялостна системна интеграция**

Моделите на корабната архитектура обикновено се фокусират върху изолирани аспекти на работата на кораба - като съпротивление на корпуса или ефективност на машините. За разлика от тях, цифровите близнаци предлагат холистичен поглед чрез интегриране на данни от множество системи (напр. задвижване, гориво, условия на околната среда) за управление на плавателния съд, което позволява по-добро вземане на решения и оптимизиране на взаимозависимите системи.

- **Прогнозен срещу описателен анализ**

Докато традиционните системи за производителност предоставят описателен анализ на миналите резултати, цифровите близнаци предлагат възможности за прогнозиране. Използвайки данни в реално време и изкуствен интелект, ЦБ симулират бъдещи сценарии, позволявайки на операторите да предвидят повреди на машините, да оптимизират разхода на гориво и да планират най-ефективните маршрути.

- **Непрекъснато обучение**

Цифровите близнаци използват машинно обучение, за да се подобряват непрекъснато. Тъй като се събират повече данни, те стават все по-точни и усъвършенствани в прогнозирането на поведението и оптимизирането на производителността – нещо, което традиционните модели или статичните анализи на корпуса не могат да постигнат.

- **Повишаване на стойността на активите**

Наличието на цифров близнак може да увеличи остатъчната стойност на плавателния съд. Потенциалните купувачи, застрахователи и наематели оценяват активите с прозрачна оперативна история и история на поддръжката. Чрез документиране и оптимизиране на

всеки аспект на плавателния съд чрез цифрови близнаци, стойността на кораба на пазара може да бъде значително повишена.

- **Намаляване на общите разходи**

Чрез осигуряване на прогнозна поддръжка и оптимизиране на експлоатацията, цифровите близнаци могат значително да намалят общите разходи за поддръжка на плавателни съдове.

6. Подготовка за внедряване на цифров близнак

За ефективното внедряване на цифров близнак стабилната инфраструктура за данни е от ключово значение. Интегрирането на ЦБ изисква сериозна подготовка, която включва:

- **Цялостна интеграция на сензори**

Това включва инсталиране на висококачествени сензори за наблюдение на ключови параметри - като разход на гориво, натоварване на тръстерите и генераторите, мониторинг на референтните системи, вибрации на машината, напрежение на корпуса и условия на околната среда. Точността и изчерпателността на цифровия близнак разчитат до голяма степен на качеството на събраните данни, което прави надеждните сензори от съществено значение. ЦБ трябва да се калибрира по време на началната фаза на експлоатационния живот, за да се възпроизведе максимално точно поведението на кораба в хода на неговата експлоатация.

- **Мрежи за комуникация на данни**

Морската среда изисква надеждно предаване на данни, дори в отдалечени райони. Това се постига чрез използването на сателитна комуникация.

- **Управление на данни и облачна интеграция**

Използването на облачни платформи за съхранение и анализ ще улесни потока от данни, необходим за създаване и поддържане на цифров близнак.

- **Яснота и структуриране на данни**

Всички входящи данни трябва да са ясни и правилно структурирани. Тази стъпка е от решаващо значение за създаването на точни прогнозни модели и симулации. Това изисква елиминиране на шума, стандартизиране на форматите и гарантирана съвместимост между различните източници на данни.

- **Разширен анализ и интеграция на изкуствен интелект AI**

За да се превърнат входните необработени данни в предиктивен анализ, е необходимо разработване и интегриране на усъвършенствани алгоритми за анализ и машинно обучение.

- **Обучение на екипажа и управление на промените**

Цифровият близнак може да бъде използван ефективно само ако екипажът знае как да го използва правилно. Трябва да се въведат програми за обучение, за да се образова персоналот за интерпретация на данни, вземане на решения в реално време и ролята на технологията ЦБ в ежедневните операции.

Силата на ЦБ се крие в способността му непрекъснато да се развива, учи и предоставя оперативни прогнози, които бяха немислими само преди няколко години.

