

УДК 621.86

Володимир Савків к.т.н., доц.; Ігор Федорів; Соломія Федорів

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

БЕЗКОНТАКТНЕ ЗАХОПЛЕННЯ У РОБОТОТЕХНІЦІ

Розглянуто класифікацію безконтактних захоплювальних пристроїв для робототехнічних систем, орієнтованих на роботу з делікатними, крихкими, тонкими, стерильними, мікророзмірними та функціонально чутливими об'єктами. Узагальнено підходи до пневматичних систем на основі ефекту Бернуллі, ежекції та вихрового потоку, магнітних та електродинамічних систем, електростатичної левітації, акустичних систем на основі стоячих хвиль, ближнього акустичного поля та однопроменевого акустичного захоплення, а також оптичних пасток.

Ключові слова: захоплення, транспортування, робототехніка, ефект Бернуллі, левітація

Savkiv Volodymyr, Fedoriv Ihor, Fedoriv Solomiia

CONTACTLESS GRIPPING IN ROBOTICS

This article presents a classification of non-contact gripping devices for robotic systems designed to handle delicate, fragile, thin, sterile, micro-sized, and functionally sensitive objects. It summarizes approaches to pneumatic systems based on the Bernoulli effect, ejection, and vortex flow; magnetic and electrodynamic systems; electrostatic levitation; acoustic systems based on standing waves, the near-field acoustic field, and single-beam acoustic grasping; as well as optical traps.

Keywords: capture, transport, robotics, Bernoulli effect, levitation

1. Проблематика контактного захоплення

Перехід сучасних галузей промисловості (зокрема мікроскладання, фармацевтичного пакування, виробництва напівпровідників, біотехнологічного дозування та високочистих лабораторних процесів) до роботи з функціонально чутливими виробами зробив проблему фізичного контакту між виконавчим органом робота та об'єктом маніпулювання визначальною. Для делікатних, тонких, крихких, стерильних та мікророзмірних об'єктів традиційний механічний дотик становить серйозну загрозу.

Насамперед, для тонких пластин, полімерних плівок, оптичних компонентів, дрібних порошкових агломератів або крихких біоматеріалів механічний контакт означає високий ризик появи подряпин та локальних деформацій. Більше того, фізичний обтиск неминуче призводить до появи небажаних адгезійних сил, нестабільності під час відриву деталі від захоплювача, перенесення забруднень, виникнення залишкових напружень, втрати геометричної точності та, як наслідок, до значного зростання рівня виробничого браку.

2. Сутність рішення: Безконтактне маніпулювання

Для уникнення цих проблем впроваджують безконтактні системи, які дозволяють левітувати об'єкти поруч із робочим органом робота, не торкаючись його. Принципова перевага цього підходу полягає в тому, що об'єкт не піддається стисканню, не зазнає концентрованого механічного навантаження та не контактує із забруднювачами. Для цього використовують різні фізичні явища. Основні типи таких систем:

- Пневматичні системи (працюють за рахунок потоків повітря);
- Магнітні системи (використовують силу магнітного поля);
- Електростатичні системи (працюють завдяки статичній електриці);

- Акустичні системи (утримують деталі за допомогою звукових хвиль);
- Оптичні системи (використовують тиск лазерного променя).

3. Детальний огляд безконтактних рішень

3.1. Пневматичні системи

Пневматичні захоплювачі (що функціонують на основі ефекту Бернуллі, ежекції та вихрових потоків) на сьогодні є найбільш зрілим сегментом безконтактних технологій для промислового середовища.

Принцип дії: У пристроях Бернуллі стиснене повітря прискорюється в тонкому зазорі між корпусом захоплювача та деталлю; зростання швидкості спричиняє зниження статичного тиску, що і створює підйомну силу. Вихрові системи утворюють область зниженого тиску поблизу центру завдяки тангенціально закрученому повітряному потоку. Ежекційні схеми покладаються на струминний потік, що захоплює навколишнє повітря та формує локальне розрідження [1].

Особливості рішення: Ці системи одночасно створюють підйомну силу та газову подушку, що дозволяє утримувати деталь без механічного дотику та частково самоцентрувати її [1, 2]. Вони ідеально вирішують проблему маніпулювання тонкими, крихкими, пористими або текстурованими об'єктами, такими як кремнієві пластини, сонячні панелі, тонке скло, друковані плати та гнучкі плівки. Пневматика забезпечує високу продуктивність ліній та делікатне поводження з плоскими виробами.

3.2. Магнітні та електродинамічні системи

Цей клас рішень базується на взаємодії магнітного поля зі струмопровідним або магнітосприйнятливим елементом [3].

Принцип дії: На відміну від пневматики, тут сили передаються виключно через магнітне поле, що означає повну відсутність як механічного тертя, так і повітряного тиску.