Заключение

С нарастващата вълна на дигитализация, цифровият близък се разглежда като много мощна технология в различни индустрии. Появата на цифровите близници осигурява ефективен начин за осъществяване на мониторинг и контрол на корабните системи, прогнозиране на евентуални дефекти и намаляване на риска за свързаната инфраструктура, оборудване и процеси. Необходими са повече изследвания за подобряване на традиционните методи за събиране и обработка на данни и за прилагане на комуникационния интерфейс между реални кораби или отделни техни системи и цифровите им близници. Подчертава се значението на стандартизацията. Необходимо е да се разработят универсални платформи и инструменти за приложения за цифрови близници.

При прилагането на технологията за цифрови близници в кораби и офшорни конструкции, моделът близък трябва да се актуализира по време на експлоатационния живот с данни за работата на системите за динамично позициониране, събирани по време на инспекциите, както и по време на реални мисии, и да може да се актуализира според случайните повреди от сблъсъци, пожари, и експлозии.

Чрез стандартизирано и съвместно моделиране морският сектор има потенциала да се трансформира в дигитално интелигентна област с използването на ЦБ в бъдеще. Тази трансформация може да бъде допълнително засилена чрез интегриране на физически и цифрови модели във виртуална среда. Интегрирането на цифровите близници и технологията с изкуствен интелект може синергично да допринесе за напредъка на научните изследвания и подобряване работата на системите за динамично позициониране.

Използвана литература

[1] Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G. & Bettenhausen, K.D. 2015. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. IFAC-PapersOnLine 48(3): 567-572

[2] Grieves, M., Vickers, J., 2017. Digital twin: Mitigating unpredictable,undesirable emergent behavior in complex systems, in:Transdisciplinary perspectives on complex systems. Springer, pp.85-113.;

[3] Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., Hicks, B., 2020. Characterising the digital twin: A systematic literature review. CIRPJournal of Manufacturing Science and Technology 29, 36{52.; Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E.P., Qiao, Y., Murray, N., Devine, D., 2021. Digital twin: origin to future. Applied System Innovation 4, 36.)

- [4] Glaessgen, E. & Stargel, D. 2012. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. 53rd AI-AA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Hawaii, 23-26 April 2012.)
- [5] Grieves, M. 2019. Virtually intelligent product systems: digital and physical twins. In Flumerfelt et al. (ed.), *Complex systems engineering: theory and practice*: 175-200. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [6] N. Jones, „Computer science: The learning machines,“ *Nature*, vol. 505, no. 7482, pp. 146-148, Jan. 2014.
- [7] Zeb, S.; Mahmood, A.; Hassan, S.A.; Piran, M.J.; Gidlund, M.; Guizani, M. Industrial digital twins at the nexus of nextG wireless networks and computational intelligence: A survey. *J. Netw. Comput. Appl.* 2022, 200, 103309.
- [8] Lee, J.H.; Nam, Y.S.; Kim, Y.; Liu, Y.; Lee, J.; Yang, H. Real-time digital twin for ship operation in waves. *Ocean Eng.* 2022, 266, 112867
- [9] Assani, N.; Mati'c, P.; Katalini'c, M. Ship's digital twin-a review of modelling challenges and applications. *Appl. Sci.* 2022, 12, 6039.
- [10] Van der Horn, E.; Wang, Z.; Mahadevan, S. Towards a digital twin approach for vessel-specific fatigue damage monitoring and prognosis. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2022, 219, 108222
- [11] Zhang, C.; Dong, L.; Wang, Y. Design-Manufacturing-Operation & Maintenance (O&M) Integration of Complex Product Based on Digital Twin. *Appl. Sci.* 2023, 13, 1052.
- [12] Yin, Y.; Zheng, P.; Li, C.; Wang, L. A state-of-the-art survey on Augmented Reality-assisted Digital Twin for futuristic humancentric industry transformation. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2023, 81, 102515.
- [13] Choi, S.; Woo, J.; Kim, J.; Lee, J.Y. Digital twin-based integrated monitoring system: Korean application cases. *Sensors* 2022, 22, 5450
- [14] Díaz, R.G.; Yu, Q.; Ding, Y.; Laamarti, F.; El Saddik, A. Digital twin coaching for physical activities: A survey. *Sensors* 2020, 20, 5936. [CrossRef] [PubMed]
- [15] Aloufi, S.; Saddik, A.E. MMSUM digital twins: A multi-view multi-modality summarization framework for sporting events. *ACM Trans. Multimed. Comput. Commun. Appl. (TOMM)* 2022, 18, 5.