Особливості рішення: Відсутність потоків газу та механічного зносу робить магнітну левітацію ідеальною для чистих виробництв. Технологія забезпечує високодинамічний двовимірний транспорт з багатьма ступенями свободи та мікрометровою точністю позиціонування. Вона найчастіше застосовується у вигляді спеціальних транспортних платформ (planar motor systems), де деталі переміщуються на пасивних магнітних носіях над поверхнею, яка складається із множини котушок [3].

3.3. Електростатична левітація

Цей спеціалізований метод формує підйомну дію електричним полем у (подібно до того, як натерта повітряна кулька притягує волосся) і стабілізує об'єкт шляхом активного керування напругою на електродах [4].

Особливості рішення: Головна цінність електростатичної левітації полягає в можливості безконтактної обробки матеріалів. Вона дозволяє нагрівати та досліджувати малі зразки (1–3 мм) у вакуумі без ризику паразитного забруднення чи гетерогенного зародкоутворення, що неминуче при використанні традиційних контейнерів. Технологія є незамінною для високотемпературного матеріалознавства, проте має обмеження щодо промислових масштабів.

3.4. Акустичні системи

Акустичні левітатори та захоплювачі використовують для утримання об'єктів акустичні випромінювання [4].

Принцип дії та види: Існує три основних підвиди цього методу. Системи стоячої хвилі (Standing Wave) утримують дрібні деталі у вузлах хвильового поля у вільному просторі між динаміком і відбивачем. Левітація ближнього акустичного поля (NFAL) створює підйомну силу завдяки високому тиску в мікроскопічному зазорі між вібруючою поверхнею та планарним об'єктом. Однопроменеве захоплення маніпулює деталями за допомогою одного сфокусованого пучка без використання відбивача [5].

Особливості рішення: Акустичні системи найменш вимогливі до матеріалу об'єкта, хоча й чутливі до його геометрії. Близьке поле чудово зарекомендувало себе як транспортер для легких плоских деталей, підкладок та листових виробів. Інші акустичні методи дозволяють без механічного контакту утримувати, обертати та перемішувати краплі, мікрочастинки та біологічно чутливі об'єкти в чистих зонах.

3.5. Оптичні пастки

Оптичні пастки (пінцети) використовують градієнт інтенсивності сфокусованого лазерного променя та тиск випромінювання [6].

Особливості рішення: Це еталонний інструмент для надзвичайно точної маніпуляції на мікро- та нанорівні. Оптичні системи забезпечують просторове переміщення без жодної механічної інерції інструмента. Вони відіграють ключову роль у лабораторних дослідженнях (біофізика, спектроскопія, мікрофлюїдика), проте їх впровадження у масове виробництво принципово обмежується небезпекою локального нагрівання та фотопшкодження матеріалів при збільшенні потужності для підняття важких об'єктів. [6]

4. Висновки щодо вибору технології

Вибір конкретного рішення жорстко диктується виробничою задачею. Якщо ключовим пріоритетом є висока продуктивність конвеєра та делікатне перенесення листових чи крихких виробів, перевагу слід віддати пневматичним схемам. Для гнучкої внутрішньомашинної логістики, високоточного транспорту та мікрометрового позиціонування найбільш ефективною є магнітна левітація. Якщо критичною вимогою є абсолютна хімічна чистота процесу при високих температурах, застосовують електростатичну безконтейнерну левітацію. Коли ж виникає потреба маніпулювати міліметровими деталями, краплями рідини, біологічними клітинами чи мікрооб'єктами в просторі, оптимальним рішенням стають акустичні або високоточні оптичні інструменти.

Перелік посилань

1. Mykhailyshyn R., Savkiv V., Maruschak P., Xiao J. A systematic review on pneumatic gripping devices for industrial robots. *Transport*. 2022. Vol. 37, No. 3. P. 201–231. DOI: 10.3846/transport.
2. Brun X., Melkote S. N. Effect of substrate flexibility on the pressure distribution and lifting force generated by a Bernoulli gripper. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2012. Vol. 134, No. 5. Article 051010. DOI: 10.1115/1.4007186.2022.17110.
3. Beckhoff Automation. XPlanar | Planar motor system. Official product page. Available at: <https://www.beckhoff.com/en-en/products/motion/xplanar-planar-motor-system/> Accessed: 15.04.2026.
4. Hyers R. W., Rogers J. R. A review of electrostatic levitation for materials research. *High Temperature Materials and Processes*. 2008. Vol. 27, No. 6. P. 461–474. DOI: 10.1515/HTMP.2008.27.6.461.
5. Vandaele V., Lambert P., Delchambre A. Non contact handling in microassembly: acoustical levitation. *Precision Engineering*. 2005. Vol. 29, No. 4. P. 491–505. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2005.03.003.
6. Ashkin A., Dziedzic J. M., Bjorkholm J. E., Chu S. Observation of a single beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Optics Letters*. 1986. Vol. 11, No. 5. P. 288–290. DOI: 10.1364/OL.11.000288.